

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

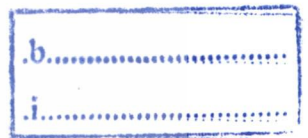
สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ
โดยใช้โครงสร้างการตัดขอบรูปโค้งกลับด้านและป้อนเชิงประจุไฟฟ้า

UHF-RFID READER ANTENNA USING CAPACITIVELY FED
AND TRUNCATED REVERSE-ARC SHAPE STRUCTURE



วพ.
ค145
2559

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 141233
วันเดือนปี..... 8 ส.ค. 2559



12753300

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-D-018-182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UHF-RFID READER ANTENNA USING CAPACITIVELY FED
AND TRUNCATED REVERSE-ARC SHAPE STRUCTURE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFIMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015
KMITL-2015-EN-D-018-182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟโดยใช้โครงสร้างการตัดขอบรูปโค้งกลับด้านและบ่อนเชิงประจุไฟฟ้า

Thesis Title UHF-RFID Reader Antenna using Capacitively Fed and Truncated Reverse-Arc Shape Structure

นักศึกษา นายคมกฤษ บุษยยิ่ง

รหัสประจำตัว 54610168

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-D-018-182

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.พรชัย	ทรัพย์สินิ	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
ศ.ดร.ประยุทธ์	อัครเอกมาลิน	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกุล	
รศ.ดร.ชวรงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2558 เวลา 09:00-11:00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ **คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์** ที่มีการนำไปใช้

วันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ โดย ใช้โครงสร้างการตัดขอบรูปโค้งกลับด้านและป้อนเชิงประจุไฟฟ้า
นักศึกษา	นายคมกฤษ บุญยิ่ง
รหัส	54610168
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศระนาบเรียบโพลาริซิงวงกลมโดยใช้เทคนิคป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าพร้อมทั้งตัดขอบรูปโค้งกลับด้านเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ สายอากาศประกอบด้วย แผ่นแพร่กระจายคลื่น ช่องว่างอากาศและระนาบกราวด์ ขอบสองด้านถูกตัดด้วยรูปโค้งกลับด้านเพื่อทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซิงวงกลมและเทคนิคการป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าถูกนำมาขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ในส่วนการจำลองสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เพียง 2.97% (894 ถึง 921 MHz) มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซิงเชิงเส้นแนวตั้งพร้อมด้วยอัตราส่วนแชนเท่ากับ 40 dB และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง ตามลำดับ เทคนิคการป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า พบว่าสามารถเพิ่มช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เพิ่มขึ้น 7.0% ถึง 9.0% มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซิงเชิงเส้นแนวตั้งพร้อมด้วยอัตราส่วนแชนเท่ากับ 40 dB มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางและมีอัตราขยายมากกว่า 5.5 dBi (860 ถึง 960 MHz) ตามลำดับ เทคนิคการตัดขอบรูปโค้งกลับด้านด้วยรัศมี (R_3) เท่ากับ 60 mm พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เท่ากับ 13.0% (849.98 ถึง 968.22 MHz) มีช่วงกว้างอัตราส่วนแชน 3 dB เท่ากับ 11.81% (855.2 ถึง 962.7 MHz) และมีอัตราส่วนแชนต่ำที่สุดเท่ากับ 0.55 dB ที่ความถี่ 910 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางพร้อมด้วยการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซิงวงกลมหมุนซ้ายมือ และอัตราขยายสายอากาศเท่ากับ 6.36 dBic ที่ความถี่ 910 MHz ตามลำดับ ในส่วนของการทดลอง สายอากาศต้นแบบได้ทำการขึ้นและทดสอบพบว่า มีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เท่ากับ 13.00% และมีช่วงกว้างอัตราส่วนแชน 3 dB เท่ากับ 11.54% ในส่วนของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของโพลาริซิงวงกลมหมุนซ้ายมือ มีช่วงกว้างครึ่งกำลังมากกว่า 80° ทั้งบนระนาบ xy และ xz ผลการทดสอบอัตราขยายบนระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟมีมากกว่า 5.90 dBic และสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟที่ได้นำเสนอนี้มีระยะการอ่านช่วงระหว่าง 0 ถึง 6.2 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	UHF-RFID Reader Antenna using Capacitively Fed and Truncated Reverse-Arc Shape Structure
Student	Mr. Komkris Boonying
Student ID.	54610168
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This thesis presents a circularly polarized flat antenna with truncated corners using the capacitively coupled feed technique for UHF RFID applications. A radiating plate, an air gap and a ground plane constitute the antenna. The reverse-arc shape truncated corners are utilized to generate a circularly polarized (CP) radiation and the capacitively coupled feed technique is adopted to enhance $|S_{11}|$ bandwidth. In the simulation, a suspended antenna structure is fed by a coaxial probe and it achieves the $|S_{11}|$ bandwidth of 2.97% (894 to 921 MHz), a vertical polarization radiation with an axial ratio (AR) of 40 dB and a unidirectional radiation pattern, respectively. The capacitively coupled feed technique is obtained to enhance $|S_{11}|$ bandwidth of 7.0 to 9.0%, the vertical polarization with the AR of 40 dB, the unidirectional radiation pattern and the gain more than 5.5 dBi (860 to 960 MHz), respectively. The truncated reverse-arc shape technique with the radius of 60.0 mm provides the $|S_{11}|$ bandwidth of 13.0% (849.98 to 968.22 MHz), the 3-dB axial ratio (AR) bandwidth of 11.81% (855.2 to 962.7 MHz) and the AR lower than by 0.55 dB at 910 MHz, the unidirectional radiation pattern with a left-hand circular polarized radiation and gain of 6.36 dBic at 910 MHz, respectively. In the experiment, an antenna prototype was fabricated and its measured results were 13% for the $|S_{11}|$ bandwidth and 11.54% for the 3-dB axial ratio (AR) bandwidth. The half-power beamwidths (HPBW) of the left-handed circular polarization (LHCP) on the xy and xz planes were both greater than 80° . The measured gain of the UHF RFID system is higher than 5.90 dBic and the proposed UHF RFID reader antenna has the read range between 0 and 6.2 m.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อย ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นผู้ช่วยเหลือ ดูแลในด้านการศึกษาและงานวิจัยทั้งในเวลาและนอกเวลาราชการ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคำแนะนำที่มีประโยชน์ในช่วงเวลาที่ข้าพเจ้าได้เข้ามาเรียนระดับปริญญาเอก นอกจากนี้ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์อีกสองท่าน คือ ศาสตราจารย์ ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. สมผล โกศลวิตร ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คำแนะนำพื้นฐานด้านวิชาการและเคยเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ระดับปริญญาตรีและวิทยานิพนธ์ ระดับปริญญาโท ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ทำให้อาจารย์ได้นำความรู้เหล่านั้นนำมาต่อยอด พัฒนา และสามารถทำงานวิจัยในระดับปริญญาเอกให้สำเร็จลุล่วง ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณสมาชิกในท้องปฏิบัติกรการสื่อสารไร้สายทุกท่าน ที่ให้การแนะนำ ช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยของข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และเหล่าเครือญาติของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจ แรงผลักดันและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องเป็นอย่างดีจึงทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงที่ได้มาจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คมกฤษ บุญยั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	4
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น.....	5
2.1 เกริ่นนำ.....	5
2.2 สายอากาศแผ่นพิมพ์.....	5
2.2.1 สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น.....	6
2.2.2 แผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น.....	7
2.2.3 การป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล.....	10
2.3 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น.....	15
2.3.1 โพลารไรซ์ของสายอากาศ.....	15
2.3.2 อัตราส่วนแกนของสายอากาศ.....	18
2.3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	19
2.3.4 สภาพเจาะจงทิศทางและอัตราขยายของสายอากาศ.....	22
2.4 บทสรุป.....	23
บทที่ 3 การขยายช่วงกว้างความถี่ด้วยการป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าสำหรับอาร์เอฟไอดี ยานความถี่ยูเอชเอฟ.....	24
3.1 เกริ่นนำ.....	24
3.2 การป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า.....	24
3.3 การศึกษาและออกแบบการป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า.....	28
3.4 บทสรุป.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลมโดยการตัดขอบสองด้านสำหรับอาร์เอฟ ไอเดียันความถี่เอชเอฟ.....	35
4.1 เกริ่นนำ.....	35
4.2 งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี.....	35
4.3 การแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลมของสายอากาศแผ่นพิมพ์.....	43
4.4 การแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลมด้วยการตัดขอบสองด้าน.....	44
4.5 บทสรุป.....	57
บทที่ 5 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียัน ความถี่เอชเอฟต้นแบบ.....	58
5.1 เกริ่นนำ.....	58
5.2 สายอากาศต้นแบบ.....	58
5.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ.....	59
5.3.1 การทดสอบ S ₁₁ ของสายอากาศต้นแบบ.....	60
5.3.2 การทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศต้นแบบ.....	60
5.3.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ.....	61
5.3.4 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ.....	63
5.3.5 การทดสอบระยะทางการติดต่อสื่อสารอาร์เอฟไอเดียันความถี่เอชเอฟ..	64
5.4 บทสรุป.....	69
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
6.1 เกริ่นนำ.....	70
6.2 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	70
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	72
เอกสารอ้างอิง.....	74
ประวัติผู้เขียน.....	78
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความกว้างของแผ่นแพร่กระจายคลื่น (W) และระยะตำแหน่งป้อนสัญญาณ (d_p) ของ เมื่อความสูงช่องว่างอากาศ (h_a) ถูกปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 26 mm ถึง 50 mm....	14
2.2	การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโครงสร้างต่างๆ สายอากาศแผ่นพิมพ์ เมื่อถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล.....	14
3.1	ผลจำลองช่วงกว้างความถี่ $ S_{11} $ และอัตราขยายสายอากาศที่ถูกป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องว่างอากาศตั้งแต่ 26 mm ถึง 50 mm.....	29
4.1	ผลจำลองการตัดขอบมุมสองด้านด้วยรูปทรง 6 แบบ สำหรับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟและเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 910 MHz.....	46
5.1	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้นำเสนอ บนระนาบ xz และ xy ...	61
5.2	ผลทดสอบระยะทาง (R_{max}) ของสายอากาศที่ได้นำเสนอและสายอากาศมาตรฐาน โพลาริซ์เชิงเส้น.....	67
5.3	การเปรียบเทียบขนาดโครงสร้าง คุณลักษณะทางไฟฟ้าและระยะการอ่านสูงสุดของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	สายอากาศโครงสร้างพื้นฐาน [7-9].....	5
2.2	สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น.....	6
2.3	ผลจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (W) กับความถี่เรโซแนนซ์ (f_{01}) ของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น.....	9
2.4	การป้อนสัญญาณด้วยเทคนิควิธีต่างๆ [6].....	10
2.5	สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล.....	11
2.6	สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นพร้อมป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลที่ได้นำเสนอในบทที่ 2.....	13
2.7	ผลจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นและป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล โดยปรับเปลี่ยนความสูงช่องว่างอากาศตั้งแต่ 26 ถึง 50 mm.....	13
2.8	ลักษณะการโพลาไรซ์เชิงเส้น.....	15
2.9	ผลจำลองการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสของสายอากาศโครงสร้างที่ได้นำเสนอและมีความสูงช่องว่างอากาศเท่ากับ 42 mm.....	16
2.10	ลักษณะการโพลาไรซ์วงกลม.....	18
2.11	ผลจำลองอัตราส่วนแกนเมื่อความสูงช่องว่างอากาศ (h_a) สูงตั้งแต่ 26 mm ถึง 50 mm.....	19
2.12	ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 และการแพร่กระจายคลื่นบนโหมด TM_{01} [8].....	20
2.13	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนโหมด TM_{01} และระนาบกราวด์ขนาดอนันต์.....	21
2.14	ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (TM_{01}) บนระนาบ xz และ xy ที่ความถี่ 910 MHz เมื่อปรับเปลี่ยนความสูงช่องว่างอากาศ 26 30 34 38 42 46 และ 50 mm.....	21
2.15	ผลจำลองค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่ได้นำเสนอ เมื่อปรับเปลี่ยนความสูงช่องว่างอากาศตั้งแต่ 26 mm ถึง 50 mm.....	23
3.1	การป้อนสัญญาณลักษณะต่างๆ บนสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น.....	25
3.2	สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า (ร่องว่างวงแหวนกลม).....	25
3.3	วงจรมุมลสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นพร้อมป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า (ร่องว่างวงแหวนกลม).....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์ 26 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.4	ผลจำลองช่วงกว้างความถี่ $ S_{11} $ ของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น โดยการป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลและการป้อนสัญญาณเชิงประจูปริมาณ.....	29
3.5	ผลจำลองรัศมีด้านนอก (R_2) ของร่องว่างวงแหวนกลม เมื่อความสูงของช่องว่างอากาศ (h_a) เท่ากับ 42 mm.....	30
3.6	ผลจำลองค่าความจุไฟฟ้าร่องว่าง (C_s) หรือรัศมี R_2 ของร่องว่างวงแหวนกลม.....	30
3.7	ผลจำลองการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนแผ่นแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นพร้อมป้อนสัญญาณเชิงประจูปริมาณ.....	31
3.8	ผลจำลองการเปรียบเทียบอัตราส่วนแกนเมื่อป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลและป้อนสัญญาณเชิงประจูปริมาณให้กับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์.....	32
3.9	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ xz และ xy ที่ความถี่ 860 910 และ 960 MHz ป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลและป้อนสัญญาณด้วยเชิงประจูปริมาณ.....	33
3.10	ผลจำลองสภาพเจาะจงทิศทาง (ป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล) และอัตราขยายสายอากาศ (ป้อนสัญญาณเชิงประจูปริมาณ).....	34
4.1	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [35].....	36
4.2	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [29].....	37
4.3	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [25].....	38
4.4	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [30].....	39
4.5	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [19].....	41
4.6	สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [21].....	42
4.7	แผ่นแพร่กระจายคลื่นลักษณะต่างๆ ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลารไรซ์วงกลม.....	43
4.8	องค์ประกอบการเกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลารไรซ์วงกลม.....	44
4.9	การตัดขอบสองด้าน 6 รูปทรงพร้อมป้อนสัญญาณเชิงประจูปริมาณ.....	45
4.10	ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยรูปทรง RAS.....	47
4.11	ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยรูปทรง AS.....	48
4.12	ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยรูปทรง ITS.....	49
4.13	ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยรูปทรง RS.....	50
4.14	ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยรูปทรง SS.....	52
4.15	ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยรูปทรง ARSS.....	53
4.16	ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยร่องว่าง 6 รูปทรงที่ได้นำเสนอ.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.17	ผลจำลองมุมอัตราส่วนแกนระหว่างร่องว่าง RAS และ SS.....	55
4.18	โครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียันความถี่วิทยุที่ได้นำเสนอใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	55
4.19	ผลจำลองการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนตัวแผ่นแพรกระจายคลื่นของ สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียันความถี่ยูเอชเอฟที่ได้นำเสนอ.....	56
5.1	สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียันความถี่ยูเอชเอฟต้นแบบ.....	58
5.2	การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบในห้องไร้การสะท้อน.....	59
5.3	ผลการจำลองและผลทดสอบ $ S_{11} $ ของสายอากาศที่ได้นำเสนอ.....	60
5.4	ผลการจำลองและผลทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ได้นำเสนอ.....	61
5.5	ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 860 MHz.....	62
5.6	ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 910 MHz.....	62
5.7	ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 960 MHz.....	63
5.8	ผลจำลองและผลทดสอบอัตราขยายสายอากาศ.....	64
5.9	ผลจำลองระยะทาง (R_{max}) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนสัมประสิทธิ์การแมตซ์ ของโพลาริซ.....	65
5.10	การติดตั้งและทดสอบเพื่อหาระยะทาง (R_{max}) บนระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่ ยูเอชเอฟ.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

อาร์เอฟไอดี (RFID: Radio frequency identification) คือระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ หรือระบบระบุบ่งบอกตัวตนแบบไร้สาย มีการใช้งานครั้งแรกในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 อาศัยหลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีเรดาร์ในการตรวจจับและตรวจวัดจำนวนเครื่องบิน คิดค้นโดยเซอร์ โรเบิร์ต อเล็กซานเดอร์ วัตสัน วัตต์ (Sir Robert Alexander Watson-Watt) ระบบอาร์เอฟไอดี ในช่วงเริ่มต้นมีความสามารถในการตรวจสอบจำนวนเครื่องบิน แต่ในทางกลับกันไม่สามารถระบุฝ่าย เครื่องบินได้ ถัดจากนั้นไม่นานประเทศเยอรมันได้สังเกตปรากฏการณ์คลื่นความถี่วิทยุที่ถูกส่งมายัง สถานีฐานและพบว่าการเปลี่ยนแปลงของระดับกำลังเมื่อเครื่องบินหมุน ด้วยเหตุนี้จึงนำไป ปรากฏการณ์ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการแยกแยะเครื่องบินและระบุฝ่ายได้อย่างชัดเจน ถัดจากนั้น ไม่นานระบบอาร์เอฟไอดีได้ถูกพัฒนาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง [1] ปัจจุบันระบบอาร์เอฟไอดีมี ความสามารถระบุบ่งบอกตัวตนหรือสิ่งของได้เอง (Automatic identification) และนอกจากนี้ยังมี ลักษณะการทำงานที่คล้ายคลึงกับระบบบาร์โค้ด (Barcode) แต่ทว่าการใช้งานสะดวกกว่า มีความ รวดเร็วในการรับส่งข้อมูลและความยืดหยุ่นของระบบที่สูงกว่า ณ ปัจจุบัน พบว่าเทคโนโลยีระบบอาร์ เอฟไอดีได้ถูกนำมาใช้งานร่วมกับชีวิตประจำวันมากขึ้น อาทิเช่น การใช้บัตรผ่านเข้าออกห้องพัก สำนักรงาน หรือที่จอดรถตามศูนย์การค้าต่างๆ การใช้งานในภาคอุตสาหกรรม การใช้งานในระบบ โลจิสติกส์ การใช้งานด้านการผลิต การใช้งานการจัดการสินค้า หรือแม้กระทั่งการใช้งานกับมนุษย์ สัตว์ และสินค้าต่างๆ [2] เป็นต้น โครงสร้างระบบอาร์เอฟไอดีสามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนหลักๆ คือ ส่วนของสายอากาศแท็ก (Tag antenna) ส่วนของเครื่องอ่านข้อมูล (Reader) รวมถึงสายอากาศ เครื่องอ่านข้อมูล (Reader antenna) และส่วนควบคุม (Host computer) ตามลำดับ ในส่วนของ สายอากาศแท็กประกอบด้วยสายอากาศและชิปวงจรรวม (IC chip: Integrated circuit chip) ทำ หน้าที่บันทึกข้อมูลของวัตถุนั้นๆ สำหรับในส่วนของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างส่วนสายอากาศแท็กและส่วนควบคุม โดยทำหน้าที่ในการอ่านและเขียน ข้อมูลให้กับแท็ก และส่วนสุดท้ายคือส่วนการควบคุมทำหน้าที่คอยควบคุมเครื่องอ่านข้อมูลรวมถึง คอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ใช้งานร่วมกับอาร์เอฟไอดี [3]

ในปัจจุบันระบบอาร์เอฟไอดีได้แบ่งย่านความถี่ใช้งานออกเป็น 4 ย่านความถี่ [4] คือ ย่านความถี่ต่ำ (Low frequency: <150.00 kHz) ย่านความถี่สูง (High frequency: 13.56 MHz / 27.12 MHz) ย่านความถี่ยูเอชเอฟ (Ultra-high frequency: 433.00 MHz / 860.00–960.00 MHz) และย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave frequency: 2.45 GHz / 5.80 GHz) โดยแต่ละย่าน ความถี่ที่ได้กล่าวมานั้นมีคุณสมบัติ และการใช้งานจำเพาะเจาะจงที่แตกต่างกันออกไป อาทิเช่น อาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำจะเหมาะกับงานที่ต้องการระยะทางใกล้และไม่ต้องการการอ่านข้อมูลที่ รวดเร็วมาก เช่น งานประเภทตรวจหาและเก็บประวัติของสัตว์ ป้ายสินค้าที่หรือระบบกันขโมยใน รถยนต์ เป็นต้น สำหรับอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงจะมีระยะทางการติดต่อสื่อสารค่อนข้างไกลและมี แอกร์วักการรับส่งข้อมูลที่ปานกลางโดยได้นำไปใช้ในงานที่ห้องสมุดสามารถกักร์ดและบัตรเข้าออกสถานที่ การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นต้น ในส่วนของอาร์เอฟไอทีย่านความถี่ยูเอชเอฟมีระยะการติดต่อสื่อสารได้ไกลกว่าย่านความถี่สูง และมีความสามารถในการอ่านข้อมูลรวดเร็วมาก การใช้งานโดยส่วนมากจะถูกนำไปใช้กับระบบการขนส่งสินค้า ระบบการบริหารคลังสินค้า หรือแม้แต่การใช้งานร่วมกับรหัสสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ EPC (Electronic product code) ตามมาตรฐาน EPC Global Class 1 Gen 2 และในปัจจุบันยังพบว่าระบบอาร์เอฟไอทีย่านความถี่ดังกล่าวมีการใช้งานทางด้านการค้าขายมีมากขึ้นเป็นทวีคูณ [5-6] และย่านความถี่สุดท้ายคือย่านความถี่ไมโครเวฟมีระยะการติดต่อสื่อสารไกลมาก การนำอาร์เอฟไอทีย่านความถี่ไมโครเวฟไปใช้งานโดยส่วนมาก จะถูกนำไปใช้ร่วมกับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) อุตสาหกรรมรถยนต์และการเข้าออกสถานที่ เป็นต้น

การติดต่อสื่อสารระบบอาร์เอฟไอทีสามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วนหลักๆ คือ การติดต่อสื่อสารแบบเชื่อมต่อเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) โดยอาศัยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการโอนถ่ายกำลังงานบนระยะสนามใกล้ (Near field) โดยส่วนมากมักจะพบในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงเท่านั้น และการติดต่อสื่อสารแบบการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscattering) อาศัยสนามไฟฟ้าในการโอนถ่ายกำลังงานบนระยะสนามไกล (Far field) อาศัยหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับระบบเรดาร์ จะเหมาะกับการใช้งานที่ย่านความถี่ยูเอชเอฟและไมโครเวฟ แต่อย่างไรก็ตาม การติดต่อสื่อสารแบบการกระจัดกระจายย้อนกลับดังที่ได้กล่าวมาควรคำนึงถึงการโพลาไรซ์ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล และสายอากาศแท็กเพื่อให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ดีมีประสิทธิภาพ ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้งเช่นเดียวกับสายอากาศแท็ก และในทางตรงกันข้ามสายอากาศอ่านข้อมูลมีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง แต่สายอากาศแท็กมีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน (โพลาไรซ์ไม่ตรงกัน Polarization mismatch) เป็นที่แน่นอนประสิทธิภาพการติดต่อสื่อสารลดลงอย่างชัดเจนหรือไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้เลย แต่สามารถแก้ไขได้โดยการนำสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular polarized: CP radiation) นำมาใช้ งาน ประสิทธิภาพการติดต่อสื่อสารจะถูกลดกำลังงานลงไปครึ่งหนึ่งซึ่งเกิดจากตัวประกอบการสูญเสียจากการโพลาไรซ์ (Polarization loss factor: PLF) และนอกจากนี้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลมยังสามารถแก้ไขปัญหาเรื่องจางหายหลายวิถี (Multipath fading) ได้อีกด้วยจึงเป็นที่มาและความสำคัญในการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอทีย่านความถี่ยูเอชเอฟมีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จากการศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อน พบว่าสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอทีย่านความถี่ยูเอชเอฟถูกออกแบบให้มีลักษณะทางโครงสร้างแบนเรียบ ง่ายต่อการออกแบบ สะดวกต่อการผลิต ติดตั้งใช้งานคล่อง น้ำหนักเบา และเคลื่อนย้ายได้สะดวก เป็นต้น สำหรับสายอากาศโครงสร้างแบนเรียบที่ถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล (Coaxial feed) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเจาะจงทิศทาง (Unidirectional radiation pattern) สามารถแบ่งโครงสร้างออกได้ 3 ประเภทหลักคือ โครงสร้างชั้นเดียว (Single layer structure) โครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นสองชั้น (Suspended structure) และโครงสร้างซ้อนกันหลายชั้น (Stacked structure) โดยทั่วไปสายอากาศโครงสร้างชั้นเดียวจะมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ($|S_{11}|$ bandwidth) เพียง 1-2% และมีค่าอัตราขยายน้อยกว่า 4 dBi แต่โครงสร้างดังกล่าวง่ายต่อการออกแบบและน้ำหนักเบา [7-9] สำหรับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นสองชั้นมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ประมาณ 2-5% และมีค่าอัตราขยายน้อยกว่า 9 dBi [10-13] และสำหรับสายอากาศโครงสร้างซ้อนกันหลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ มากกว่า 10% และมีค่าอัตราขยายมากกว่า 9 dBi [6, 9, 14-15] แต่ก็มีข้อเสียคือ สายอากาศมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ยากต่อการออกแบบและการสร้าง นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักที่มากกว่าสองโครงสร้างที่ได้กล่าวมาข้างต้น

สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ (UHF RFID reader antenna) มีความต้องการช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 860 ถึง 960 MHz ($\geq 11\%$) [16]-[17] เพื่อให้ครอบคลุมย่านความถี่ดังกล่าว โดยได้ศึกษาเทคนิควิธีการป้อนสัญญาณต่างๆ ให้กับสายอากาศทั้ง 3 โครงสร้าง [18-28] พบว่าสามารถขยายแถบความถี่ได้ ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศที่มีโครงสร้างซ้อนกันหลายชั้น [18] และสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น [19] ถูกป้อนสัญญาณด้วยรูปตัวแอล (L-shape) พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ มากกว่า 22% ในส่วนสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น [20] และสายอากาศโครงสร้างชั้นเดียว [21] ถูกป้อนสัญญาณด้วยรูปตัวเอฟ (F-shape) พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ มากกว่า 15% สำหรับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นถูกป้อนสัญญาณด้วยรูปตัวที (T-shape) สามารถขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ กว้างถึง 44% โดยมีอัตราส่วนคลื่นนิ่ง < 2 (Standing wave ratio :SWR < 2) [22] สายอากาศโครงสร้างซ้อนกันหลายชั้นถูกป้อนสัญญาณด้วยการเชื่อมต่อแบบช่องเปิด (Aperture couple) สามารถขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ถึง 25% [23-24] สำหรับในส่วนของสายอากาศโครงสร้างซ้อนกันหลายชั้นป้อนสัญญาณด้วยเส้นแถบเส้นโลหะ (Strip or line plate) และถูกต่อเข้ากับแผ่นแพร่กระจายคลื่นก็สามารถขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ มากกว่า 25.8% [25] สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นและสายอากาศโครงสร้างชั้นเดียว [26-27] ถูกป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า โดยตำแหน่งการป้อนสัญญาณดังกล่าวอยู่บนระนาบเดียวกันกับแผ่นแพร่กระจายคลื่น แต่จะถูกแยกออกจากแผ่นแพร่กระจายคลื่นพบว่าสามารถขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ได้มากกว่า 25% และสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นถูกป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าเช่นกัน แต่ตำแหน่งการป้อนจะอยู่ที่แผ่นแพร่กระจายคลื่นและพบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เพียง 5.3% [28]

จากที่มาและความสำคัญที่ได้กล่าวมาข้างต้น สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟจำเป็นต้องมีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซิงกลมเพื่อแก้ปัญหาการมิสมแมตซ์โพลาริซิงในระบบ โดยได้ศึกษาเทคนิควิธีการออกทำให้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซิงกลม ซึ่งมีเทคนิคต่างๆ เช่น เทคนิคการตัดขอบมุมทั้งสองด้านของแผ่นแพร่กระจายคลื่น [6-9, 25, 29] เทคนิคการแทรกร่องด้วยรูปทรงต่างๆ หรือการกรีดเป็นร่องบนแผ่นแพร่กระจายคลื่นหรือตามขอบหรือตามมุมของแผ่นแพร่กระจายคลื่น [6-9, 30-33] เทคนิควิธีการใช้สายอากาศโพลาริซิงแบบเชิงเส้นจำนวน 2 ตัว วางไขว้กันรูปกากบาท และสายอากาศทั้งสองตัวห่างกัน $\lambda/4$ หรือเฟสต่างกัน 90 องศา [6-9, 34] และเทคนิคสุดท้ายคือการใช้วงจรแบ่งกำลังงานเฟสต่างกัน 90 องศาต่อเข้ากับสายอากาศ [6, 9, 35] เป็นต้น

จากงานวิจัยที่มีมาก่อนและหนังสือสายอากาศ [6-9, 25-27, 29] ได้นำเทคนิคการป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าและการตัดขอบทั้งสองด้านของแผ่นแพร่กระจายคลื่นเพื่อต้องการออกแบบให้สายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟที่สามารถครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 860 ถึง 960 MHz ตามความต้องการของระบบ โดยคำนึงถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้า $|S_{11}|$ ค่าอัตราส่วนแแกน อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา พัฒนาและออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz) โดยใช้สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นและออกแบบให้แผ่นแพร่กระจายคลื่นมีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทำงานบนโหมด TM_{01} ป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลและมีแบบรูปการกระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลกระทบต่อคุณลักษณะทางไฟฟ้าเมื่อช่องว่างอากาศ (Air gap) เปลี่ยนแปลง สายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า (Capacitively fed) บนแผ่นแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยร่องว่างวงแหวนกลม (Annular-ring slot) เพื่อต้องการสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีครอบคลุมช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ตั้งแต่ 860 ถึง 960 MHz และนอกจากนี้ แผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้ถูกตัดขอบทั้งสองด้านด้วยรูปโค้งวงกลมกลับด้าน (Truncation reverse arc-shape) ส่งผลทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมและมีช่วงกว้างอัตราส่วนแกน 3 dB ครอบคลุมตามความต้องการของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ อีกทั้งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางและมีอัตราขยายมากกว่า 5.9 dBic ตลอดย่านความถี่ยูเอชเอฟ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อาศัยโปรแกรม Computer simulation technology (CST) microwave studio [36] ในการจำลองและสังเกตคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆ ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ และได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบพร้อมทั้งเปรียบเทียบผลจำลองและผลทดสอบ สำหรับหัวข้อย่อปลาดับถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์การศึกษา ขอบเขตการวิจัยและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น

บทที่ 3 กล่าวถึงการขยายช่วงกว้างความถี่ด้วยการป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าสำหรับอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ

บทที่ 4 กล่าวถึงการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมโดยการตัดขอบสองด้านสำหรับอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟต้นแบบ

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

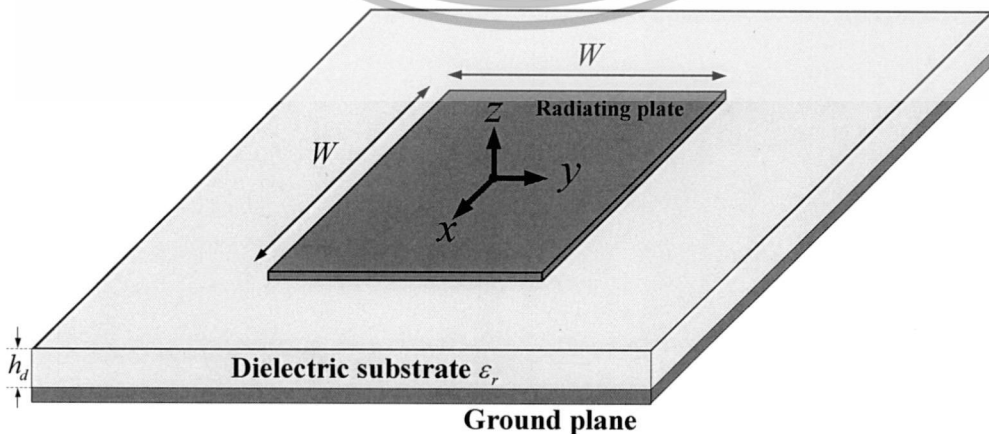
สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น

2.1 เกริ่นนำ

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและการคำนวณแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นและป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล (Coaxial probe) โดยสายอากาศที่ได้นำเสนอจะถูกออกแบบให้ทำงานบนโหมด TM_{01} และมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง (Vertical polarization) พร้อมด้วยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นได้ศึกษาถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าหลักๆ คือ $|S_{11}|$ การโพลาไรซ์ อัตราส่วนแกน (Axial ratio) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) โดยสายอากาศโครงสร้างดังกล่าวถูกออกแบบที่ความถี่กลางคือ 910 MHz เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟในลำดับต่อไป

2.2 สายอากาศแผ่นพิมพ์

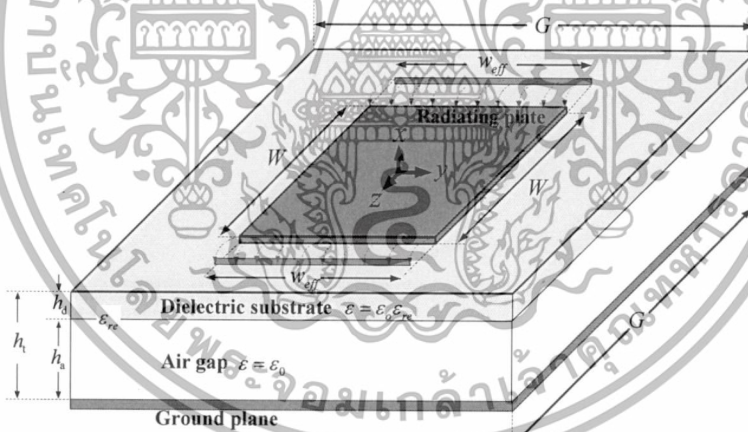
ปัจจุบันสายอากาศแผ่นพิมพ์ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายแก่นักวิจัยและนักพัฒนาเป็นอย่างมาก เนื่องจากสายอากาศประเภทนี้มีโครงสร้างแบนเรียบ น้ำหนักเบา วัสดุที่ใช้ผลิตมีราคาถูกและที่สำคัญสามารถนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์รวมเข้ากับสายอากาศได้เป็นอย่างดี [37] สำหรับสายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างพื้นฐานหรือสายอากาศแผ่นพิมพ์ชั้นเดียว ประกอบด้วยแผ่นตัวนำจำนวนสองแผ่นวางขนานกันโดยมีวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (Dielectric substrate) คั่นกลางระหว่างแผ่นตัวนำด้านบนกับแผ่นตัวนำด้านล่าง ในส่วนแผ่นตัวนำด้านบนจะมีขนาดที่เล็กกว่าแผ่นตัวนำอีกด้านซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกระจายคลื่น (Radiating plate) สำหรับแผ่นตัวนำที่มีขนาดใหญ่กว่าเรียกว่าระนาบกราวด์ (Ground plane) ดังรูปที่ 2.1



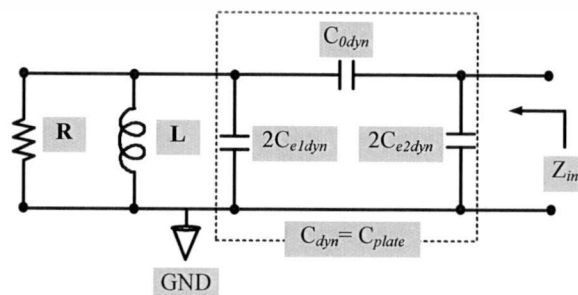
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.1: สายอากาศโครงสร้างพื้นฐาน [7-9] อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น

สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกับโครงสร้างสายอากาศแผ่นพิมพ์ชั้นเดียว เพียงแต่โครงสร้างสายอากาศในหัวข้อนี้นี้ถูกแทรกด้วยช่องว่างอากาศ (Air gap) ซึ่งอยู่ระหว่างวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกและระนาบกราวด์ ดังรูปที่ 2.2 (ก) นอกจากนี้ยังสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.2 (ข) วงจรสมมูลสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น [38-40] ถูกประกอบด้วย ตัวต้าน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ (RLC_{plate}) วางแบบขนานกัน ในส่วนของตัวเก็บประจุ (C_{plate}) หรือค่าความจุไฟฟ้าพลวัตรวม (Total dynamic capacitance: C_{dyn}) จะถูกประกอบไปด้วย ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากประสิทธิผลความยาว (C_{e1dyn}) และประสิทธิผลความกว้าง (C_{e2dyn}) บนสนามฟริงกิ้ง (Fringing Field) ที่เกิดขึ้นบนแผ่นแพร่กระจายคลื่น ในส่วนของค่าความจุไฟฟ้าพลวัต (Dynamic capacitance : C_{0dyn}) เกิดขึ้นมาจากช่องว่างอากาศโดยมีความสูงเท่ากับ h_a ข้อดีของสายอากาศโครงสร้างนี้สามารถขยายช่วงความกว้าง $|S_{11}|$ และเพิ่มอัตราขยายสายอากาศได้ดีกว่าโครงสร้างสายอากาศชั้นเดียว เมื่อความสูงช่องว่างอากาศ (h_a) เพิ่มขึ้นจะทำให้ช่วงกว้างแถบความถี่กว้างขึ้นเช่นกัน แต่ค่าความจุไฟฟ้าพลวัต (C_{0dyn}) ลดลง และพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของวัสดุฐานรอง (ϵ_{eff}) เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้าพลวัต (C_{0dyn}) เพิ่มขึ้นตามเช่นกัน



(ก) โครงสร้างสายอากาศ



(ข) วงจรสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารร่างที่ 2.2 สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น ไม่ใช่ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 แผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น

การออกแบบแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมบนโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น สามารถคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ (f_{mn}) หน่วย GHz บนโหมดต่างๆ ได้จากสมการที่ 2.1 [6, 38-40]

$$f_r = f_{mn} = \frac{C_o}{2\sqrt{\epsilon_{reff}}} \left[\left(\frac{m}{l_{eff}} \right)^2 + \left(\frac{n}{w_{eff}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

สำหรับโหมด TM_{01} หาได้จากสมการที่ 2.2

$$f_{01} = \frac{15}{w_{eff} \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.2)$$

C_o คือความเร็วแสงในช่องว่างอิสระ (300×10^6 m/s) ในส่วนของ m และ n คือตัวเลขที่ใช้อ้างอิงในโหมดต่างๆ ของ TM สำหรับ ϵ_{reff} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของวัสดุฐานรอง โดยมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant: ϵ_r) โดยมีความยาวและความกว้างประสิทธิผลของแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส คือ l_{eff} และ w_{eff}

$$\epsilon_{reff} = \frac{4(\epsilon_{re} \epsilon_{rdyn})}{(\sqrt{\epsilon_{re}} + \sqrt{\epsilon_{rdyn}})^2} \quad (2.3)$$

ϵ_{re} คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสมมูล และ ϵ_{rdyn} คือผลรวมค่าคงที่ไดอิเล็กตริกพลวัต สามารถหาได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r (1 + h_a / h_d)}{1 + \epsilon_r (h_a / h_d)} \quad (2.4)$$

$$\epsilon_{rdyn} = \frac{C_{dyn} (\epsilon = \epsilon_{re} \epsilon_o)}{C_{dyn} (\epsilon = \epsilon_o)} \quad (2.5)$$

h_a และ h_d คือ ความสูงของช่องว่างอากาศและความสูงของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก สำหรับ $C_{dyn} (\epsilon = \epsilon_{re} \epsilon_o)$ คือ ค่าความจุไฟฟ้าพลวัตบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกและอากาศ และ $C_{dyn} (\epsilon = \epsilon_o)$ คือ ค่าความจุไฟฟ้าพลวัตในอากาศ โดยที่ ϵ_o เท่ากับ 1 นอกจากนี้ค่าความจุไฟฟ้ารวม (C_{dyn}) หาได้จากสมการที่ 2.6

$$C_{dyn} = C_{0dyn} + 2C_{e1dyn} + 2C_{e2dyn} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ C_{0dyn} คือ ค่าความจุไฟฟ้าพลวัตที่เกิดขึ้นจากช่องว่างอากาศสามารถหาได้จากสมการที่ 2.7 สำหรับ C_{e1dyn} คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากความยาวประสิทธิผลและ C_{e2dyn} คือค่าสัมประสิทธิ์ความจุที่เกิดจากความกว้างประสิทธิผลบนสนามเกี่ยวคล้อง โดยที่ความกว้างและความยาวของแผ่นแพร่กระจายคลื่นเท่ากัน ($L=W$)

$$C_{0dyn} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{reff} 2W}{h_i \gamma \delta} \quad (2.7)$$

h_i คือผลรวมความสูงของ h_a และ h_d และมีเงื่อนไขดังสมการที่ 2.8 สำหรับโครงสร้างและแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ได้นำเสนอออกแบบให้ทำงานบนโหมด TM_{01} (γ เท่ากับ 1 และ δ เท่ากับ 2)

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \text{for } m=0 \\ 2, & \text{for } m \neq 0 \end{cases} \quad \text{and} \quad \delta = \begin{cases} 1, & \text{for } n=0 \\ 2, & \text{for } n \neq 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

ดังนั้นจะได้ค่าความจุไฟฟ้าพลวัตจากสมการที่ 2.7 กลายเป็นสมการที่ 2.9

$$C_{0dyn} = C_{plate} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{reff} W}{h_i} \quad (2.9)$$

นอกจากนี้ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากความยาวและความกว้างประสิทธิผล (C_{e1dyn} และ C_{e2dyn}) ที่เกิดขึ้นบนแผ่นแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถหาได้จากสมการที่ 2.10

$$C_{e1dyn} = C_{e2dyn} = C_{e,plate} = \frac{W}{2} \left[\frac{377}{C_o R_{ant}^2} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_{reff} W}{h_i} \right] \quad (2.10)$$

ความกว้างประสิทธิผลของแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสหาได้จากสมการที่ 2.11

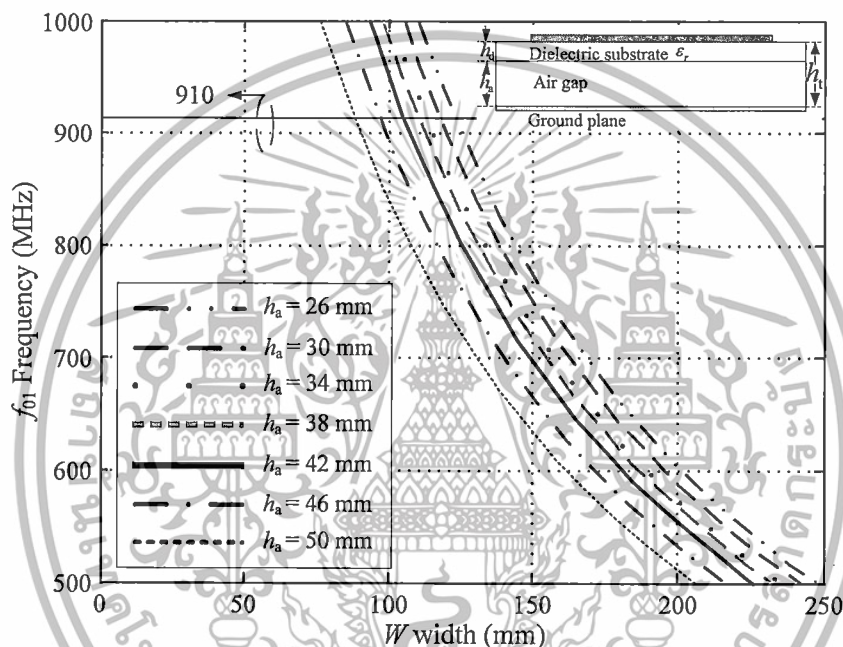
$$w_{eff} = W + 0.5 \left(\frac{\epsilon_{reff}(W) + 0.3}{\epsilon_{reff}(W) - 0.258} \right) \left(\frac{120\pi h_i}{R_{ant} \sqrt{\epsilon_{reff}(W)}} - W \right) \quad (2.11)$$

อิมพีแดนซ์สายอากาศ (R_{ant}) ของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ได้นำเสนอหาได้จากสมการที่ 2.12

$$R_{ant} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon_{reff}(W)}} \left[\frac{W}{h_i} + 1.393 + 0.667 \left(\ln \left(\frac{W}{h_i} + 1.444 \right) \right) \right]^{-1} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.1 ถึง 2.12 ที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้และถูกนำมาคำนวณหาขนาดความกว้าง (W) ของแผ่นแพรกระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีความสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ (f_{01}) บนโหมด TM_{01} นอกจากนี้ยังได้กำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) และความสูงของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (h_d) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์วัสดุฐานไดอิเล็กตริกของแผ่นพิมพ์ที่ถูกนำมาใช้ออกแบบสายอากาศต้นแบบโดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและความสูงเท่ากับ 3.78 เท่ากับ 1.6 mm ตามลำดับ สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ได้นำเสนอมีช่องว่างอากาศเป็นตัวแปรสำคัญและมีผลกระทบต่อคุณลักษณะทางไฟฟ้ามากที่สุดเช่นกันดังนั้นในบทนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบเมื่อช่องว่างอากาศถูกปรับเปลี่ยนความสูง (h_a) โดยได้เพิ่มความสูงให้กับช่องว่างอากาศตั้งแต่ 26 mm ถึง 50 mm



รูปที่ 2.3 ผลจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแผ่นแพรกระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (W) กับความถี่เรโซแนนซ์ (f_{01}) ของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น

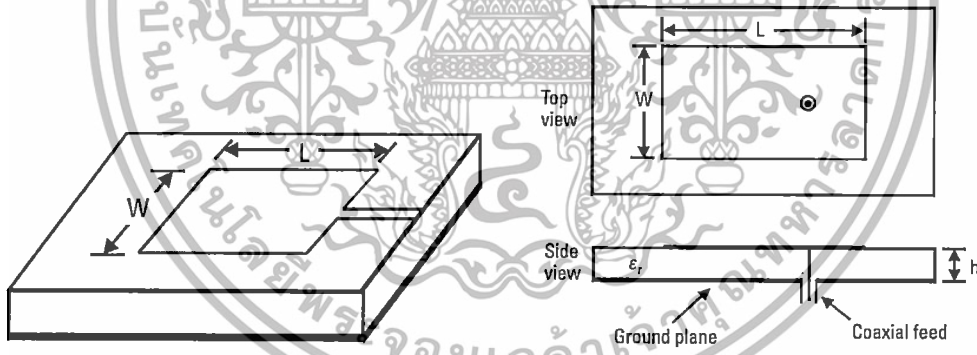
จากรูปที่ 2.3 คือผลจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแผ่นแพรกระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (W) กับความถี่เรโซแนนซ์ (f_{01}) บนโหมด TM_{01} และได้ปรับเปลี่ยนความสูงของช่องว่างอากาศ (h_a) ตั้งแต่ 26 mm ถึง 50 mm พบว่าเมื่อความสูงช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ขนาดความกว้างของแผ่นแพรกระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเล็กลง สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจเฉพาะความถี่กลาง 910 MHz ซึ่งเป็นความถี่กลางของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz) และพบว่าความสูงของช่องว่างอากาศเท่ากับ 26 30 34 38 42 46 และ 50 mm มีขนาดความกว้าง ของแผ่นแพรกระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดเท่ากับ 123.5 118.7 114.1 108.4 104.5 98.8 และ 85.1 mm ตามลำดับ

ในหัวข้อย่อยถัดไปจะกล่าวถึงการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นเพื่อสามารถวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศด้วยการจำลองโดยโปรแกรม Computer Simulation Technology (CST) microwave studio ในลำดับถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

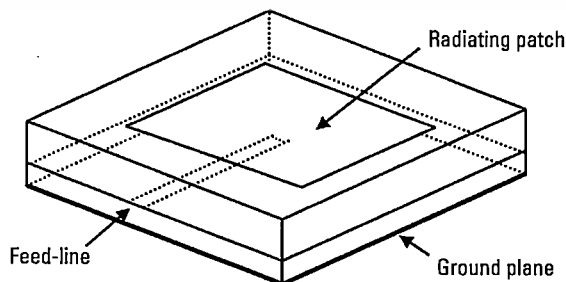
2.2.3 การป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล

การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศมีหลากหลายเทคนิควิธี สำหรับวิธีที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายอาทิเช่น การป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip line) การป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล (Coaxial probe) และการป้อนสัญญาณด้วยการเชื่อมร่วมช่องเปิด (Aperture coupling) แสดงดังรูปที่ 2.4 วิธีป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริปมีข้อดีคือสามารถปรับแอมป์ได้ง่าย แต่ก็มีข้อเสียคือสายนำสัญญาณมีการแพร่กระจายกำลังงานออกมารอบกวนแผ่นแพร่กระจายคลื่นและจะมากขึ้นเมื่อความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับวิธีป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลมีข้อดีคือสามารถปรับแอมป์ได้ง่ายและมีการแพร่กระจายกำลังงานออกจากตัวโพรบต่ำกว่าการป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริป แต่มีข้อเสียคือมีช่วงกว้างความถี่แคบ (Narrowband) จากเทคนิควิธีการป้อนสัญญาณทั้ง 2 ลักษณะที่ได้กล่าวมาจะทำให้เกิดโหมดลำดับสูง (Higher mode) และฮาร์โมนิก (Harmonic) และยังส่งผลทำให้สายอากาศมีระดับกำลังของโพลาริเซชันสูงเช่นกัน และสุดท้ายเทคนิควิธีการป้อนสัญญาณด้วยการเชื่อมต่อร่วมช่องเปิดเป็นเทคนิควิธีที่ออกแบบและสร้างยากมากที่สุด แต่มีข้อดีคือมีช่วงกว้างความถี่กว้าง (Wideband) โดยเทคนิควิธีนี้สามารถใช้งานร่วมกับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างพิมพ์สองชั้นได้อีกด้วย แต่สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อาศัยการป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลซึ่งง่ายต่อการสร้าง ง่ายต่อการปรับแอมป์และมีการแพร่กระจายกำลังงานออกจากตัวโพรบต่ำ



(ก) สายนำสัญญาณไมโครสตริป

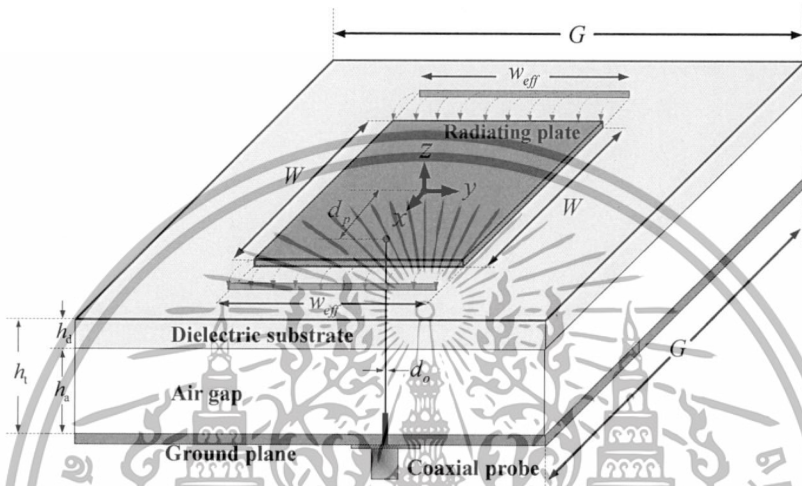
(ข) โพรบโคแอกเซียล



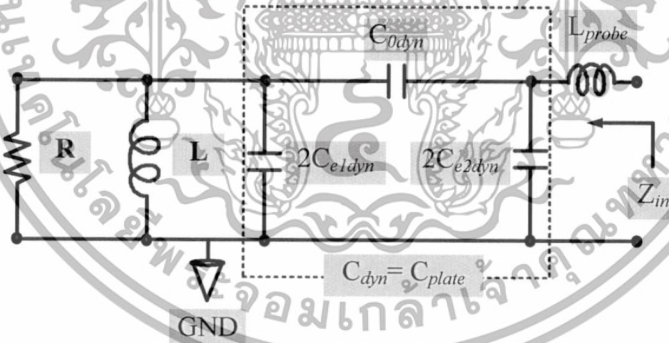
(ค) การเชื่อมต่อร่วมช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดใดๆ กรุณาแจ้งให้ทราบไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลให้กับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นในบทรูปนี้ถูกป้อนสัญญาณบนโหมด TM_{01} โดยตำแหน่งป้อนสัญญาณถูกวางตามแนวแกนตั้งของตัวสายอากาศหรือตามแนวแกน z ดังรูปที่ 2.5 (ก) การป้อนสัญญาณตามแนวแกนดังกล่าวจะทำให้สายอากาศมีลักษณะการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง (Vertical polarization) สำหรับใน ส่วนรูปที่ 2.5 (ข) คือวงจรสมมูลเมื่อสายอากาศที่ได้นำเสนอถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล โดยการป้อนสัญญาณดังกล่าวเปรียบเสมือนตัวเหนี่ยวนำเข้าไปต่ออนุกรมกับวงจรสมมูลสายอากาศ [38-40] และสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของโพรบโคแอกเซียลได้จากสมการที่ 2.13



(ก) โครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล



(ข) วงจรสมมูลของโครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล

รูปที่ 2.5 สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล

$$Z_m(TM_{01}) = \frac{R}{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_{01}} - \frac{f_{01}}{f} \right)^2} + j \left[X_i - \frac{RQ \left(\frac{f}{f_{01}} - \frac{f_{01}}{f} \right)}{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_{01}} - \frac{f_{01}}{f} \right)^2} \right] \quad (2.13)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ (R) และค่ารีแอคแตนซ์ (X_i) หาได้จากสมการที่ 2.14 และ 2.15 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{Q_i h_t}{\pi f_{01} \epsilon_{dyn} \epsilon_0 2W} \cos^2 \left(\frac{\pi d_p}{W} \right) \quad (2.14)$$

$$X_i = -\mu_0 f_r h_t \left[\ln \left(\frac{\pi d_0 f_{01} \sqrt{\epsilon_{dyn}}}{2C_0} \right) + 0.577 \right] \quad (2.15)$$

โดยที่ d_0 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดนำไฟฟ้าซึ่งถูกต่อเข้าระหว่างแผ่นแพร่กระจายและโพรบิคแอคเซียล สำหรับ d_p คือ ระยะตำแหน่งจากจุดศูนย์กลางของแผ่นแพร่กระจายคลื่นถึงจุดบ่อนสัญญาณ และตัวประกอบเชิงคุณภาพทั้งหมดหาได้จากสมการที่ 2.16 ถึง 2.19 และตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางการแพร่กระจายคลื่น (Q_i) ได้จากสมการที่ 2.16

$$Q_i = Q_{rad} + Q_c + Q_d + Q_{sv} \quad (2.16)$$

ตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียความการนำไฟฟ้า (Q_{rad}) หาได้จากสมการที่ 2.17

$$Q_{rad} = \frac{2\omega \epsilon_r}{h_t \left(G_i/W \right)} (K) \quad (2.17)$$

เมื่อ G_i/W คือผลรวมค่าการนำไฟฟ้าทั้งหมดต่อความกว้างของแผ่นแพร่กระจายคลื่น และ K เท่ากับ $W/4$ นอกจากนี้ตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางการนำไฟฟ้า (Q_c) หาได้จากสมการที่ 2.18

$$Q_c = h_t \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (2.18)$$

μ คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า σ คือ ค่านำไฟฟ้าสัมพัทธ์ระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นและระนาบกราวด์ ตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (Q_d) หาได้จากสมการที่ 2.19

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.19)$$

$\tan \delta$ คือ ค่าสูญเสียจากวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก และตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางคลื่นพื้นผิว (Q_{sw}) สำหรับวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่มีความบาง จะมีค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางคลื่นพื้นผิวน้อย โดยมีเงื่อนไข ($h_d \ll \lambda$) และ Q_i มีความสัมพันธ์กับช่วงกว้างแถบความถี่ (Bandwidth: BW) หาได้จากสมการที่ 2.20

$$BW = \frac{SWR - 1}{Q_i \sqrt{SWR}} \quad (2.20)$$

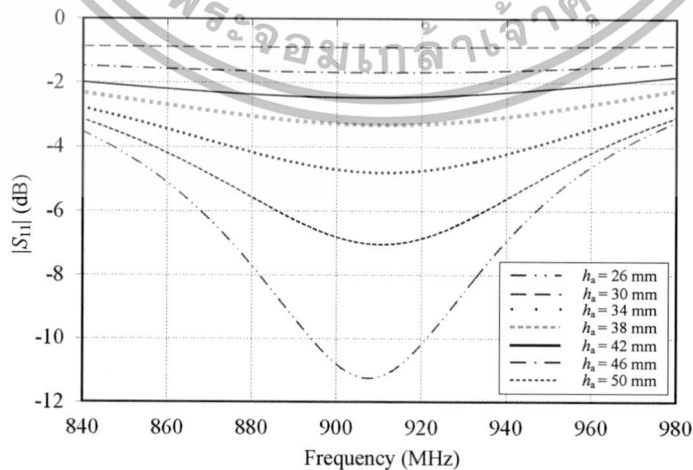
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ SWR คือค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing wave ratio) ซึ่งอยู่ในเทอมการสะท้อนกลับของกำลังงานของสายอากาศ ดังนั้นค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพทั้งหมด (Q) ต่ำจะส่งผลต่อการช่วงกว้างแถบความถี่กว้าง (Wideband) และในทางตรงกันข้ามเมื่อค่า Q สูง จะทำให้สายอากาศดังกล่าวมีช่วงกว้างแถบความถี่แคบ (Narrow band)

สำหรับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่มีแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยกำหนดให้มีขนาดระนาบกราวด์ (G) เท่ากับ 150 mm การจำลองและวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้า $|S_{11}|$ ได้ใช้ขนาดมิติความกว้างของแผ่นแพร่กระจายคลื่น (W) ที่หาได้จากหัวข้อที่ 2.2.2 และแสดงดังตารางที่ 2.1 นอกจากนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องว่างอากาศ (h_a) ตั้งแต่ 26 ถึง 50 mm



รูปที่ 2.6 สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นพร้อมป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลที่ได้นำเสนอในบทที่ 2



รูปที่ 2.7 ผลจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นและป้อน

สัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลโดยปรับเปลี่ยนความสูงช่องว่างอากาศตั้งแต่ 26 ถึง 50 mm เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาซึ่งมีขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ความกว้างของแผ่นแพร่กระจายคลื่น (W) และระยะตำแหน่งป้อนสัญญาณ (d_p) เมื่อความสูงช่องว่างอากาศ (h_a) ถูกปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 26 mm ถึง 50 mm

ความสูงช่องว่างอากาศ (h_a) (mm)	ความกว้าง (W) ของแผ่นแพร่กระจายคลื่น (mm)	ระยะตำแหน่งจุดป้อนสัญญาณ (d_p) (mm)
26	123.5	48
30	118.7	48
34	114.1	48
38	108.4	48
42	104.5	48
46	98.8	48
50	85.1	40

จากตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.7 เป็นผลจำลองค่า $|S_{11}|$ โดยปรับเปลี่ยนความสูงช่องว่างอากาศ (h_a) ของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นพร้อมป้อนสัญญาณโพรบโคแอกเซียล พบว่าความสูงช่องว่างอากาศตั้งแต่ 30 ถึง 50 mm สายอากาศเกิดการอิมพีแดนซ์มิสมัทซ์ (Mismatch impedance) ยกเว้นความสูงช่องว่างอากาศเท่า 26 mm โดย $|S_{11}|$ มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 910 MHz และมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เพียง 2.97% โดยครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 894 ถึง 921 MHz (2.97%) จากการสังเกตพบว่า เมื่อความสูงของช่องว่างอากาศต่ำกว่า 26 mm พบว่าสายอากาศเกิดการแมตซิ่งที่ดีขึ้นแต่ช่วงกว้างแถบความถี่แคบลงเช่นเดียวกัน จากปัญหาการมิสมัทซ์เมื่อความสูงช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยพลัดไป

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโครงสร้างต่างๆ สายอากาศแผ่นพิมพ์ เมื่อถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล

สายอากาศโครงสร้าง	ช่วงกว้างแถบความถี่ $ S_{11} $	อัตราขยายสายอากาศ (dBi)	คุณสมบัติทางกายภาพ
แผ่นพิมพ์ชั้นเดียว [7-9]	1-2%	< 4	ขนาดเล็กและเบา
ช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น [10-13]	2-5%	< 9	ขนาดพอเหมาะ และเคลื่อนย้ายง่าย
ซ้อนกันหลายชั้น [6, 9, 14-15]	> 10%	> 9	ขนาดใหญ่และออกแบบยาก

จากตารางที่ 2.2 เป็นการเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโครงสร้างต่างๆ สายอากาศแผ่นพิมพ์ เมื่อถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล [6-15] พบว่าสายอากาศโครงสร้างแผ่นพิมพ์ชั้นเดียวมีช่วงกว้างแถบความถี่ $|S_{11}|$ เพียง 1-2% มีอัตราขยายน้อยกว่า 4 dBi แต่เมื่อแทรกช่องว่างอากาศ หรือสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น พบว่าสามารถเพิ่มช่วงกว้างแถบความถี่ $|S_{11}|$ ได้มากกว่า 0.5-3% และอัตราขยายเพิ่มมากกว่า 2-3 dBi และสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นถูกเพิ่มแผ่นตัวนำพาราซิติคหรือสายอากาศโครงสร้างซ้อนกันหลายชั้นสามารถเพิ่มช่วงกว้างแถบความถี่ $|S_{11}|$ 4-6% และอัตราขยายเพิ่มขึ้นมากกว่า 3-5 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงลักษณะการแพร่กระจายคลื่น (Radiation) ของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นได้แบ่งออกเป็นสี่หัวข้อย่อยๆ คือ การโพลาไรซ์ (Polarization) อัตราส่วนแกน (Axial ratio: AR) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) และค่าสภาวะเจาะจงทิศทาง (Directivity) เพื่อนำมาพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและออกแบบให้เป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟในลำดับถัดไป

2.3.1 โพลาริเซชันของสายอากาศ

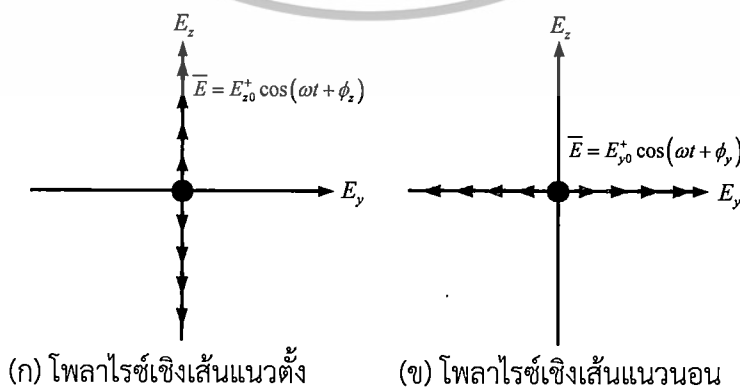
การโพลาไรซ์ของสายอากาศเป็นตัวบ่งชี้ทิศทางและขนาดสัมพัทธ์ของเวกเตอร์บนสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและสามารถสังเกตลักษณะการกวาดของสนามไฟฟ้าจะมองตามหลังคลื่นที่เดินทางออกไป โดยทั่วไปสายอากาศมีการโพลาไรซ์อยู่ 3 ประเภทหลักๆ ด้วยกันคือ การโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear polarization) การโพลาไรซ์วงกลม (Circular polarization) และการโพลาไรซ์วงรี (Elliptical polarization) [8, 43-44] สำหรับการโพลาไรซ์เชิงเส้น คลื่นระนาบจะมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาเป็นฮาร์มอนิกส์ โดยมีสนามไฟฟ้าสององค์ประกอบคือ E_z และ E_y เดินทางในทิศทาง $+x$ สามารถแสดงสนามไฟฟ้าขณะหนึ่งของคลื่นนี้ได้จากสมการที่ 2.21 และ 2.23

$$\vec{E} = \hat{a}_z E_z + \hat{a}_y E_y \tag{2.21}$$

$$\vec{E} = \text{Re} \left[\hat{a}_z E_z e^{j(\omega t - \beta x)} + \hat{a}_y E_y e^{j(\omega t - \beta x)} \right] \tag{2.22}$$

$$\vec{E} = \hat{a}_z E_{z_0}^+ \cos(\omega t - \beta x + \phi_z) + \hat{a}_y E_{y_0}^+ \cos(\omega t - \beta x + \phi_y) \tag{2.23}$$

โดยที่ E_z^+ และ E_y^+ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าในทิศทาง z และ y ในส่วนของ $E_{z_0}^+ e^{j\phi_z}$ และ $E_{y_0}^+ e^{j\phi_y}$ คือ เฟสของสนามไฟฟ้าในทิศทาง z และ y



รูปที่ 2.8 ลักษณะการโพลาไรซ์เชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

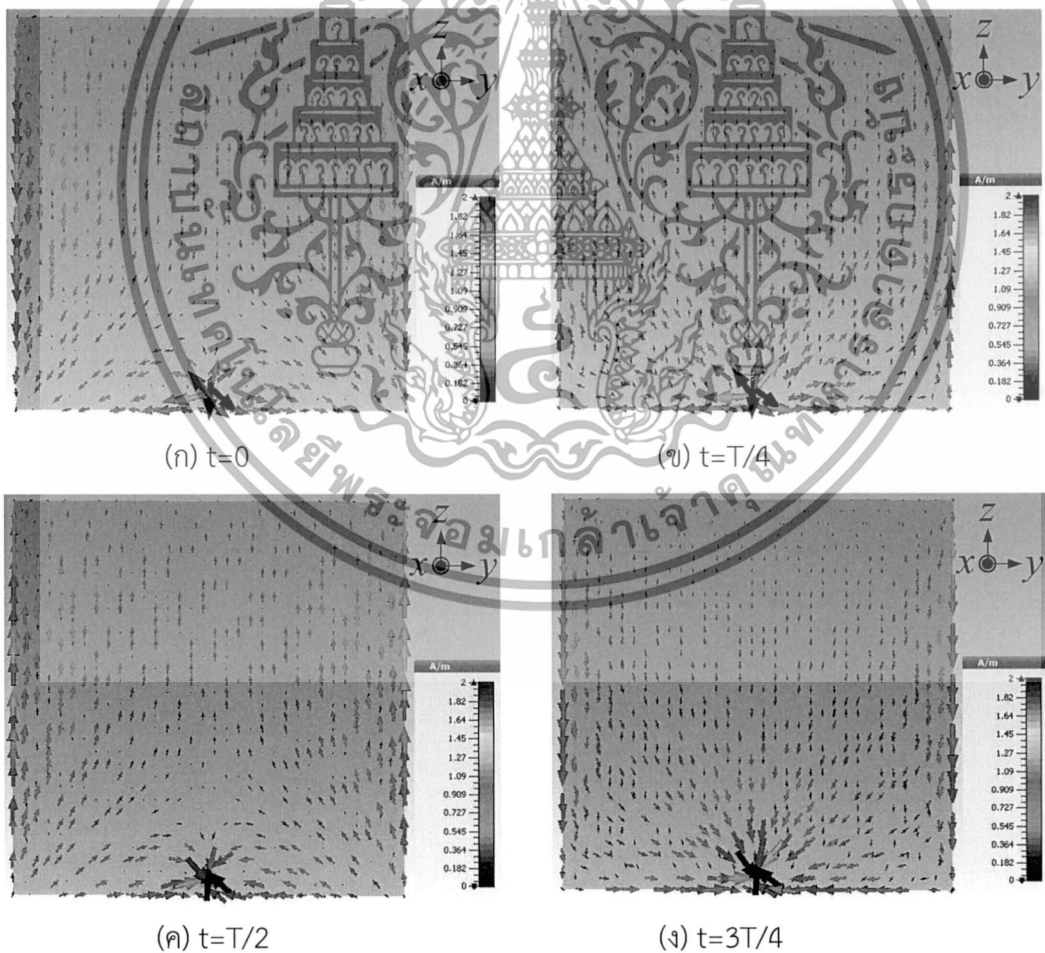
เมื่อทำการพิจารณาสนามที่ตำแหน่ง $x = 0$ และ $E_{y0}^+ = 0$ ในสมการที่ 2.22 จะได้โพลาริซเซชันเส้นแนวตั้งดังสมการที่ 2.24 และ รูปที่ 2.8 (ก)

$$\bar{E} = \hat{a}_z E_{z0}^+ \cos(\omega t + \phi_z) \quad (2.24)$$

และในทางกลับกันเมื่อกำหนดให้ที่ตำแหน่ง $x = 0$ และ $E_{z0}^+ = 0$ ในสมการที่ 2.22 จะได้โพลาริซเซชันเส้นแนวนอนดังสมการที่ 2.25 และรูปที่ 2.8 (ข)

$$\bar{E} = \hat{a}_y E_{y0}^+ \cos(\omega t + \phi_y) \quad (2.25)$$

จากสมการที่ 2.24 และรูปที่ 2.8 (ก) พบว่า มีเฉพาะส่วนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ชี้ในทิศทางแกน z เท่านั้น นั่นแสดงว่ามีโพลาริซเซชันเส้นแนวตั้ง สำหรับสมการที่ 2.25 และรูปที่ 2.8 (ข) เช่นเดียวกันพบเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ชี้ในทิศทางแกน y เท่านั้นจะเกิดการโพลาริซเซชันเส้นแนวนอน (Horizontal polarization)



รูปที่ 2.9 ผลจำลองการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ของสายอากาศโครงสร้างที่ได้นำเสนอและมีความสูงช่องว่างอากาศเท่ากับ 42 mm เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการรักษารights เท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 คือผลจำลองการกระจายกระแสไฟฟ้า โดยมีความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic field intensity: A/m) [44] ในสนามระยะใกล้ (Near field) สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (Current) ที่ไหลบนแผ่นแพรกระจายคลื่น จากการจำลองสายอากาศแผ่นแพรกระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสพร้อมทั้งป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคเซียลซึ่งถูกวางบนตำแหน่งแนวแกนตั้งของตัวสายอากาศ จากผลจำลองที่ความถี่กลาง 910 MHz โดยมีช่วงเวลาที่แตกต่างกันจำนวน 4 คาบเวลา ดังรูปที่ 2.9 (ก) (ข) (ค) และ (ง) พบว่า ณ บริเวณขอบด้านข้างของแผ่นแพรกระจายคลื่นมีกระแสไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 1.27 A/m และกระแสเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0 A/m อยู่ที่บริเวณกลางแผ่นแพรกระจายคลื่น ลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าไหลตามแนวตั้งหรือระนาบแนวแกน z เช่นเดียวกับตำแหน่งการวางตัวของโพรบโคเซียลที่อยู่ระนาบแนวแกน z เช่นกัน จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้มีโพลาริเซชันเชิงเส้นแนวตั้ง

รูปที่ 2.9 (ก) และ(ง) เมื่อเวลา $t=0$ และ $t=3T/4$ พบว่ากระแสไฟฟ้ามีการไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของแผ่นแพรกระจายคลื่น (ตามขอบ) และรูปที่ 2.9 (ข) และ (ค) เมื่อเวลา $t=T/4$ และ $t=T/2$ พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศการไหลจากล่างขึ้นสู่บนของแผ่นแพรกระจายคลื่น

ในส่วนของโพลาริเซชันวงกลมจะถูกอธิบายการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนตัวแผ่นแพรกระจายคลื่นไว้ในบทที่ 4 สำหรับโพลาริเซชันวงกลมเกิดขึ้นมาจากโพลาริเซชันแนวตั้งและแนวนอนตั้งฉากกันซึ่งมีขนาดที่เท่ากันและมีเฟสต่างกัน 90 องศา ดังกรณีการโพลาริเซชันวงกลมหมุนขวา เมื่อกำหนด $E_{z0}^+ = E_{y0}^+$ และ $\phi_z = 90$ องศา แทนลงในสมการที่ 2.24 และ $\phi_y = 0$ องศา แทนเข้าสมการที่ 2.25 จะได้ขนาดสนามไฟฟ้าในทิศทางแกน z แสดงดังสมการที่ 2.26

$$\bar{E}_z = E_{z0}^+ \cos(\omega t + 90) = -E_{z0}^+ \sin(\omega t) \tag{2.26}$$

และจะได้ขนาดสนามไฟฟ้าในทิศทางแกน y

$$\bar{E}_y = E_{y0}^+ \cos(\omega t) \tag{2.27}$$

เมื่อพิจารณาหาขนาดของสนามไฟฟ้าทั้งสอง

$$\bar{E}_{zy} = \sqrt{E_{z0}^{+2} + E_{y0}^{+2}} = \sqrt{E_{y0}^{+2} (\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t)} = E_{y0}^+ \tag{2.28}$$

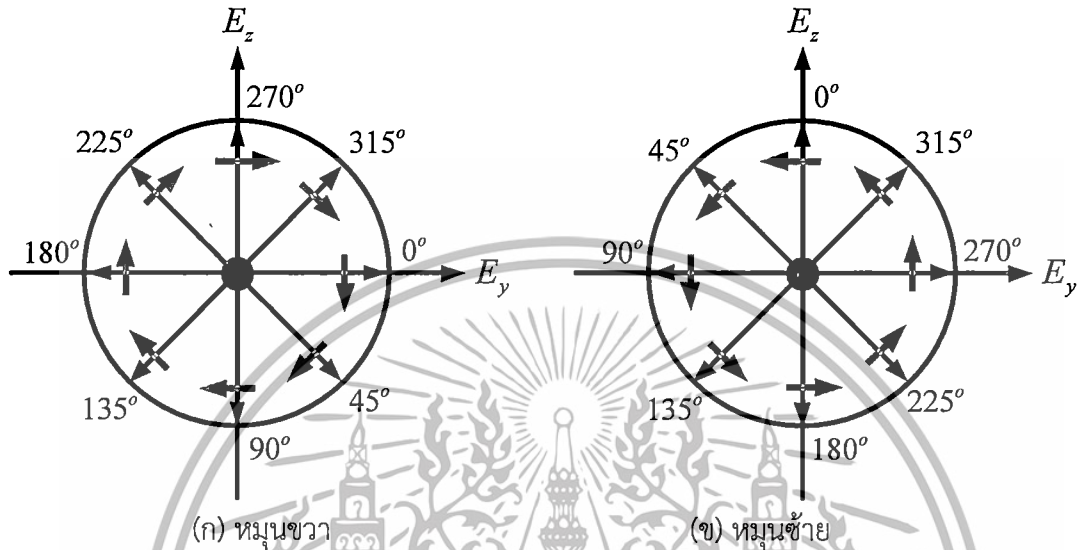
ดังนั้นจะได้สนามไฟฟ้ารวม

$$\bar{E}_{zy} = \text{Re} \left[\hat{a}_z E_{y0}^+ e^{j(\omega t - \beta x + 90^\circ)} + \hat{a}_y E_{y0}^+ e^{j(\omega t - \beta x)} \right] \tag{2.29}$$

จากสมการที่ 2.29 พบว่าเฟสในสนามไฟฟ้าทิศทางแกน z นำหน้าสนามไฟฟ้าทิศทางแกน y อยู่ 90 องศาทำให้เกิดเป็นโพลาริเซชันวงกลมหมุนขวาเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.10 (ก) และในทางกลับกันการเกิดโพลาริเซชันวงกลมหมุนซ้ายถูกกำหนดให้ $\phi_z = -90$ องศา แทนลงในสมการที่ 2.24 และ $\phi_y = 0$ องศา แทนเข้าสมการที่ 2.25 จะได้สนามไฟฟ้ารวม

$$\vec{E}_{zy} = \text{Re} \left[\hat{a}_z E_{zy0}^+ e^{j(\omega t - \beta x - 90^\circ)} + \hat{a}_y E_{zy0}^+ e^{j(\omega t - \beta x)} \right] \quad (2.30)$$

จากสมการที่ 2.30 พบว่าเฟสในสนามไฟฟ้าทิศทางแกน z ตามหลังสนามไฟฟ้าทิศทางแกน y อยู่ 90 องศาจะเกิดการโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้ายดังรูปที่ 2.10 (ข)



รูปที่ 2.10 ลักษณะการโพลาไรซ์วงกลม

2.3.2 อัตราส่วนแกนของสายอากาศ

อัตราส่วนแกน (Axial ratio: AR) คือการบ่งบอกถึงลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศในลักษณะแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น โพลาไรซ์เชิงเส้น หรือโพลาไรซ์วงกลม นอกจากนี้อัตราส่วนแกนยังสามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดและเฟสของสนามไฟฟ้า สำหรับอัตราส่วนตามแกนของโพลาไรซ์สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ 2.31 และสมการที่ 2.32 [43-44]

$$(AR)_{dB} = 10 \log \left[\frac{|E_{co}| + |E_{xp}|}{|E_{co}| - |E_{xp}|} \right]^2 \quad (2.31)$$

หรือ

$$(AR)_{dB} = 20 \log \left[\frac{1 + CPL}{1 - CPL} \right] \quad (2.32)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$CPL = \left| \frac{E_{xp}}{E_{co}} \right| = \left| \frac{1 - Ae^{j\Delta\phi}}{1 + Ae^{j\Delta\phi}} \right| \quad (2.33)$$

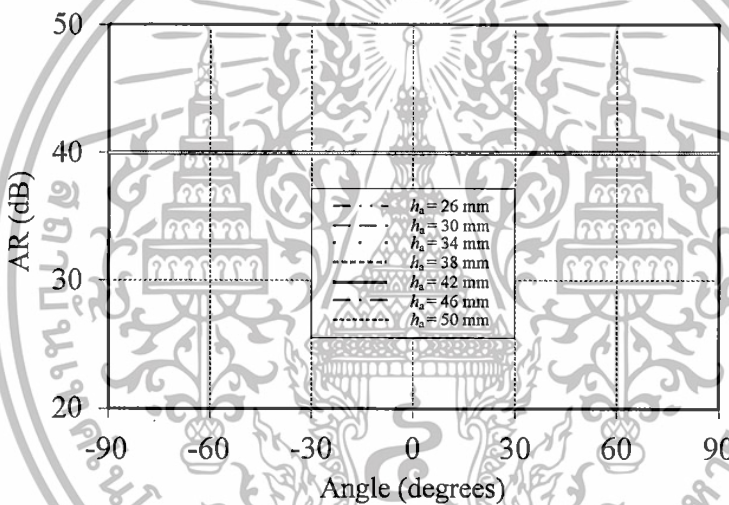
เมื่อ

$$E_{co} = (1 + Ae^{j\Delta\phi}) / \sqrt{2} \quad (2.34)$$

และ

$$E_{xp} = (1 - Ae^{j\Delta\phi}) / \sqrt{2} \quad (2.35)$$

โดยที่ A หรือ E_{xp0}^+ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้า $e^{j\Delta\phi}$ หรือ $e^{j(\omega t - \beta z)}$ คือ เฟสของสนามไฟฟ้า



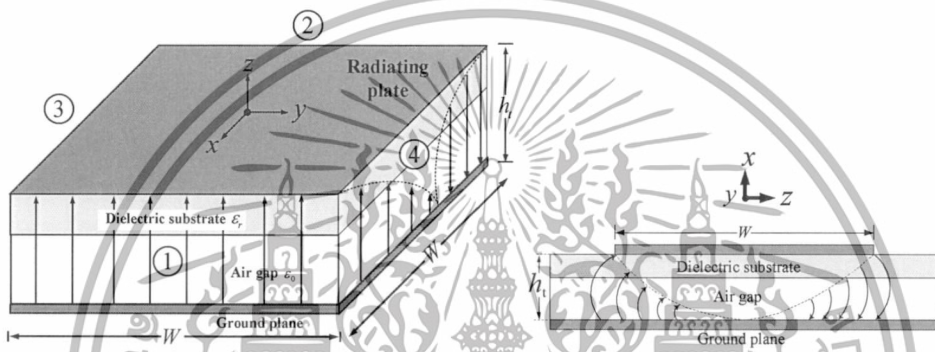
รูปที่ 2.11 ผลจำลองอัตราส่วนแกลนเมื่อความสูงช่องว่างอากาศ (h_a) สูงตั้งแต่ 26 mm ถึง 50 mm

รูปที่ 2.11 คือผลจำลองอัตราส่วนแกลนของโครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอในบทนี้และได้ปรับเปลี่ยนความสูงช่องว่างอากาศตั้งแต่ 26 ถึง 50 mm พบว่าที่ด้านหน้าของสายอากาศมีค่าอัตราส่วนแกลนเท่ากับ 40 dB ตลอดทุกมุมตั้งแต่ -90 ถึง 90 องศา บนระนาบ xz (ระนาบสนามไฟฟ้า) โดยการเปลี่ยนแปลงความสูงช่องว่างอากาศ พบว่าไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนแกลนของสายอากาศที่ได้นำ

2.3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ได้นำเสนอนี้ ได้ถูกออกแบบให้ทำงานบนโหมด TM_{01} โดยสายอากาศดังกล่าวถูกประกอบไปด้วยช่องเปิดจำนวน 4 ช่อง โดยช่องเปิดที่ 1 และ 2 (แนวแกน x) ดังรูปที่ 2.12 (ก) พบว่ามีความหนาแน่นไม่เท่ากันในทุกทิศทาง อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกระแสแม่เหล็กและมีทิศทางการไหลจากระนาบกราวด์ไปยังตัวแผ่นแพร่กระจายคลื่น นอกจากนี้ยังมีความแรงตลอดตามแนวความกว้างของสายอากาศ สำหรับช่องเปิดที่ 2 มีความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กตลอดตามแนวความกว้างสายอากาศเช่นกัน แต่ในทางกลับกันจะมีทิศทาง การไหลของกระแสแม่เหล็กจะไหลจากแผ่นแพร่กระจายคลื่นไปยังระนาบกราวด์ และเมื่อ พิจารณาแกน y ซึ่งประกอบไปด้วยช่องเปิดที่ 3 และช่องเปิดที่ 4 ในส่วนนี้จะไม่มีการแพร่กระจาย คลื่นออกมา เนื่องจากการไหลของกระแสแม่เหล็กนั้นมีลักษณะทิศทางไหลตรงข้ามกันจึงทำให้ เกิดการหักล้างกันเกิดขึ้นในแต่ละช่อง ความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กแรงที่สุดตรงส่วนแนวขอบ ทั้งสองด้านของช่องเปิดทั้งสอง ส่วนตำแหน่งตรงกลางจะมีความหนาแน่นของกระแสเท่ากับศูนย์ ดัง รูปที่ 2.12 (ข) สำหรับสนามไฟฟ้าระนาบ θ และ ϕ ที่แพร่กระจายคลื่นเหนือระนาบกราวด์ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.36 และ 2.37 [8]



(ก) การแพร่กระจายคลื่นช่องเปิด 4 ด้าน (ข) การแพร่กระจายคลื่นด้านข้างของช่องเปิดที่ 3 และ 4

รูปที่ 2.12 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 และการแพร่กระจาย คลื่นบนโหมด TM_{01} [8]

$$E_\theta^\circ = \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{kh_1}{2} \cos\theta\right) \\ \frac{kh_1}{2} \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{kW}{2} \sin\theta\right) \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$E_\phi^\circ = \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{kh_1}{2} \sin\phi\right) \\ \frac{kh_1}{2} \sin\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{kW}{2} \sin\phi\right) \\ \frac{kW}{2} \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

สมการความเข้มกำลังงานการแพร่กระจายคลื่นสามารถหาได้จาก 2.38

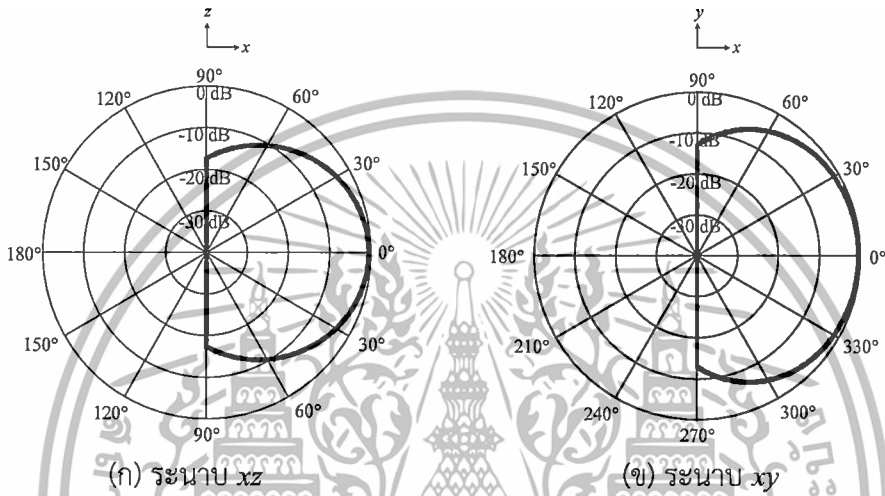
$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} \left[|E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.38)$$

$$= \frac{1}{2\eta} \left[|E_\theta^\circ(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi^\circ(\theta, \phi)|^2 \right]$$

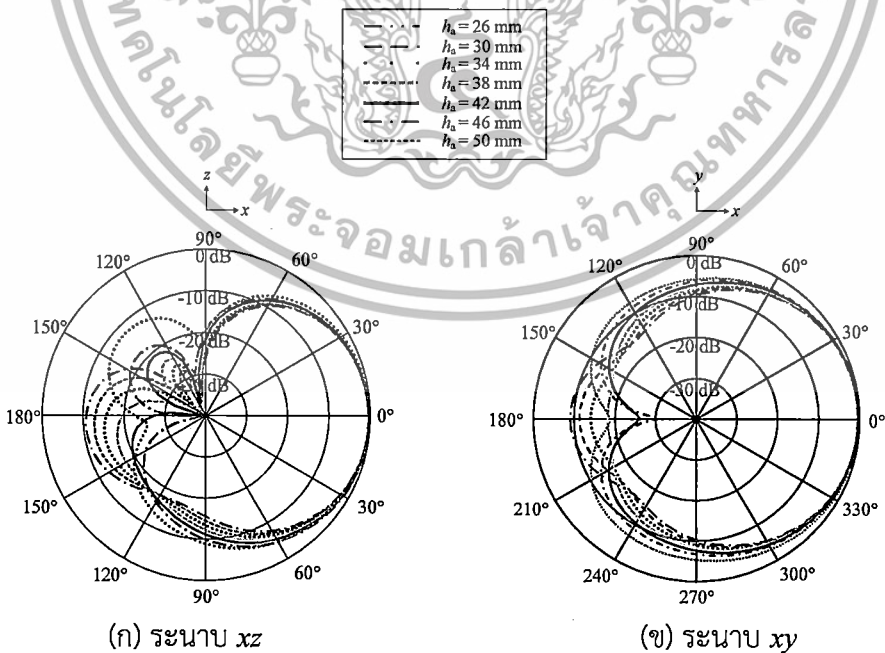
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $E_\theta^\circ(\theta, \phi)$ และ $E_\phi^\circ(\theta, \phi)$ คือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้าบนระนาบ θ และระนาบ ϕ และนำสมการที่ 2.36 และสมการที่ 2.37 แทนลงในสมการที่ 2.38 จะได้สมการความเข้มการแผ่กระจายคลื่นดังสมการที่ 2.39

$$U(\theta, \phi) = \frac{1}{2\eta} \left[\frac{\sin\left(\frac{kh_t \cos\theta}{2}\right)}{\frac{kh_t \cos\theta}{2}} \cos\left(\frac{kW}{2} \sin\theta\right) \right]^2 + \left[\frac{\sin\left(\frac{kh_t \sin\phi}{2}\right)}{\frac{kh_t \sin\phi}{2}} \frac{\sin\left(\frac{kW}{2} \sin\phi\right)}{\frac{kW}{2} \cos\phi} \right]^2 \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.13 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนโหมด TM_{01} และระนาบกราวด์ขนาดอนันต์



รูปที่ 2.14 ผลจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (TM_{01}) บนระนาบ xz และ xy ที่ความถี่ 910 MHz เมื่อปรับเปลี่ยนความสูงช่องว่างอากาศ 26 30 34 38 42 46 และ 50 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนวิชาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.13 คือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนโหมด TM_{01} จากสมการที่ 2.38 พบว่าความกว้างของลำคลื่น (Beamwidth) บนระนาบ xy (ระนาบสนามแม่เหล็ก) กว้างกว่าระนาบ xz (ระนาบสนามไฟฟ้า) และนอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีการแพร่กระจายคลื่นออกมาด้านหลังของตัวสายอากาศเนื่องจากสมการดังกล่าวถูกกำหนดให้ระนาบกราวนด์มีขนาดเป็นอนันต์ จากรูปที่ 2.14 เป็นผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนช่องว่างอากาศตั้งแต่ 26 mm ถึง 50 mm พบว่าเมื่อความสูงช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นความกว้างของลำคลื่นมีการเพิ่มความกว้างตาม 0.50 องศา ทั้งสองระนาบ สำหรับระนาบ xz รูปที่ 2.14 (ก) พบว่าลำคลื่นย่อยด้านหลัง (Back lobe) เปลี่ยนเป็นลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe) เมื่อช่องว่างอากาศสูงขึ้นตั้งแต่ 38-50 mm และระนาบ xy พบว่ามีการลดระดับกำลังงานของลำคลื่นย่อยด้านหลัง เมื่อความสูงช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 26mm ถึง 50 mm ดังรูปที่ 2.14 (ข)

2.3.4 สภาพเจาะจงทิศทางและอัตราขยายของสายอากาศ

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) เป็นค่าอัตราส่วนของความเข้มกำลังงานการแพร่กระจายคลื่น (U_{max}) มากที่สุดต่อความเข้มกำลังงานการแพร่กระจายคลื่น ($U(\theta, \phi)$) ของสายอากาศไอโซทรอปิก (Isotropic) โดยสายอากาศไอโซทรอปิกนี้มีลักษณะการแพร่กระจายกำลังงานเป็นรูปทรงกลมและมีความเข้มกำลังที่เท่ากันทุกมุมทุกทิศทาง (ถ้าไม่มีการระบุทิศทาง) โดยทั่วไปค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะแสดงในหน่วยของเดซิเบล (dB) ซึ่งสามารถหาได้จากกรแปลงค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ไม่มีหน่วย (Dimensionless) หาได้จากสมการที่ 2.40

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{P_{tot} / (4\pi)} \quad (2.40)$$

โดย P_{tot} คือกำลังงานทั้งหมดในการแพร่กระจายคลื่นออกมา ซึ่งค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีความสัมพันธ์กับอัตราขยายสายอากาศ (antenna gain) ในทิศ θ และ ϕ ดังสมการที่ 2.41

$$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi) \quad (2.41)$$

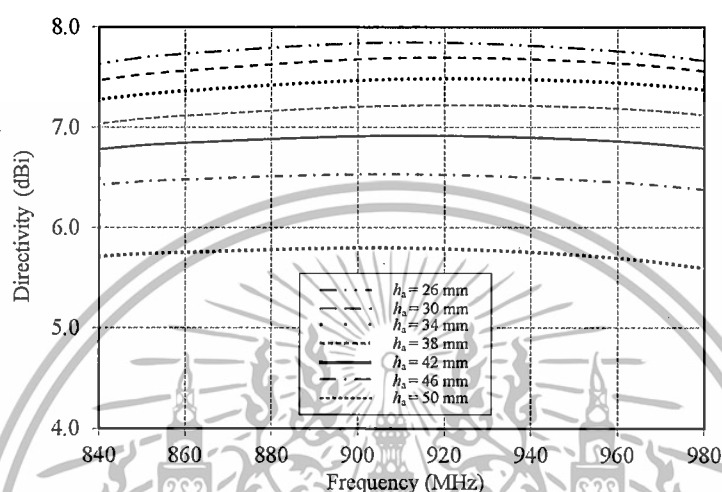
η คือ ค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

$$\eta = e_r e_c e_d \quad (2.42)$$

กรณี η เท่ากับ 1 สายอากาศไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นอัตราขยายจะเท่ากับค่าสภาพเจาะจงทิศทาง สำหรับในกรณี เมื่อ e_r คือประสิทธิภาพการแมตซ์หรือการทดสอบประสิทธิภาพการสะท้อนกลับ e_c และ e_d คือ การสูญเสียจากการนำไฟฟ้าและการสูญเสียจากวัสดุไดอิเล็กตริก

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมากกว่าค่าอัตราขยายสายอากาศ จากการจำลองสายอากาศ โครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกบ่อนด้วยโพรบโคแอคเซียล พบว่าสายอากาศเกิดการเอกลำเป็นเอกลำที่ส่งวนในสายสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ เมื่อผู้ดูแลเห็นใบแจ้งประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีสแน็คและส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการแผ่ตขิ่ง (e_r) ต่ำ ดังนั้นการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสามารถที่จะวิเคราะห์อัตราขยายสายอากาศล่วงหน้าได้อย่างแน่ชัด ผลจากการจำลองพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะลดลงตามความสูงของช่องว่างอากาศ และที่ความสูงของช่องว่างอากาศเท่ากับ 26 mm มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากกว่า 7.5 dBi ตลอดย่านความถี่ 860 ถึง 960 MHz เมื่อช่องว่างอากาศสูงถึง 50 mm จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางน้อยกว่า 6.0 dBi ตลอดย่านความถี่ยูเอชเอฟ



รูปที่ 2.15 ผลจำลองค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่ได้นำเสนอ เมื่อปรับเปลี่ยนความสูงของช่องว่างอากาศตั้งแต่ 26 mm ถึง 50 mm

2.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและการคำนวณแผ่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยออกแบบให้สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นมีลักษณะการแผ่กระจายคลื่นบนโหมด TM_{01} และมีโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งที่ทำงานบนโหมด TM_{01} เช่นกัน โดยป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลตามแนวแกนตั้งของตัวสายอากาศ โครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้มีคุณสมบัติเด่นๆ คือ ง่ายต่อการออกแบบ สะดวกต่อการผลิตและติดตั้งใช้งาน นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาและเคลื่อนย้ายได้สะดวก แต่ในทางกลับกัน จากการจำลองผล พบว่าที่ความสูงช่องว่างอากาศเท่ากับ 26 mm มีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เพียง 2.97% (894 ถึง 921 MHz) ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟได้ ($\geq 11\%$) และที่ความสูงช่องว่างอากาศ (h_a) ตั้งแต่ 30 mm ถึง 50 mm พบว่าสายอากาศโครงสร้างที่ได้นำเสนอนี้เกิดการมีสแน็คอิมพีแดนซ์และส่งผลกระทบต่ออัตราขยายสายอากาศ แต่ยังคงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง มีโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งโดยมีค่าอัตราส่วนเกินเท่ากับ 40 dB ตลอดมุมด้านหน้าของตัวสายอากาศไว้เช่นเดิม สำหรับในส่วนลาคลื่นย่อยด้านหลังของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นบนระนาบ xz มีการเปลี่ยนแปลงเป็นลาคลื่นย่อยด้านข้างแทนเมื่อช่องว่างอากาศสูงขึ้น และระดับกำลังงานของลาคลื่นย่อยหลังมีการลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมีการเพิ่มความสูงช่องว่างบนระนาบ xy สำหรับในส่วนของการมีสแน็คและช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ แคบนั้นสามารถแก้ไขปัญหาก็ได้ในบทถัดไปให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การขยายช่วงกว้างความถี่ด้วยการป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า สำหรับอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ

3.1 เกริ่นนำ

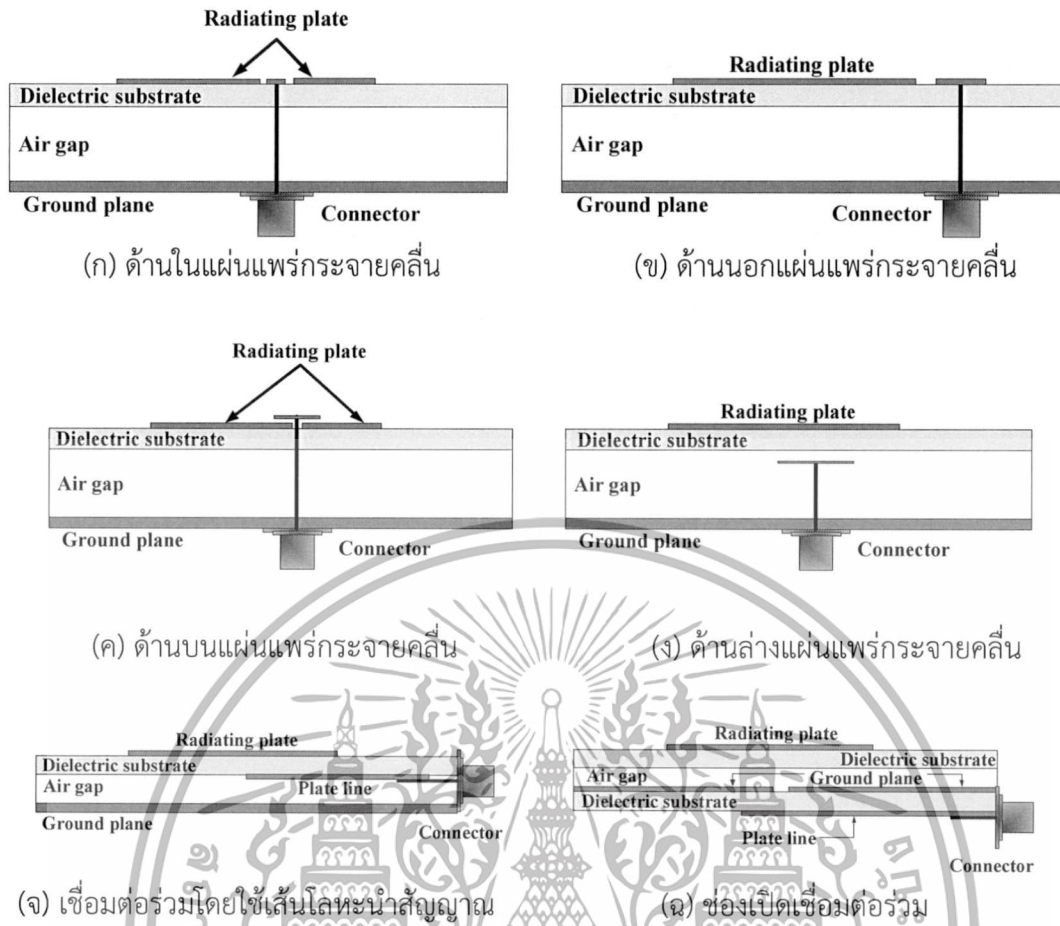
จากบทที่สองพบถึงปัญหาของสายอากาศของโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล เกิดการมีสแมตซ์ทางอิมพีแดนซ์เมื่อมีความสูงของช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 30 mm ถึง 50 mm แต่ความสูงของช่องว่างอากาศเท่ากับ 26 mm จะมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เพียง 2.97% สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิควิธีการป้อนสัญญาณเพื่อทำให้สายอากาศเกิดการแมตซ์และสามารถขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ได้ตามความต้องการของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz) โดยมีหลากหลายเทคนิควิธี อาทิเช่น การป้อนสัญญาณด้วยรูปตัวแอล การป้อนสัญญาณรูปตัวเอฟ การป้อนสัญญาณเชื่อมต่อ (Coupled fed) และการป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำหรับเนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วย เทคนิควิธีการป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า การศึกษาและออกแบบการป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า และบทสรุป

3.2 การป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า

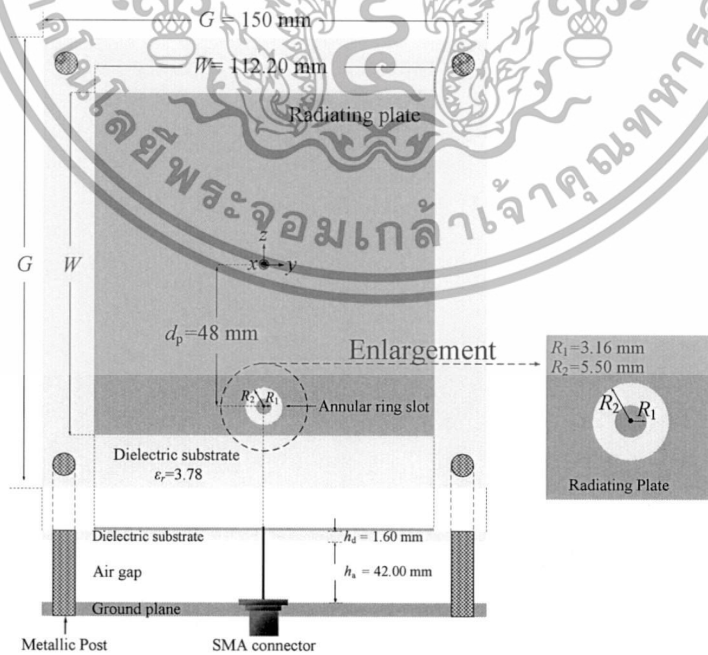
โดยทั่วไปสายอากาศโครงสร้างแผ่นพิมพ์ชั้นเดียวและโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกป้อนสัญญาณด้วยโคแอกเซียล จะมีช่วงกว้างแถบความถี่ $|S_{11}|$ เพียง 1-2% และ 2-5% ตามลำดับ แต่ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟมีความต้องการช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ มากกว่า 11% (860 ถึง 960 MHz) [16-17] ปัญหาจากบทที่ผ่านมาสามารถแก้ไขได้ด้วยเทคนิควิธีปรับแต่งที่โครงสร้างสายอากาศ หรือเทคนิควิธีปรับแต่งที่แผ่นแพร่กระจายคลื่น และยังมีเทคนิควิธีนิยมใช้มากที่สุดคือเทคนิควิธีป้อนสัญญาณ ซึ่งง่ายต่อการออกแบบและสร้างสายอากาศตัวต้นแบบและยังเป็นเทคนิควิธีที่ถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำหรับเทคนิควิธีการป้อนสัญญาณลักษณะต่างๆ สามารถแสดงดังรูปที่ 3.1 การป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าที่ตัวแผ่นแพร่กระจายคลื่นโดยมีช่องว่างกันระหว่างตัวแผ่นแพร่กระจายคลื่นและแผ่นโลหะนำสัญญาณดังรูปที่ 3.1 (ก) การป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าโดยแยกแผ่นตัวนำสัญญาณออกจากแผ่นแพร่กระจายคลื่นแต่บนระนาบเดียวกันดังรูปที่ 3.1 (ข) การป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าโดยแถบโลหะลอยเหนือแผ่นแพร่กระจายคลื่นดังรูปที่ 3.1 (ค) การป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าโดยแถบโลหะอยู่ใต้แผ่นแพร่กระจายคลื่นดังรูปที่ 3.1 (ง) การป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าโดยเส้นโลหะวางตำแหน่งใต้วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกดังรูปที่ 3.1 (ฉ) และการป้อนสัญญาณแบบช่องเปิดเชื่อมต่อ โดยเส้นโลหะนำสัญญาณอยู่ด้านล่างของระนาบกราวนด์และระนาบกราวนด์จะถูกแทรกด้วยร่องว่างรูปทรงที่แตกต่างกันไป (ช่องว่างเปิด) ดังรูปที่ 3.1 (จ)

ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



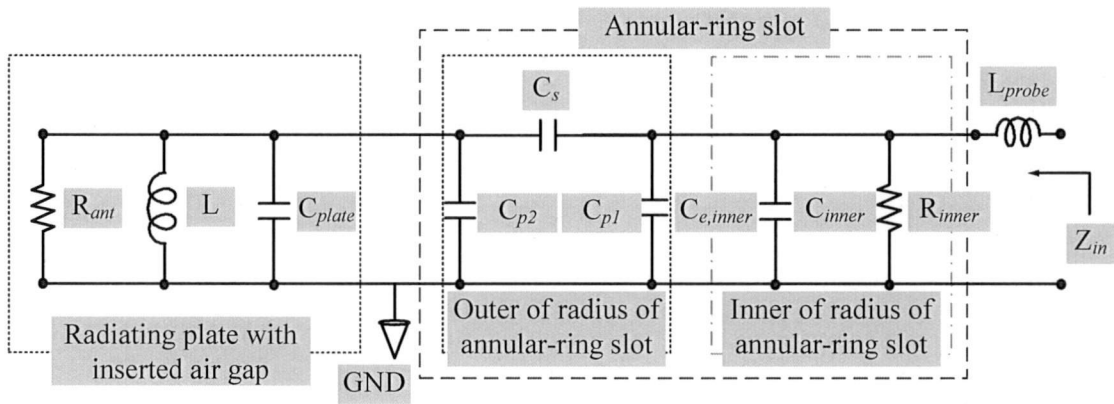
รูปที่ 3.1 การป้อนสัญญาณลักษณะต่างๆ บนสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น



รูปที่ 3.2 สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า

(ร่องว่างวงแหวนกลม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นพร้อมป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า (ร่องว่างวงแหวนกลม)

สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า ด้วยร่องว่างวงแหวนกลม (Annular-ring slot) ที่แทรกลงบนแผ่นแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปที่ 3.1 (ก) และรูปที่ 3.2 ได้ถูกเลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เนื่องจาก มีความมั่นคงและแข็งแรงทางด้านกายภาพมากกว่าการป้อนสัญญาณเหนือแผ่นแพร่กระจายคลื่นและการป้อนสัญญาณด้านล่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นดังรูปที่ 3.1 (ค) และ (ง) สามารถปรับแมตซิงได้ง่ายกว่าการป้อนสัญญาณด้วยเส้นโลหะนำสัญญาณและการป้อนสัญญาณแบบช่องเปิดเชื่อมต่อยุติกันดังรูปที่ 3.1 (จ) และ (ฉ) และสามารถลดพื้นที่โครงสร้างสายอากาศได้เมื่อเทียบกับการป้อนสัญญาณดังรูปที่ 3.1 (ข)

การป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าที่ได้นำเสนอนี้มีลักษณะทางกายภาพเป็นร่องว่างวงแหวนกลม โดยมีรัศมีด้านในเท่ากับ R_1 และมีรัศมีด้านนอกเท่ากับ R_2 สำหรับลักษณะกลไกการทำงานของร่องว่างวงแหวนกลมหรือการป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า เริ่มต้นจากตัวโพรบโคแอกเซียลถูกกระตุ้นสัญญาณและส่งผ่านกำลังงานด้วยเส้นลวดนำไฟฟ้า (Linear electric) เข้าไปยังแผ่นตัวนำวงกลม (R_1) และส่งผ่านกำลังงานไปยังแผ่นแพร่กระจายคลื่นโดยการข้ามร่องว่างวงกลม (R_2) สุดท้ายกำลังงานจะแพร่กระจายคลื่นออกสู่อากาศโดยแผ่นแพร่กระจายคลื่น และนอกจากนี้การป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า (ร่องว่างวงแหวนกลม) ยังช่วยลดค่าตัวเหนี่ยวนำที่เกิดจากโพรบโคแอกเซียลได้อีกด้วย [45-46]

จากรูปที่ 3.3 คือวงจรสมมูลสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นและถูกป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยวงจรสมมูลดังกล่าวจะประกอบไปด้วย วงจรสมมูลร่องว่างวงแหวนวงกลมด้านนอกหรือ R_2 และวงจรสมมูลโลหะวงกลมหรือ R_1 ของร่องว่างวงแหวนกลม ในส่วนของวงจรสมมูล R_1 ประกอบด้วย ค่าความจุไฟฟ้าที่ขอบโลหะกลมด้านนอก ($C_{e,inner}$) ค่าความจุไฟฟ้าของโลหะวงกลม (C_{inner}) และค่าความต้านทานของโลหะวงกลม (R_{inner}) และสำหรับในส่วนของสมมูล R_2 ประกอบด้วย ค่าความจุไฟฟ้าของร่องว่างที่สมมาตรกันจำนวนสองตัว (C_{p1} และ C_{p2}) และความจุไฟฟ้าร่องว่าง (C_s) ตามลำดับ

วงจรสมมูลในแต่ละส่วนจะถูกต่อเรียงแบบคาสเคด และต่ออนุกรมเข้ากับโพรบโคแอกเซียล (L_{probe}) สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าที่ได้นำเสนอ สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้จากสมการที่ 3.1 ถึง 3.13 โดยค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจุไฟฟ้าของโลหะตัวนำวงกลม (C_{inner}) และค่าความจุไฟฟ้าบนขอบโลหะกลมด้านนอก ($C_{e,inner}$) หาได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 [26]

$$C_{inner} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{reff} \pi R_1^2}{h_i} \quad (3.1)$$

$$C_{e,inner} = \frac{R_2}{2} \left[\frac{Z_{air}}{C_o R_{ant}^2} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_{reff} \pi R_1^2}{h_i} \right] \quad (3.2)$$

ค่าความจุไฟฟ้าของร่องว่างวงกลมที่สมมาตร (C_{p1} และ C_{p2}) และค่าความจุไฟฟ้าของร่องว่างวงกลม (C_s) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3-3.5

$$C_{p1} = C_{e,outer} \times \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1 + 1} \quad (3.3)$$

$$C_{p2} = C_{plate} \times \frac{Q_1 + Q_3}{Q_1 + 1} \quad (3.4)$$

$$C_s = \pi f_r \times h_i Q_4 Q_5 \quad (3.5)$$

โดยที่ $Q_i, i \in \{1, \dots, 8\}$ คือ ตัวประกอบแก้ไข (Correction factor) ทั้งหมดหาได้จาก [26, 44]

$$Q_1 = 0.107 \left(\frac{R_1}{h_i} + 9 \right) \left(\frac{R_2}{h_i} \right)^{3.23} + 2.09 \left(\frac{R_2}{h_i} \right)^{1.05} \left[\frac{1.5 + 0.3 \left(\frac{R_1}{h_i} \right)}{1 + 0.6 \left(\frac{R_1}{h_i} \right)} \right] \quad (3.6)$$

$$Q_2 = \exp \left[-0.598 \left(\frac{R_1}{W} \right)^{1.35} \right] - 0.55 + Q_6 \quad (3.7)$$

$$Q_3 = \exp \left[-0.598 \left(\frac{W}{R_1} \right)^{1.35} \right] - 0.55 + Q_7 \quad (3.8)$$

$$Q_4 = \exp \left(-1.86 \times \frac{R_2}{h_i} \right) \times \left[1 + 4.09 \times \left\{ 1 - \exp \left(-0.785 \sqrt{\frac{h_i}{R_1}} \times \frac{W}{R_1} \right) \right\} \right] \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_5 = 0.046 \left\{ 0.03 + \left(\frac{R_1}{h_r} \right)^{Q_5} \right\} \times (0.272 + \varepsilon_{\text{reff}} \times 0.07) \quad (3.10)$$

$$Q_6 = 1.55 - \left(13.61 \left(\frac{R_1}{W} \right)^{0.88} - 1.361 \right) \times \exp \left(-4.793 \left(\frac{R_1}{W} \right)^{0.88} \right) - 0.1 \\ \times \exp \left(- \left(13.61 \left(\frac{R_1}{W} \right)^{0.88} - 1.361 \right) \right) \quad (3.11)$$

$$Q_7 = -0.73 + \left(1.05 \left(\frac{W}{R_1} \right)^{0.88} - 3.892 \right) \times \exp \left(-8.23 \left(\frac{W}{R_1} \right)^{0.88} \right) \quad (3.12)$$

$$Q_8 = \frac{1.23}{1 + 0.12 \left\{ \left(\frac{W}{R_1} \right) - 1 \right\}^{0.9}} \quad (3.13)$$

$$Z_{in} = \left[\frac{1}{R_{\text{plate}}} + j\omega C_{\text{plate}} \right]^{-1} + \frac{1}{j\omega C_s} + \left[\frac{1}{R_{\text{inner}}} + j\omega C_{e,\text{inner}} \right]^{-1} + jL_{\text{probe}} \quad (3.14)$$

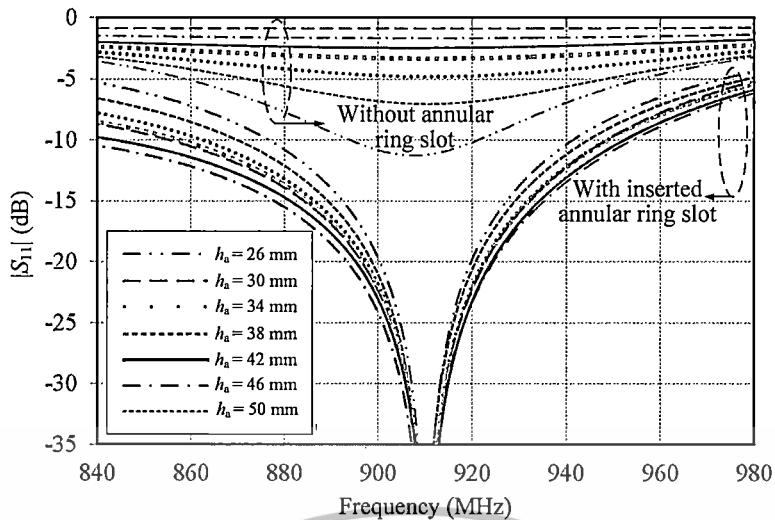
อิมพีแดนซ์ (Z_{in}) ของโครงสร้างสายอากาศช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกบ่อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าด้วยร่องว่างวงแหวนกลมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.14 และหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการศึกษาและการออกแบบการบ่อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าดังที่ได้นำเสนอ

3.3 การศึกษาและออกแบบการบ่อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า

สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการศึกษาและการออกแบบการบ่อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าให้กับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น เพื่อต้องการให้สามารถครอบคลุมระบบอาร์เอฟเอตี ย่านความถี่ยูเอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz) และนอกจากนี้ได้ศึกษาถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้า เช่นเดียวกับบทที่ 2 ที่ผ่านมา

รูปที่ 3.4 คือผลจำลองการเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกบ่อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลและการบ่อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า (ร่องว่างวงแหวนกลม) โดยได้กำหนดขนาดระนาบกราวด์สี่เหลี่ยมจัตุรัส (G) เท่ากับ 150 mm และระยะตำแหน่งบ่อนสัญญาณ (d_p) เท่ากับ 48 mm ดังรูปที่ 3.2 นอกจากนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนความสูงช่องว่างอากาศ (h_a) ตั้งแต่ 26 ถึง 50 mm (เช่นเดียวกันในบทที่ 2) พบว่าความสูงช่องว่างอากาศ เท่ากับ 46 mm มีแถบความถี่กว้างมากที่สุดเท่ากับ 13.43% พร้อมด้วยอัตราขยายเท่ากับ 6.44 dBi ในส่วนของค่าอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 7.78 dBi จะมีความสูงของช่องว่างอากาศเท่ากับ 26 mm และได้แสดงดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



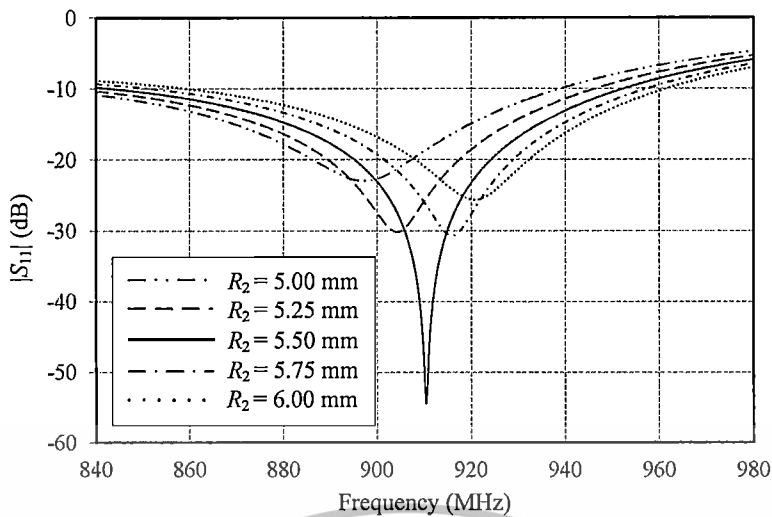
รูปที่ 3.4 ผลจำลองช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น โดยการป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลและการป้อนสัญญาณเชิงประจูปริศ

ตารางที่ 3.1 ผลจำลองช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ และอัตราขยายสายอากาศที่ถูกป้อนสัญญาณเชิงประจูปริศ ไฟฟ้า เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของช่องว่างอากาศตั้งแต่ 26 mm ถึง 50 mm

ความสูงช่องว่างอากาศ (h_a) (mm)	ความกว้าง (W) ของแผ่นแพรกระจายคลื่น (mm)	ร่องว่างวงแหวนกลม (R_1 และ R_2) (mm)	แถบความถี่ $ S_{11} $ (%)	อัตราขยาย (dBi)
26	123.80	6.53 และ 7.19	7.08	7.78
30	121.28	5.49 และ 6.61	8.19	7.60
34	118.75	5.12 และ 6.47	9.44	7.37
38	116.20	3.45 และ 4.96	10.02	7.10
42	112.20	3.16 และ 5.50	11.92	6.80
46	108.41	2.67 และ 4.97	13.43	6.44
50	105.48	1.70 และ 4.62	10.22	5.98

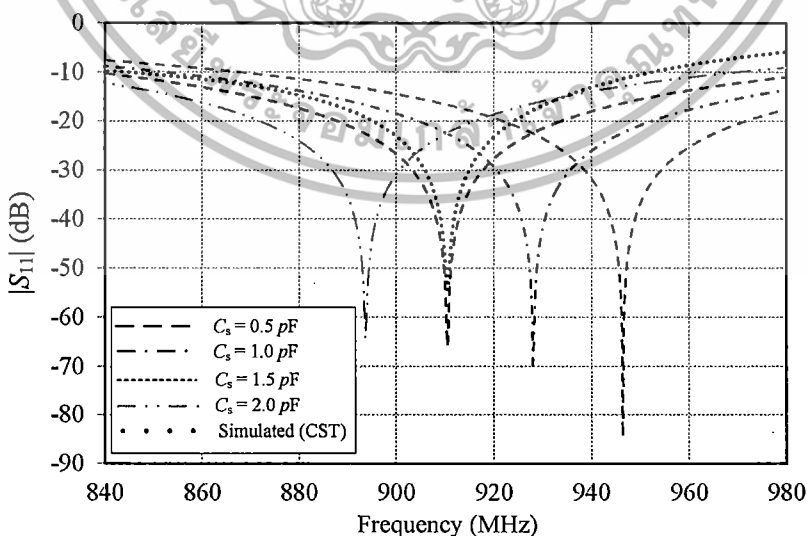
ความต้องการช่วงกว้างแถบความถี่ $|S_{11}|$ ของระบบอาร์เอฟไอเดียความถี่ยูเอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz) มีความต้องการช่วงกว้างแถบความถี่ $|S_{11}| \geq 11\%$ ดังนั้นการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลดังกล่าวควรเลือกเปอร์เซ็นต์แถบความถี่ที่มากกว่าและมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ดังตารางที่ 3.1 พบว่าความสูงช่องว่างอากาศเท่ากับ 42 mm มีช่วงกว้างแถบความถี่ $|S_{11}|$ เท่ากับ 11.92% พร้อมอัตราขยาย 6.80 dBi และมีความกว้างแผ่นแพรกระจายคลื่น (W) รัศมีด้านในและด้านนอกของร่องวงแหวนกลม (R_1 และ R_2) เท่ากับ 112.20 3.16 และ 5.50 mm ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ผลจำลองรัศมีด้านนอก (R_2) ของร่องว่างวงแหวนกลม เมื่อความสูงของช่องว่างอากาศ (h_a) เท่ากับ 42 mm

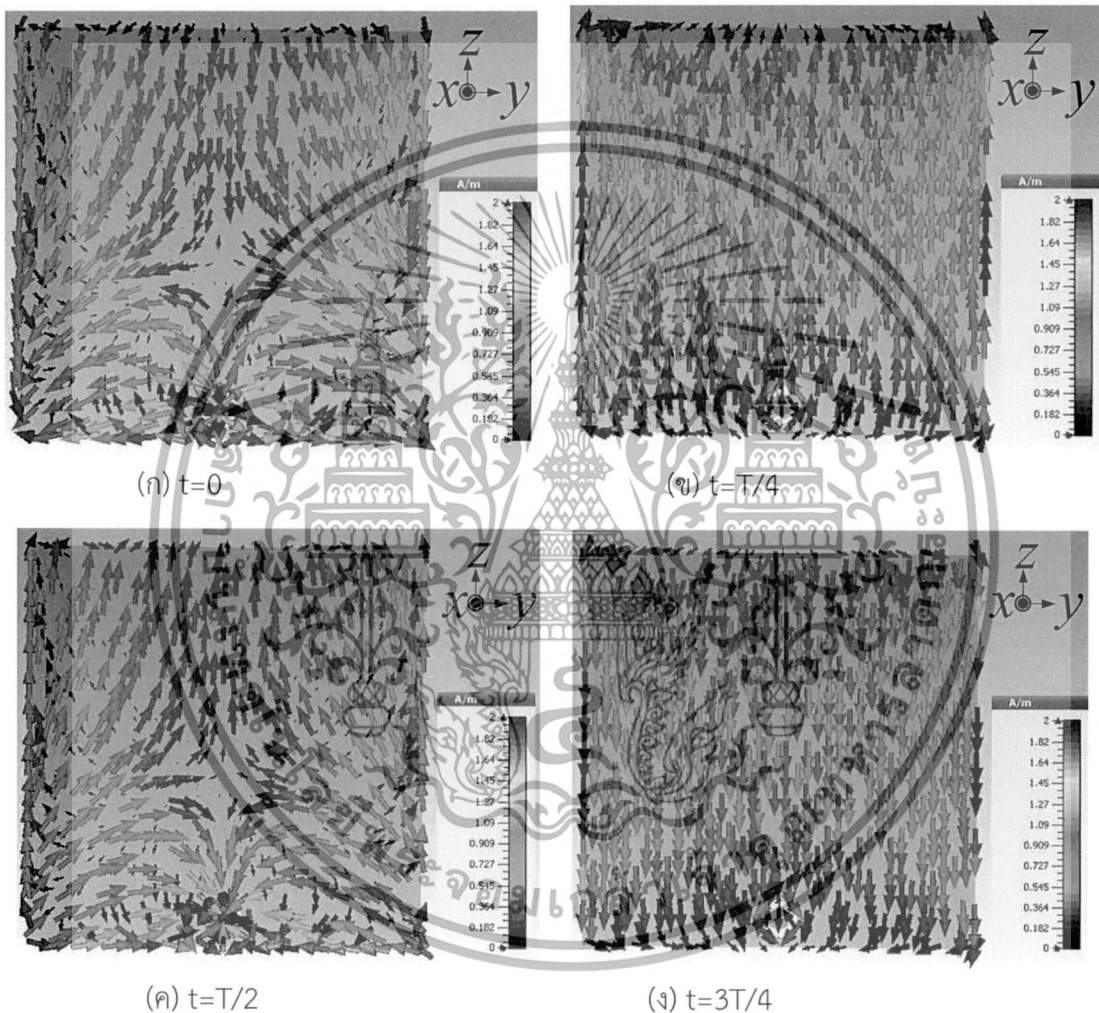
รูปที่ 3.5 คือผลจำลองรัศมีด้านนอก (R_2) ของร่องว่างวงแหวนกลมโดยกำหนดให้ช่องว่างอากาศสูงเท่ากับ 42 mm ระยะตำแหน่งจุดบ่อนสัญญาณ (d_p) เท่ากับ 48.0 mm ความกว้าง (W) ของแผ่นแพรกระจายคลื่นเท่ากับ 112.20 mm และรัศมีด้านในของร่องว่างวงแหวน (R_1) เท่ากับ 3.16 mm โดยผลการจำลองรัศมีด้านนอก (R_2) ได้ทำการปรับเปลี่ยนรัศมีตั้งแต่ 5.00 ถึง 5.60 mm จากการจำลองพบว่าร่องว่างวงแหวนกลมดังกล่าวนอกจากสามารถขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ได้แล้วยังสามารถปรับแบนด์วิดท์ที่ความถี่อื่นได้ด้วยเช่นกัน และจากการสังเกตยังพบอีกว่าเมื่อรัศมีด้านนอก (R_2) มีขนาดเล็กจะส่งผลทำให้มีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำและในลักษณะที่ตรงข้ามกัน เมื่อรัศมีด้านนอก (R_2) มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลทำให้มีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่สูง



รูปที่ 3.6 ผลจำลองค่าความจุไฟฟ้าร่องว่าง (C_s) หรือรัศมี R_2 ของร่องว่างวงแหวนกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 คือผลจำลองค่าความจุไฟฟ้าร่องว่าง (C_s) ของร่องว่างวงแหวนกลมโดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าของร่องว่างวงแหวนกลมตั้งแต่ 0.5 ถึง 2.0 pF พบว่าค่าความจุไฟฟ้า (C_s) เท่ากับ 1.5 pF มีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่กลาง 910 MHz และมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ กว้างถึง 16.72% (837.6-989.8 MHz) และกว้างกว่าผลจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio ถึง 4.8% นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าประจุไฟฟ้าต่ำส่งผลกระทบต่อการใช้เรโซแนนซ์ที่ความถี่สูงและเช่นเดียวกันรีซีมี (R_2) ของร่องว่างวงแหวนกลมมีขนาดใหญ่ส่งต่อการเรโซแนนซ์ความถี่สูง โดยสังเกตจากรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6

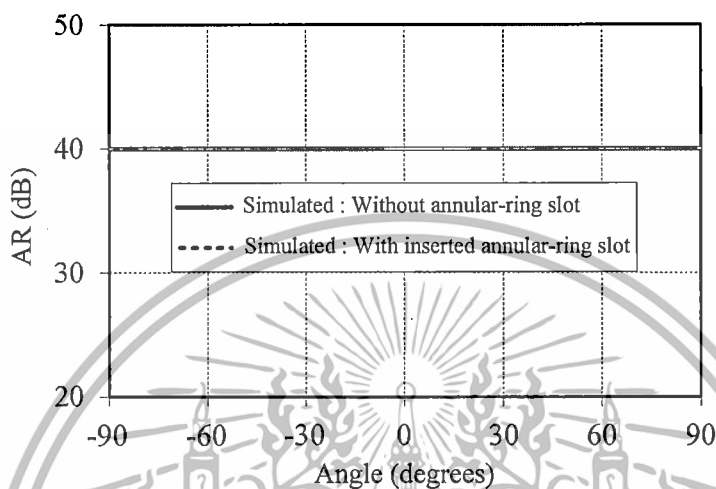


รูปที่ 3.7 ผลจำลองการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนแผ่นแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นพร้อมป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า

รูปที่ 3.7 เป็นผลจำลองการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนแผ่นแพร่กระจายคลื่นมีลักษณะเช่นเดียวกันในบทที่ 2 ณ เวลาที่ต่างกันจำนวน 4 คาบเวลา ดังรูปที่ 3.7 (ก) (ข) (ค) และ (ง) พบว่ากระแสไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2 A/m (กรณีมีสมมติกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.27 A/m) ณ บริเวณขอบด้านข้างของแผ่นแพร่กระจายคลื่น และกระแสน้อยที่สุดเท่ากับ 0 A/m ที่บริเวณกลางแผ่นแพร่กระจายคลื่น ลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าไหลตามแนวตั้งเช่นเดียวกับตำแหน่งการวางตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการป้องกันสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าสายอากาศนี้มีโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งดังเช่นสายอากาศในบทที่ 2

รูปที่ 3.7 (ก) และ(ง) ที่เวลา $t=0$ และ $t=3T/4$ พบว่ากระแสไฟฟ้ามีการไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของแผ่นแพรร์กระจายคลื่น (ตามขอบ) และรูปที่ 3.7 (ข) และ (ค) ที่เวลา $t=T/4$ และ $t=T/2$ พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศการไหลจากล่างขึ้นสู่บนของแผ่นแพรร์กระจายคลื่น (ตามขอบ)

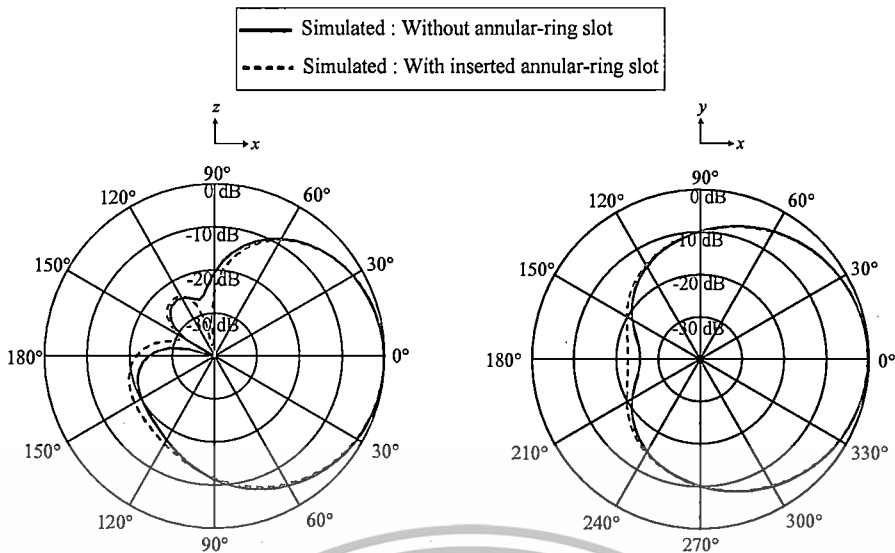
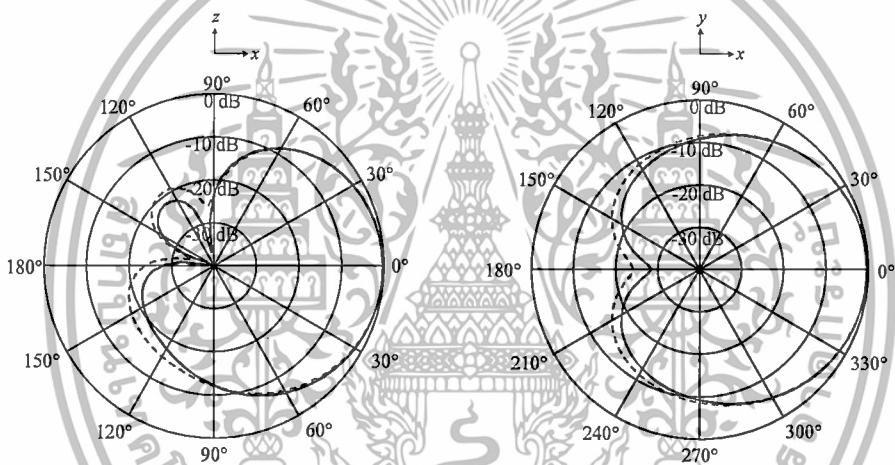
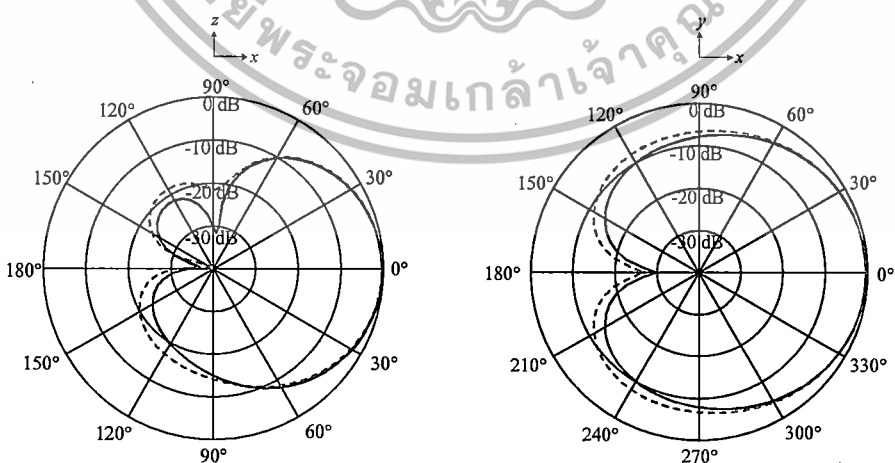


รูปที่ 3.8 ผลจำลองการเปรียบเทียบอัตราส่วนแกลนเมื่อป้องกันสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลและป้องกันสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าให้กับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์

จากผลจำลองการเปรียบเทียบอัตราส่วนแกลนเมื่อป้องกันสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลและป้องกันสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าให้กับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์ พบว่ามีค่าอัตราส่วนแกลนเท่ากับ 40 dB ตลอดทุกมุมด้านหน้าของตัวสายอากาศที่ได้นำเสนอตั้งแต่มุม 90 องศา ถึง -90 องศา บนระนาบสนามไฟฟ้า (xz) เช่นเดียวกันกับบทที่ผ่านมา โดยทั่วไปแล้วแผ่นแพรร์กระจายคลื่นถูกเจาะ หรือถูกแทรกช่องว่างจะส่งผลต่ออัตราส่วนแกลนแต่สำหรับกรณีนี้ไม่มีผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนแกลน

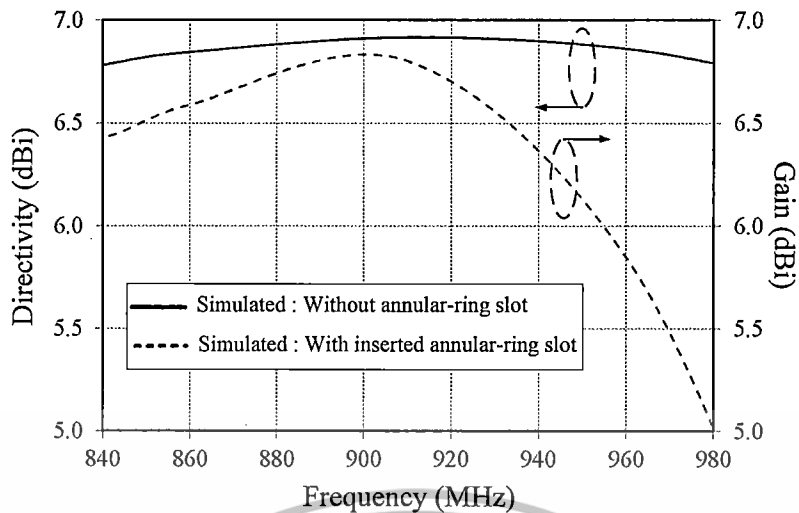
รูปที่ 3.9 คือผลจำลองการเปรียบเทียบแบบรูปการแพรร์กระจายคลื่นบนระนาบ xz และระนาบ xy ที่ความถี่ 860 910 และ 960 MHz ของสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกป้องกันด้วยโพรบโคแอกเซียลและป้องกันสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า จากรูปที่ 3.9 (ก) ที่ความถี่ 860 MHz พบว่าบนระนาบ xz มีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 81.1 องศา และมีลำคลื่นย่อยหลังน้อยกว่า 20 dB ทั้งสองเทคนิควิธีป้องกันสัญญาณ ส่วนระนาบ xy มีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 94 องศาและลำคลื่นย่อยหลังน้อยกว่า 20 dB เช่นกันทั้งสองเทคนิคการป้องกันสัญญาณ รูปที่ 3.9 (ข) ที่ความถี่ 910 MHz พบว่าบนระนาบ xz และ xy มีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 79.8 องศา และ 91.4 องศา เท่ากันทั้งสองเทคนิควิธีป้องกันสัญญาณและมีลำคลื่นย่อยหลังน้อยกว่า 20 dB ทั้งสองเทคนิควิธีการป้องกันสัญญาณเช่นกัน รูปที่ 3.9 (ค) ที่ความถี่ 960 MHz พบว่าบนระนาบ xz และ xy มีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 78.1 องศา และ 89.9 องศา เท่ากันทั้งสองเทคนิควิธีป้องกันสัญญาณและมีลำคลื่นย่อยหลังน้อยกว่า 25 dB ทั้ง

สองเทคนิควิธีการป้องกันสัญญาณเช่นกัน งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) ระบาย xz และ xy ที่ความถี่ 860 MHz(ข) ระบาย xz และ xy ที่ความถี่ 910 MHz(ค) ระบาย xz และ xy ที่ความถี่ 960 MHz

รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ xz และ xy ที่ความถี่ 860 910 และ 960 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ผลจำลองสภาพเจาะจงทิศทาง (ป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล) และอัตราขยายสายอากาศ (ป้อนสัญญาณเชิงประจูปไฟฟ้า)

จากผลจำลองค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศโครงสร้างที่ได้นำเสนอพร้อมด้วยการป้อนสัญญาณโพรบโคแอกเซียลพบว่ามีค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากกว่า 6.5 dBi ตลอดย่านความถี่ 840-980 MHz และผลจำลองค่าอัตราขยายของสายอากาศโครงสร้างที่ได้นำเสนอพร้อมด้วยการป้อนสัญญาณเชิงประจูปไฟฟ้าพบว่ามีค่าอัตราขยายมากกว่า 5.5 dBi ตั้งแต่ความถี่ 860 ถึง 960 MHz

3.4 บทสรุป

สำหรับในส่วนบทที่สามได้กล่าวถึงการป้อนสัญญาณเชิงประจูปไฟฟ้าโดยได้ใช้ร่องว่างวงแหวนกลมแทรกลงบนแผ่นแพรกระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส การป้อนสัญญาณในลักษณะนี้มีความมั่นคงแข็งแรงทางด้านกายภาพ ปรับเมตซึ่งได้ง่าย สามารถลดพื้นที่ของโครงสร้างสายอากาศได้อย่างดีต่อการออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบ การป้อนสัญญาณเชิงประจูปไฟฟ้าให้กับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ได้นำเสนอพบว่า สามารถขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ได้ถึง 11.92% และเพิ่มขึ้นมากกว่า 7 ถึง 9% เมื่อเทียบกับการป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลจากบทที่ 2 ในส่วนของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองระนาบยังคงเป็นชนิดเจาะจงทิศทางทั้งสองระนาบและการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้งเช่นเดียวกับกับบทที่ 2 แต่เมื่อป้อนสัญญาณเชิงประจูปไฟฟ้าจะทำให้ระดับกำลังงานลำคลื่นย่อยด้านข้างเพิ่มขึ้นในระนาบ xz และระดับกำลังงานลำคลื่นย่อยด้านหลังเพิ่มขึ้นในระนาบ xy ตลอดย่านยูเอชเอฟอาร์เอฟไอที นอกจากนี้มีอัตราขยายสายอากาศมากกว่า 5.5 dBi ตลอดย่านความถี่ยูเอชเอฟ

บทที่ 4

การแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมโดยการตัดขอบ สองด้านสำหรับอาร์เอฟไอเดียความถี่เอชเอฟ

4.1 เกริ่นนำ

จากบทที่ 2 และบทที่ 3 สายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลและป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้าตามแนวแกน z พบว่าสายอากาศมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซเชิงเส้นแนวตั้ง สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมด้วยการตัดขอบมุมรูปโค้งกลับ (Reverse arc-shape) ทั้งสองด้านของแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อทำให้เกิดโพลาริซวงกลมและสามารถใช้งานบนระบบอาร์เอฟไอเดียความถี่เอชเอฟ เพื่อต้องการให้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่ได้นำเสนอให้มีความสามารถติดต่อสื่อสารกับสายอากาศแท็กได้ทุกระนาบแนวแกน ในกรณีไม่ทราบการโพลาริซของสายอากาศแท็ก นอกจากนี้ยังสามารถลดปัญหาเรื่องการจางหายหลายวิถีในระบบอาร์เอฟไอเดียอีกด้วย สำหรับรายละเอียดเนื้อหาประกอบ งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียความถี่เอชเอฟ การแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมของสายอากาศแผ่นพิมพ์ ศึกษาการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมด้วยการตัดขอบสองด้านรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆ และบทสรุป

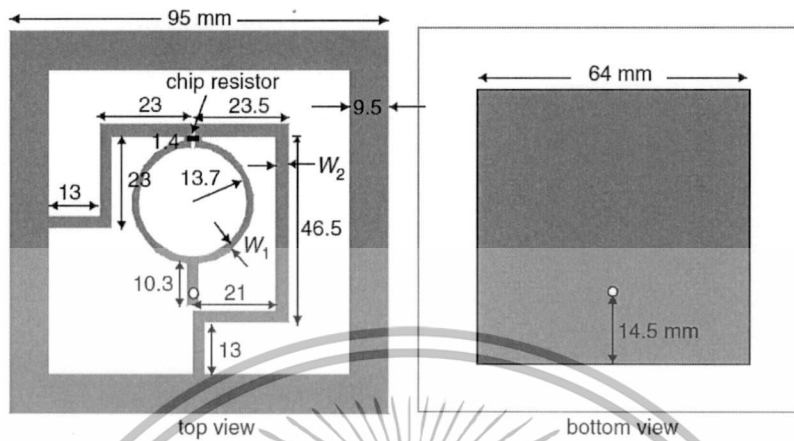
4.2 งานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดีย

สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียความถี่เอชเอฟจะถูกพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้าอยู่ 2 ประเภทหลักๆ คือ ช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}| \geq 11\%$ และช่วงกว้างอัตราส่วนแกน 3 dB (3 dB axial ratio bandwidth) ครอบคลุมช่วงกว้างความถี่ 860 ถึง 960 MHz สำหรับการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมมีหลากหลายงานวิจัยที่น่าสนใจและควรนำมาศึกษาเป็นอย่างยิ่ง อาทิเช่น ในปี 2008 ของนักวิจัย Lin Y.-F. และคณะ [35] ได้ออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียความถี่เอชเอฟเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างชั้นเดียวมีแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง (Bidirectional pattern) ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 (ก) ประกอบด้วยแผ่นแพร่กระจายคลื่นวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยวงจรแบ่งกำลังงานต่างเฟสกัน 90 องศา โดยตำแหน่งตรงกลางของโครงสร้างสายอากาศนี้ถูกวางด้วยวงจรแบ่งกำลังงานดังกล่าว สำหรับพอร์ตขาออกของวงจรแบ่งกำลังงานทั้งสองถูกต่อเข้ากับแผ่นแพร่กระจายคลื่นตามแนวแกน x และแกน y ระบายกราวด์ของสายอากาศดังกล่าวมีขนาดมิติเล็กกว่าแผ่นแพร่กระจายคลื่นวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสทำให้ได้ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง

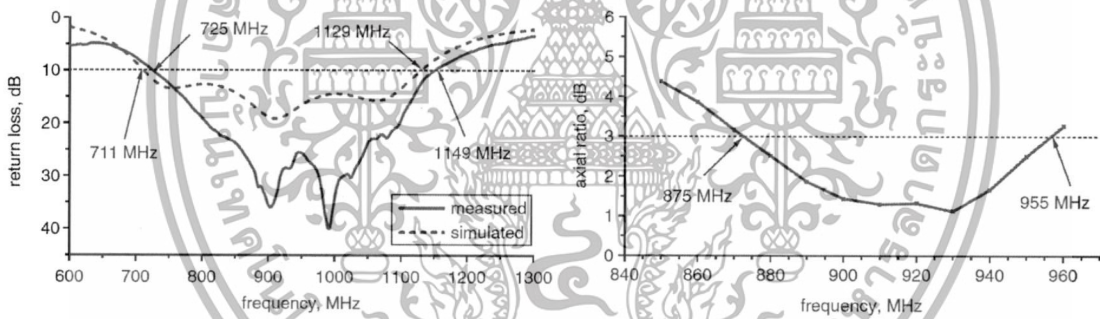
รูปที่ 4.1 (ข) (ค) (ง) และ (จ) คือผลการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียความถี่เอชเอฟ โดยพบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ตั้งแต่ 711 ถึง 1149 MHz (45.2%) ดังรูปที่ 4.1

(ข) ผลทดสอบช่วงกว้างความถี่อัตราส่วนแกน 3 dB พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 875 ถึง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

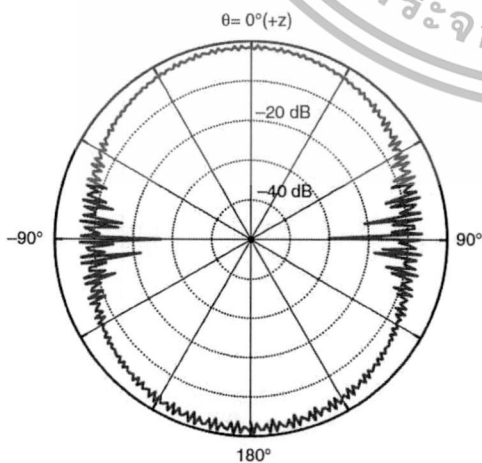
955 MHz (8.7%) ดังรูปที่ 4.1 (ค) ในส่วนการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพบว่า มีลักษณะแพร่กระจายคลื่นสองทิศทางโดยมีโพลาริซ์แบบวงกลมหมุนขวามือดังรูปที่ 4.1 (ง) และมีอัตราขยายสายอากาศ 1 ถึง 4 dBic ตลอดย่านความถี่ยูเอชเอฟ



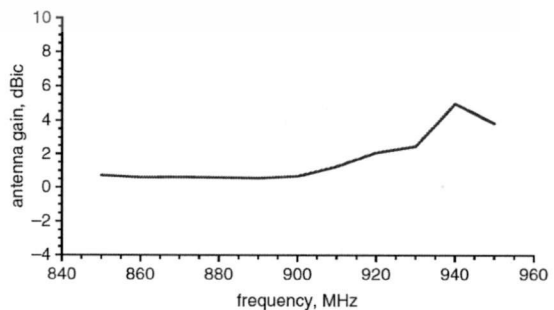
(ก) โครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีของ Lin Y.-F. และคณะ



(ข) $|S_{11}|$ (ค) อัตราส่วนแกน

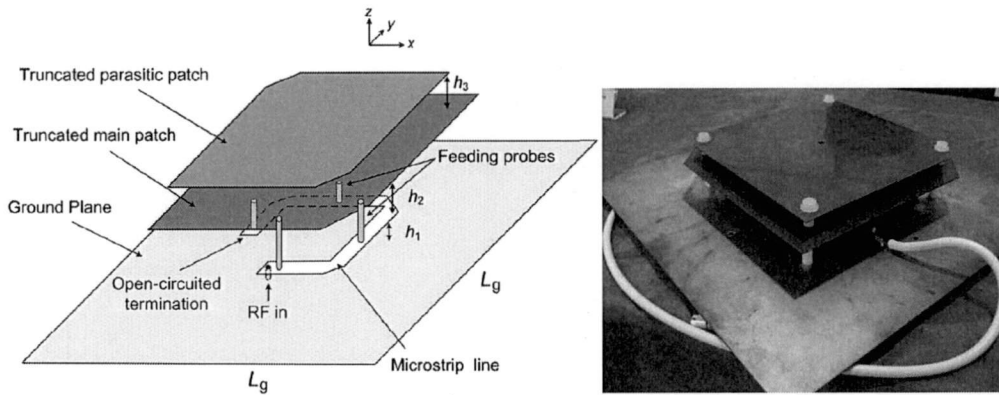


(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

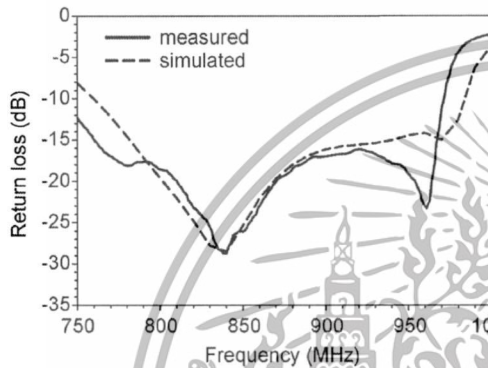


(จ) อัตราขยายสายอากาศ

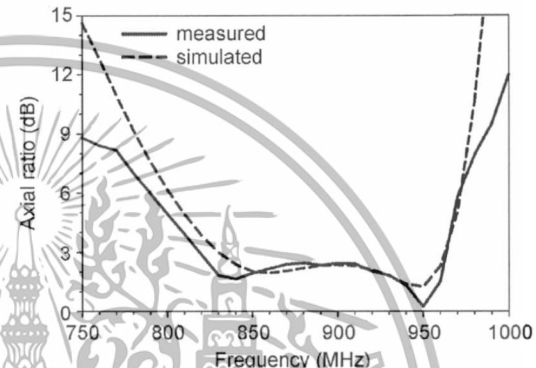
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น มิใช่ผูกมัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



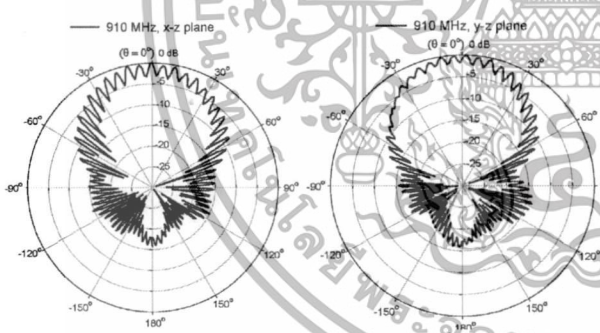
(ก) โครงสร้างและตัวต้นแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีของ Chen Z. N. และคณะ



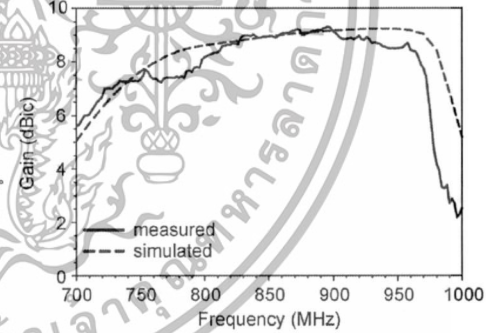
(ข) $|S_{11}|$



(ค) อัตราส่วนแกน



(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



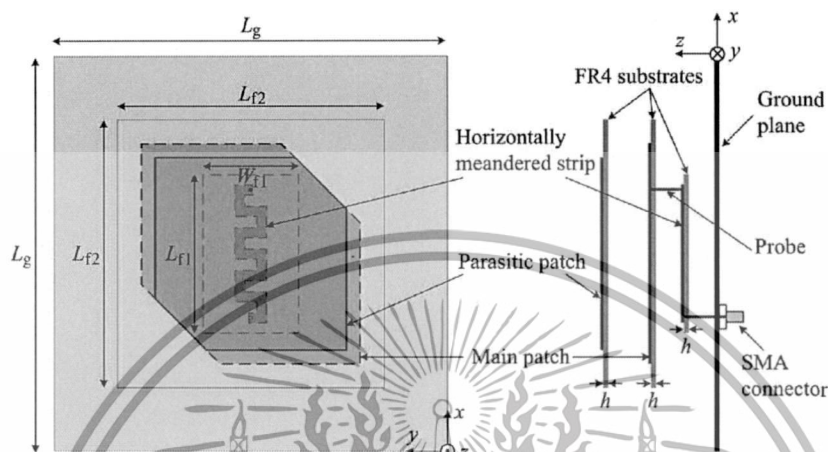
(จ) อัตราขยายสายอากาศ

รูปที่ 4.2 สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [29]

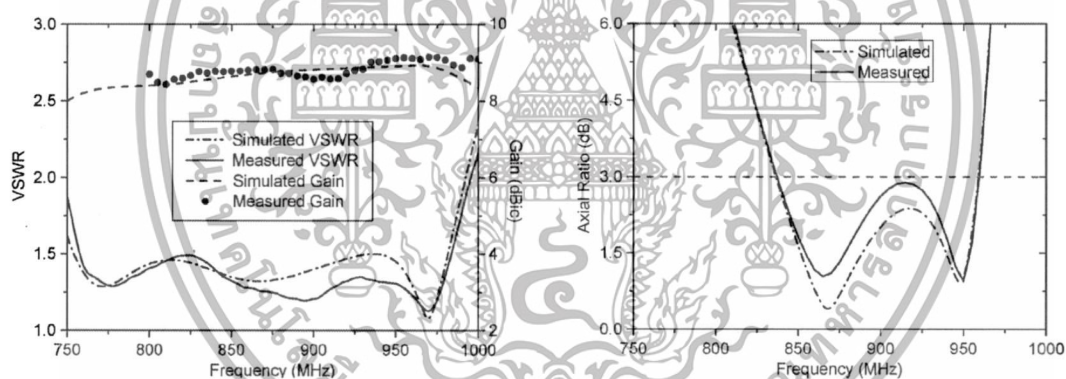
ในปี 2009 Chen Z. N. และคณะฯ [29] ได้นำเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี ยานความถี่เอชเอฟโดยใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างซ้อนกันหลายชั้นดังรูปที่ 4.2 (ก) ประกอบด้วย แผ่นตัวนำพาราซิติค (Parasitic patch) แผ่นแพร่กระจายคลื่นและระนาบกราวด์ โดยแผ่นปรสิติกและแผ่นแพร่กระจายคลื่นถูกตัดขอบมุมทั้งสองด้าน ในส่วนการป้อนสัญญาณได้ใช้สายนำสัญญาณวงแหวนสี่เหลี่ยมชนิดเปิดปลายสายและใช้โพรบนำสัญญาณดังกล่าวต่อเข้าระหว่างสายนำสัญญาณวงแหวนและแผ่นแพร่กระจายคลื่น โดยมีทั้งหมด 4 โพรบด้วยกันแต่ละโพรบวางห่างกัน 90 องศา หรือ $\lambda/4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 (ข) (ค) (ง) และ (จ) คือผลการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ จากรูปที่ 4.2 (ข) พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}| < -15$ dB ตั้งแต่ 760 ถึง 963 MHz (25.6%) รูปที่ 4.2 (ค) พบว่ามีช่วงกว้างอัตราส่วนแฉก 3 dB ตั้งแต่ 818 ถึง 964 MHz (16.4%) สำหรับในรูปที่ 4.2 (ง) พบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางและรูปที่ 4.2 (จ) คือผลทดสอบอัตราขยายพบว่า มีอัตราขยายมากกว่า 8 dBic ตลอดย่านความถี่เอชเอฟ

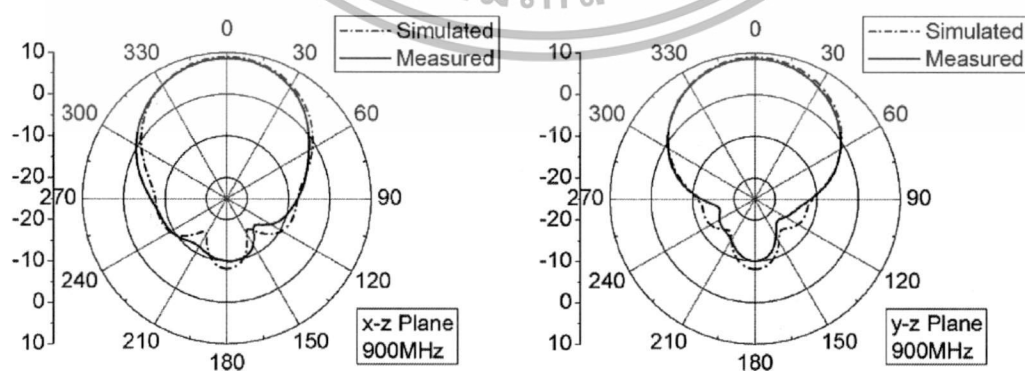


(ก) โครงสร้างและตัวต้นแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีของ Wang Z. และคณะ



(ข) VSWR และอัตราขยาย

(ค) อัตราส่วนแฉก

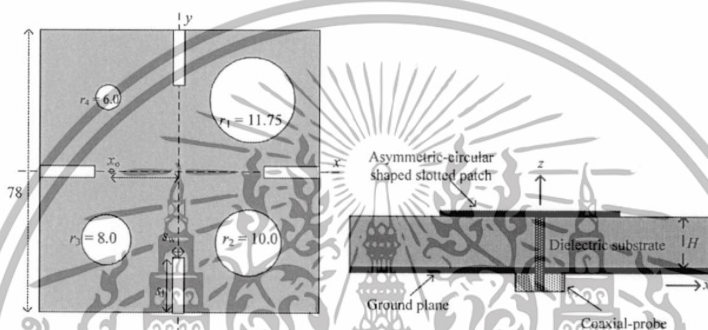


(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

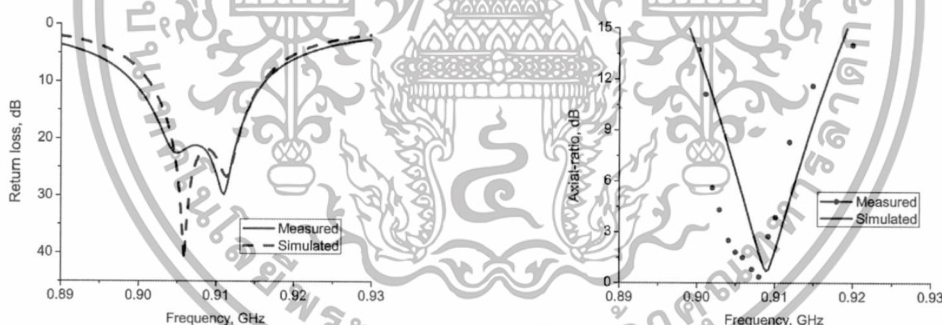
รูปที่ 4.3 สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2011 Wang Z. และคณะฯ [25] ได้นำเสนอสายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างซ้อนกันหลายชั้นนำมาประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟดังรูปที่ 4.3 (ก) โดยโครงสร้างสายอากาศและเทคนิควิธีการทำโพลาริซวงกลมเหมือนกันกับ [29] แต่จะแตกต่างกันด้วยเทคนิควิธีการป้อนสัญญาณ โดยนักวิจัย Wang Z. และคณะได้นำเส้นสายนำสัญญาณชนิดขดลวด (Meandered strip) ต่อเข้ากับแผ่นแพร่กระจายคลื่นโดยมีโพรบไฟฟ้าเส้นลวด (linear electric probe) เป็นตัวเชื่อมต่อ ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.3 (ข) (ค) (ง) และ (จ) สำหรับรูปที่ 4.3 (ข) พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $VSWR < 1.5$ ตั้งแต่ 758 ถึง 983 MHz (25.8%) และมีอัตราขยายมากกว่า 8 dBic ตลอดย่านความถี่เอชเอฟ รูปที่ 4.3 (ค) จากการทดสอบสายอากาศพบว่ามีช่วงกว้างอัตราส่วนแฉกตั้งแต่ 838 ถึง 959 MHz (13.5%) และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางดังรูปที่ 4.3 (ง)

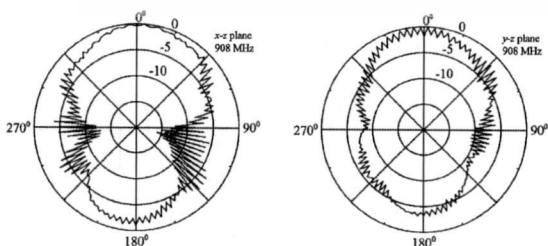


(ก) โครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีของ Nasimuddin และคณะ

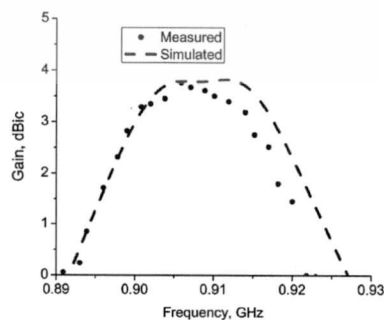


(ข) $|S_{11}|$

(ค) อัตราส่วนแฉก



(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



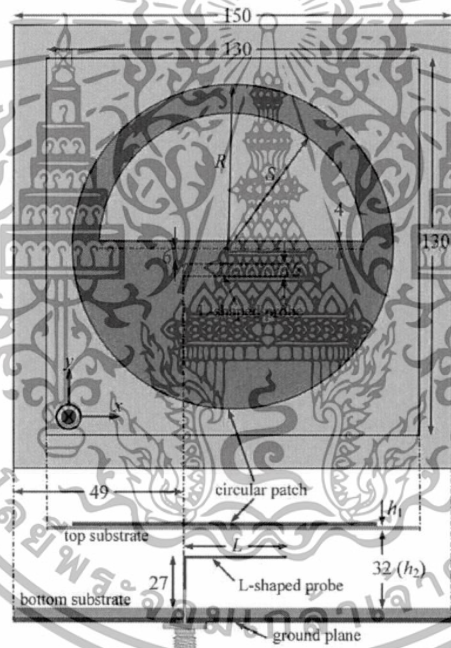
(จ) อัตราขยายสายอากาศ

รูปที่ 4.4 สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [30]

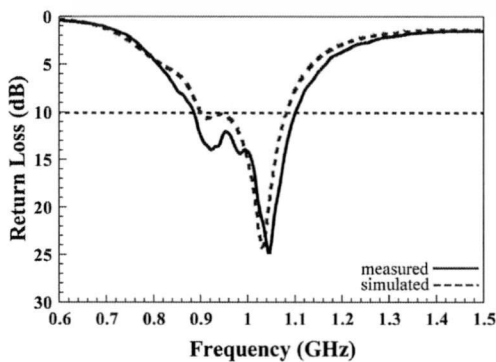
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2010 Nasimuddin และคณะฯ [30] ได้นำเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอทีย่านความถี่เอชเอฟโดยได้ใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างชั้นเดียวดังรูปที่ 4.4 (ก) ประกอบด้วยแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสพร้อมบ่อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียลตั้งอยู่บนแกน x ภายในแผ่นแพร่กระจายคลื่นถูกแทรกด้วยร่องวงกลมที่มีขนาดรัศมีที่แตกต่างกันออกไปจำนวน 4 วง โดยแต่ละวงอยู่ตำแหน่งแนวแกนเฉียงของสายอากาศ นอกจากนี้ยังได้แทรกร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กจำนวน 4 ตัวด้วยกัน แต่ละตัวถูกวางแนวแกน y และแกน x ตามบริเวณขอบของแผ่นแพร่กระจายคลื่น การแทรกช่องว่างที่นักวิจัย Nasimuddin และคณะฯ ได้นำเสนอสามารถทำให้ได้โพลาริซ์แบบวงกลม

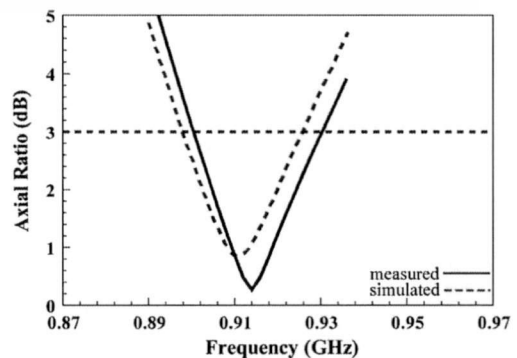
รูปที่ 4.4 (ข) (ค) (ง) และ (จ) คือผลการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอทีย่านความถี่เอชเอฟ จากรูปที่ 4.4 (ข) พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ตั้งแต่ 904 ถึง 941 MHz (4.01%) รูปที่ 4.4 (ค) พบว่ามี ช่วงกว้างอัตราส่วนแกน 3-dB ตั้งแต่ 918 ถึง 929 MHz (1.2%) ส่วนรูปที่ 4.4 (ง) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง และรูปที่ 4.4 (จ) มีค่าอัตราขยาย 1 ถึง 4 dBic ตลอดย่านความถี่เอชเอฟ



(ก) โครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอทีของ Sim C. และคณะ

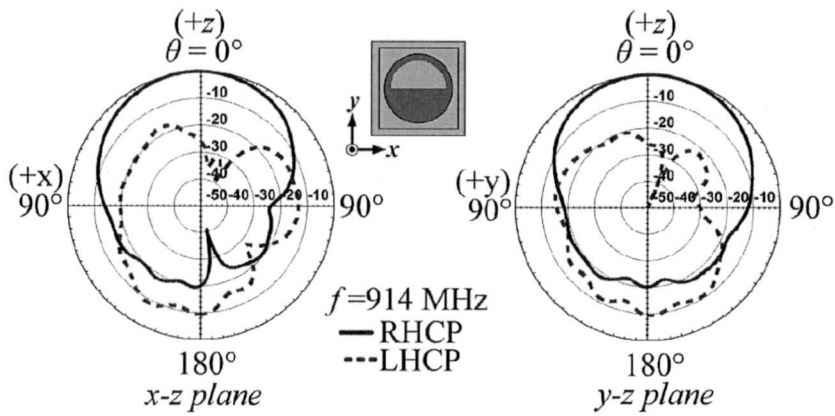


(ข) $|S_{11}|$

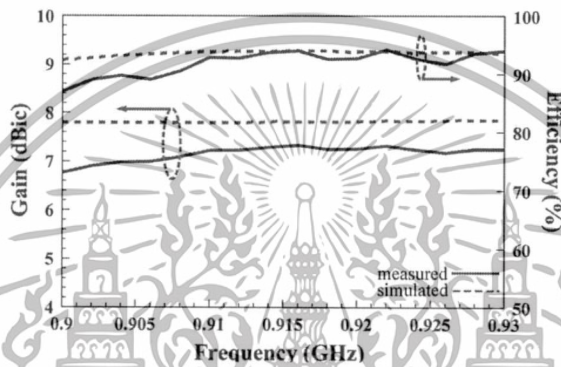


(ค) อัตราส่วนแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



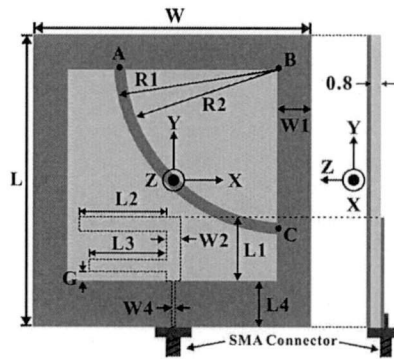
(จ) อัตรายายและประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

รูปที่ 4.5 สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [19]

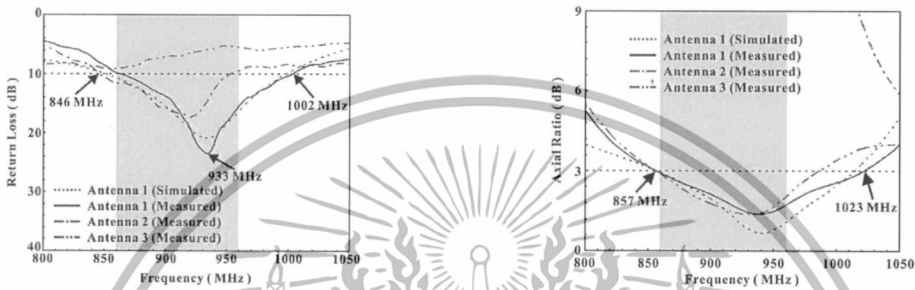
ในปี 2012 นักวิจัย Sim C. และคณะ [19] ได้นำเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีความถี่เอชเอฟโดยใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นสองชั้นเช่นเดียวกับโครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และมีความแตกต่างกันคือ แผ่นแพร่กระจายคลื่นเป็นรูปวงกลมที่ถูกแทรกด้วยร่องวงรีวงกลมเพื่อทำให้เกิดโพลาไรซ์แบบวงกลมและถูกบ่อนสัญญาณด้วยรูปตัวแอล ดังรูปที่ 4.5 (ก)

รูปที่ 4.5 (ข) (ค) (ง) และ (จ) ผลการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีความถี่เอชเอฟ สำหรับรูปที่ 4.5 (ข) พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ตั้งแต่ 880 ถึง 1100 MHz (22.0%) รูปที่ 4.5 (ค) พบว่ามีช่วงกว้างความถี่อัตราส่วนแกน 3 dB ตั้งแต่ 900 ถึง 930 MHz (3.2%) ส่วนรูปที่ 4.5 (ง) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางทั้งสองระนาบ และรูปที่ 4.5 (จ) มีค่าอัตรายายมากกว่า 6.5 dBic และมีประสิทธิภาพสายอากาศมากกว่า 80% ตลอดย่านความถี่เอชเอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

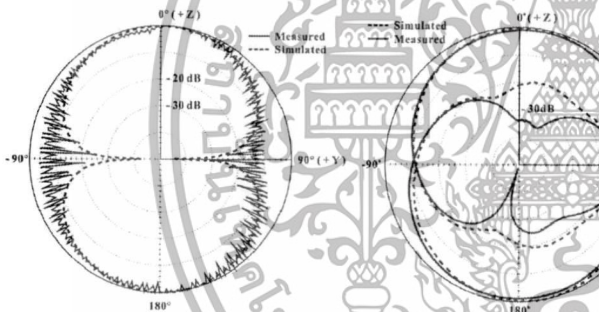


(ก) โครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีของ Lu J. -H. และ Wang S. -F.



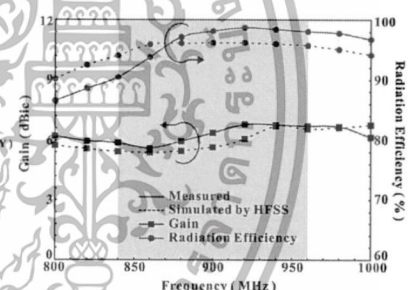
(ข) $|S_{11}|$

(ค) อัตราส่วนแกน



(ง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

(จ) อัตราขยายและประสิทธิภาพสายอากาศ



รูปที่ 4.6 สายอากาศจากเอกสารอ้างอิง [21]

ในปี 2013 นักวิจัย Lu J. -H. และคณะ [21] ได้นำสายอากาศแผ่นพิมพ์โครงสร้างชั้นเดียว นำมาประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ ดังรูปที่ 4.6 (ก) โดย ออกแบบให้แผ่นแพร่กระจายคลื่นเป็นวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตำแหน่งตรงกลางของแผ่นแพร่กระจาย คลื่นวงแหวนถูกแทรกด้วยเส้นนำโลหะโค้งต่อเข้ากับแผ่นแพร่กระจายคลื่นในทิศทางแกน x และ y ทำให้เกิดโพลาไรซ์วงกลม ในส่วนการป้อนสัญญาณรูปตัวเอฟ (F-shape) โดยจะอยู่ตำแหน่งแนวแกน y ของโครงสร้างสายอากาศ รูปตัวเอฟดังกล่าวจะถูกวางในตำแหน่งด้านหลังของแผ่นแพร่กระจาย คลื่น

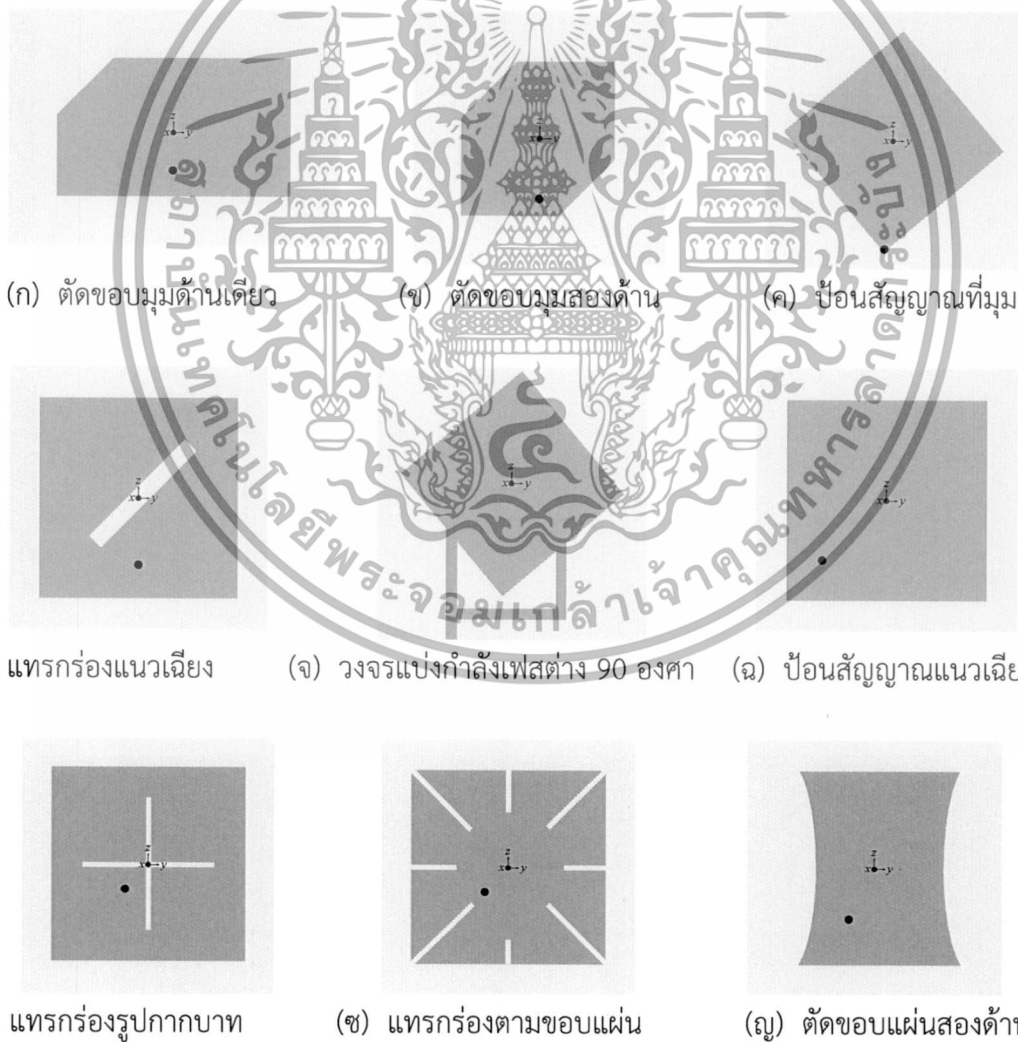
รูปที่ 4.6 (ข) (ค) (ง) และ (จ) ผลการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่าน ความถี่เอชเอฟ สำหรับรูปที่ 4.6 (ข) พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ มีช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 846 ถึง 1002 MHz (15.3% ที่ความถี่กลาง 931 MHz) รูปที่ 4.6 (ค) พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ อัตราส่วนแกน 3 dB มีช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 857 ถึง 1023 MHz (17.7% ที่ความถี่กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

940 MHz) ส่วนรูปที่ 4.6 (ง) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทางทั้งสองระนาบ และรูปที่ 4.6 (จ) มีค่าอัตราขยายมากกว่า 5 dBic และมีประสิทธิภาพสายอากาศมากกว่า 70% ตลอดย่านความถี่

4.3 การแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมของสายอากาศแผ่นพิมพ์

โดยทั่วไป องค์ประกอบแผ่นแพร่กระจายคลื่นของโครงสร้างสายอากาศแผ่นพิมพ์เบื้องต้นมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซเชิงเส้นดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เมื่อทำการปรับแต่งแผ่นแพร่กระจายคลื่นด้วยการแทรกด้วยร่องวางรูปทรงต่างๆ ดังรูปที่ 4.7 (ง) (ข) และ(ช) การตัดขอบมุมหรือขอบแผ่นแพร่กระจายคลื่น ดังรูปที่ 4.7 (ก) (ข) และ (ญ) การป้อนสัญญาณตามแนวแกนเฉียงของตัวสายอากาศ ดังรูปที่ 4.7 (ฉ) (ข) (ช) และ (ญ) และการใช้วงจรแบ่งกำลังงาน แต่เฟสต่างกัน 90 องศา เข้ามาร่วมใช้งานดังรูปที่ 4.7 (ญ) ด้วยเทคนิควิธีต่างๆ เหล่านี้สามารถทำให้สายอากาศมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมเกิดขึ้น



(ก) ตัดขอบมุมด้านเดียว (ข) ตัดขอบมุมสองด้าน (ค) ป้อนสัญญาณที่มุม

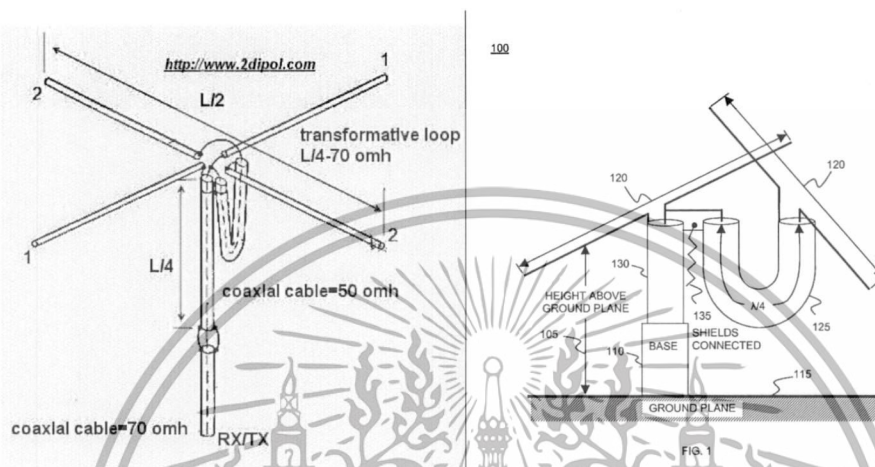
(ง) แทรกร่องแนวเฉียง (จ) วงจรแบ่งกำลังเฟสต่าง 90 องศา (ฉ) ป้อนสัญญาณแนวเฉียง

(ช) แทรกร่องรูปกากบาท (ฌ) แทรกร่องตามขอบแผ่น (ญ) ตัดขอบแผ่นสองด้าน

รูปที่ 4.7 แผ่นแพร่กระจายคลื่นลักษณะต่างๆ ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมสามารถเปรียบเทียบโดยนำสายอากาศไดโพลแบบโพลาริซเชิงเส้นจำนวนสองตัววางลักษณะตั้งฉากกันหรือรูปกากบาทและมีระยะห่างจากกันเท่ากับ $\lambda/4$ หรือ 90 องศา โดยสายอากาศไดโพลตัวที่ 1 มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซเชิงเส้นแนวตั้ง (TM_{01}) และสายอากาศไดโพลตัวที่ 2 มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซเชิงเส้นแนวนอน (TM_{10}) สายอากาศไดโพลทั้งสองตัวมีแอมป์ริจูดในสนามไฟฟ้าที่เท่ากัน แต่เฟสต่างกัน $\lambda/4$ หรือ 90 องศา ในส่วนของสมการโพลาริซวงกลมถูกอธิบายไว้ในบทที่ 2



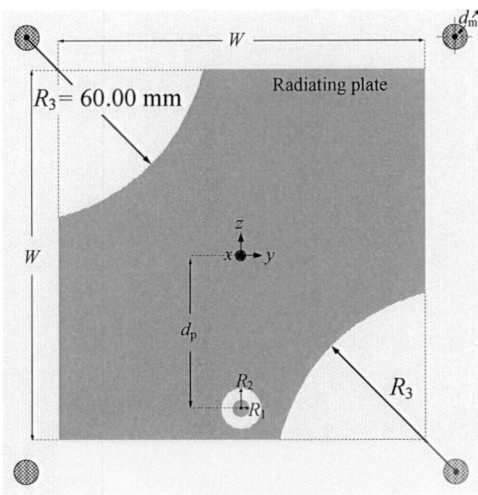
รูปที่ 4.8 องค์ประกอบการเกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม

4.4 การแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมด้วยการตัดขอบสองด้าน

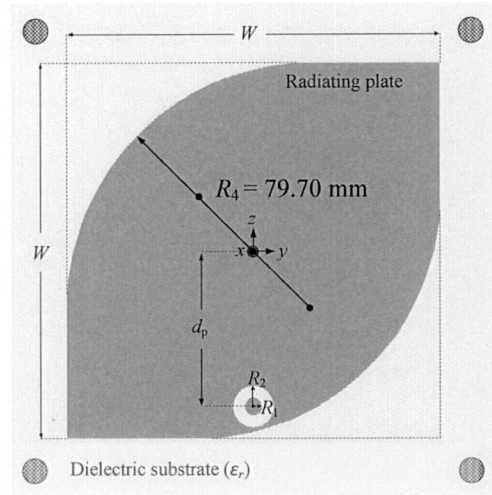
จากการศึกษาเทคนิควิธีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลมด้วยการตัดขอบมุมสองด้านที่ได้นำเสนอในบทนี้ พบว่าสามารถขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ และ ช่วงกว้างอัตราส่วนแฉก 3 dB ได้กว้างที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคต่างๆ ดังรูปที่ 4.7 [31] และในหัวข้อนี้ได้ศึกษาการตัดขอบด้วยรูปทรงเรขาคณิตทรงต่างๆ พร้อมด้วยการป้องกันสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า (ร่องวงแหวนกลม) สำหรับในส่วนของรูปทรงที่ใช้ตัดขอบมุมทั้งสองด้านได้ศึกษาจำนวน 6 รูปทรงด้วยกัน ได้แก่ วงกลมกลับด้าน (Reverse-arc shape: RAS) วงกลม (Arc shape: AS) สามเหลี่ยมหน้าจั่ว (Isosceles-triangle shape: ITS) สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular shape: RS) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square shape: SS) และวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Annular-ring square shape: ARSS) ดังรูปที่ 4.9 (ก) ถึง (ฉ) ตามลำดับ และการจำลองได้ทำการพิจารณาถึงช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ และช่วงกว้างอัตราส่วนแฉก 3 dB เพื่อให้ตรงตามความต้องการของระบบอาร์เอฟไอดีย่านยูเอชเอฟ

จากรูปที่ 4.9 ได้กำหนดให้ความสูงช่องว่างอากาศ (h_a) เท่ากับ 42.0 mm ระยะตำแหน่งจุดป้องกันสัญญาณ (d_p) เท่ากับ 48.0 mm ขนาดความกว้างของระนาบกราวด์ (G) เท่ากับ 150.0 mm สำหรับความกว้าง (W) ของแผ่นแพร่กระจายคลื่น รัศมีด้านนอก (R_2) และรัศมีด้านใน (R_1) ของร่องวงแหวนวงกลม (ป้องกันสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า) ถูกปรับเพื่อให้ได้ขนาดมิติที่ดีที่สุดและเรโซแนนซ์ความถี่กลางที่ 910 MHz โดยแสดงดังตารางที่ 4.1 ค่าอัตราส่วนแฉกบนระนาบ xz ที่ได้มานั้นถูกพิจารณาที่ลำคลื่นหลัก (0 องศา) ของสายอากาศ เพื่อหาช่วงกว้างอัตราส่วนแฉก 3 dB

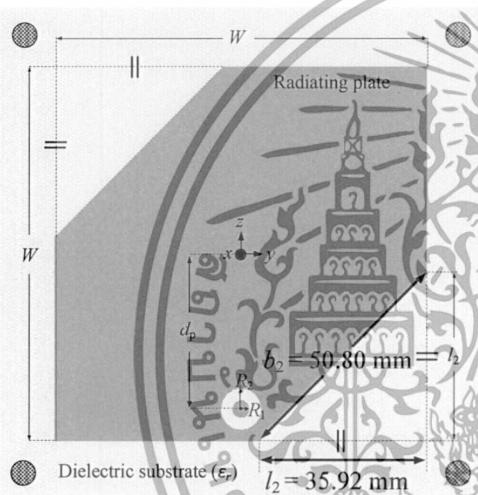
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



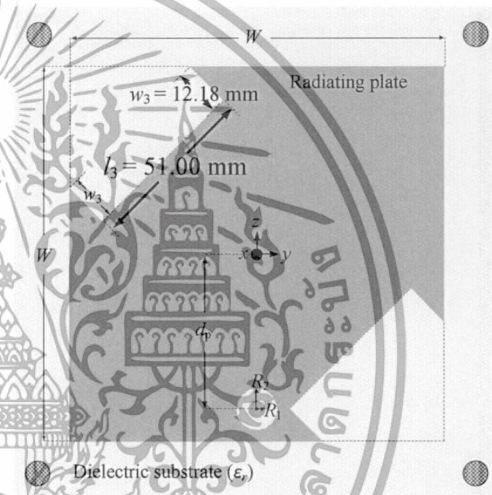
(ก) วงกลมกลับด้าน (RAS)



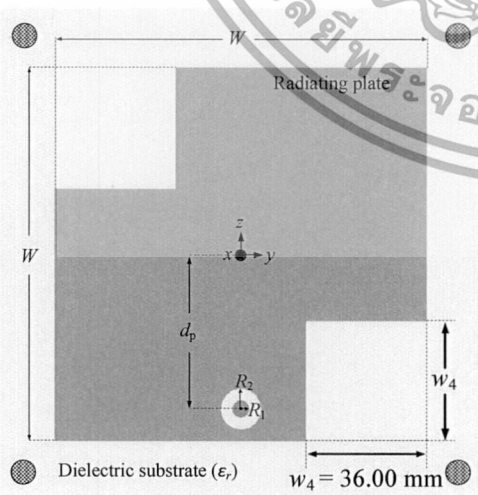
(ข) วงกลม (AS)



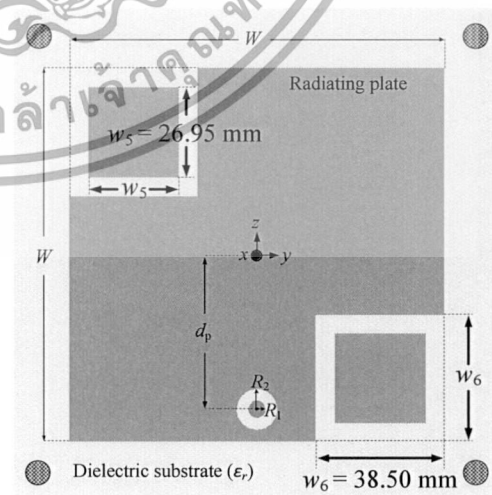
(ค) สามเหลี่ยมหน้าจั่ว (ITS)



(ง) สี่เหลี่ยมผืนผ้า (RS)



(จ) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (SS)



(ฉ) วงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ARSS)

รูปที่ 4.9 การตัดขอบสองด้าน 6 รูปทรงพร้อมบ่อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนการจำลองผลได้ทำปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตัดขอบสองด้านของแผ่นแพร่กระจาย ได้แก่ รัศมี (R_3) สำหรับ RAS ดังรูปที่ 4.10 รัศมี (R_4) สำหรับ AS ดังรูปที่ 4.11 ความกว้างและความยาว (b_2 และ l_2) สำหรับ ITS ดังรูปที่ 4.12 ความยาว (l_3) สำหรับ RS ความกว้าง ดังรูปที่ 4.13 (w_4) สำหรับ SS ดังรูปที่ 4.14 และ ความกว้าง (w_6) สำหรับ ARSS ดังรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.1 ผลจำลองการตัดขอบมุมสองด้านด้วยรูปทรง 6 แบบ สำหรับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟและเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 910 MHz

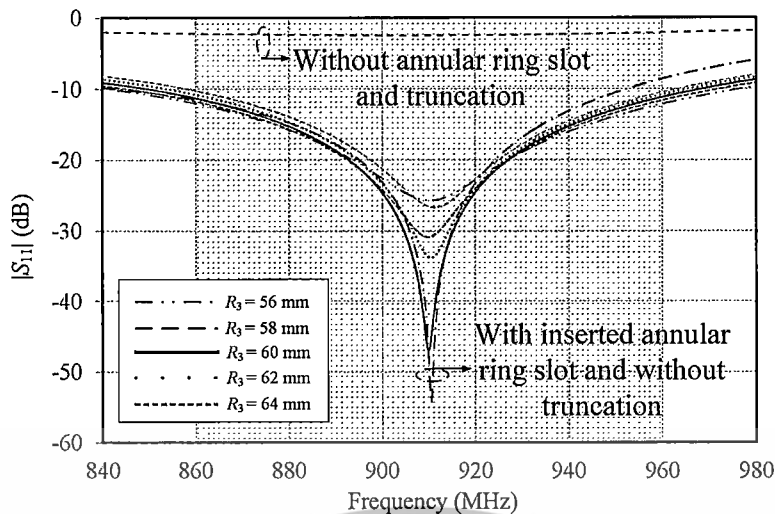
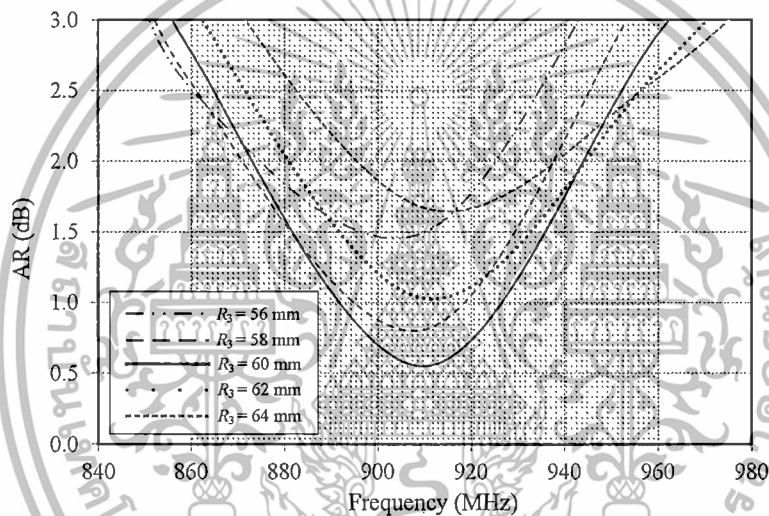
รูปทรงตัดขอบ	ความกว้าง (W) แผ่นแพร่กระจายคลื่น (mm)	ร่องว่างวงแหวนกลม (R_1) และ (R_2) (mm)	ช่วงกว้างความถี่ $ S_{11} $ (%)	ช่วงกว้างอัตราส่วนแแกน 3 dB (%)	อัตราขยาย (dBic)
RAS	112.20	2.96 และ 5.30	13.00	11.81	6.36
AS	113.80	3.13 และ 5.30	13.54	11.24	6.32
ITS	11.20	2.96 และ 5.30	13.65	11.44	6.37
RS	109.50	3.13 และ 5.71	13.86	11.21	6.41
SS	109.70	3.05 และ 5.32	13.20	11.31	6.44
ARSS	109.20	3.13 และ 5.58	13.19	11.35	6.46

จากรูปที่ 4.9 (ก) แผ่นแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกตัดขอบด้วยร่องว่างวงกลมกลับด้าน (RAS) ในส่วนของแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (W) และรัศมีของร่องว่างวงแหวนกลม (R_1 และ R_2) ถูกกำหนดให้คงที่มีค่าเท่ากับ 112.20 2.96 และ 5.30 mm (ตารางที่ 4.1) และได้ทำการปรับเปลี่ยนรัศมี (R_3) ของ RAS จำนวน 5 ขนาดมิติด้วยกันคือ 56.0 58.0 60.0 62.0 และ 64.0 mm ตามลำดับ

รูปที่ 4.10 (ก) คือผลจำลองช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนรัศมี (R_3) ของ RAS จำนวน 5 ขนาดมิติพบว่าช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เท่ากับ 14.75 13.82 13.00 12.22 และ 11.47% ตามลำดับ

และรูปที่ 4.10 (ข) คือผลจำลองช่วงกว้างอัตราส่วนแแกน 3 dB เมื่อทำการปรับเปลี่ยนรัศมี (R_3) ของ RAS จำนวน 5 ค่าพบว่าช่วงกว้างอัตราส่วนแแกน 3 dB เท่ากับ 10.05 11.04 11.81 11.80 และ 11.32% ตามลำดับ

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.10 (ก) และ (ข) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนรัศมี (R_3) RAS ตั้งแต่ 56 ถึง 64 mm พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ครอบคลุมระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz) และรัศมี R_3 เท่ากับ 60.0 mm เท่านั้น ที่สามารถครอบคลุมช่วงกว้างอัตราส่วนแแกน 3 dB โดยมีช่วงกว้างความถี่ตั้ง 855.20 ถึง 962.70 MHz (11.81%) นอกจากนั้นยังพบว่ามีค่าอัตราส่วนแแกนต่ำที่สุดที่ความถี่กลาง 910 MHz คือ 0.55 dB

(ก) $|S_{11}|$ 

(ข) อัตราส่วนแแกน

รูปที่ 4.10 ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยรูปทรง RAS

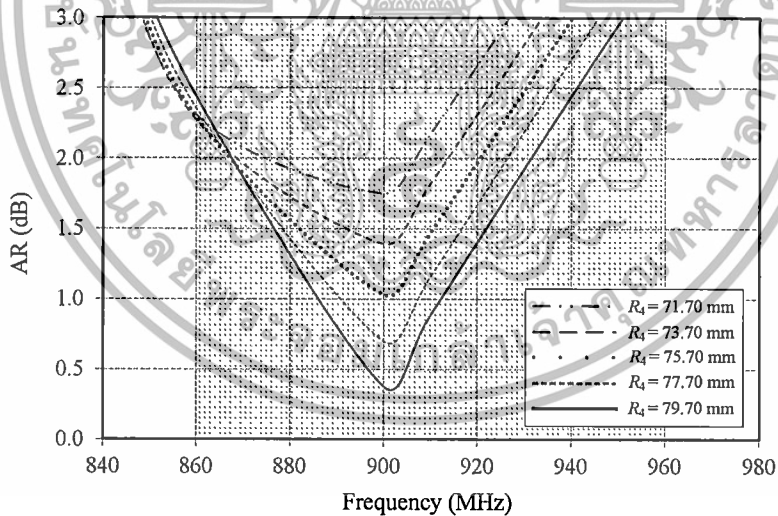
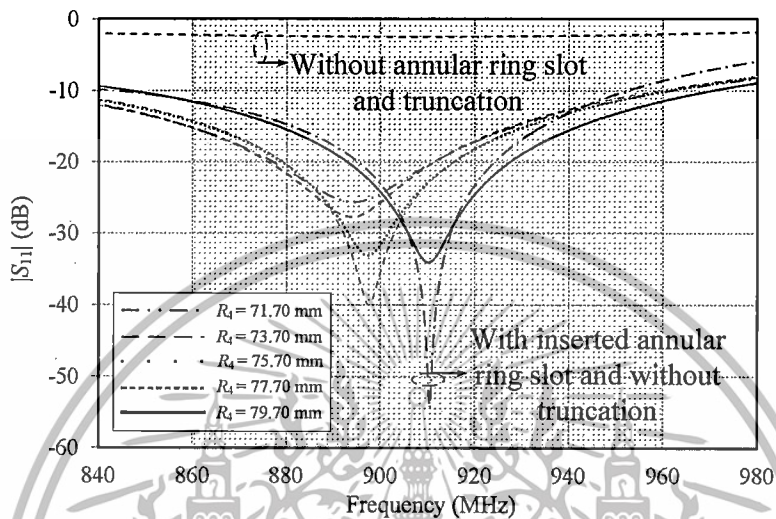
จากรูปที่ 4.9 (ข) แผ่นแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกตัดขอบด้วยร่องว่างวงกลม (AS) ในส่วนของแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (W) และรัศมีของร่องว่างวงแหวนกลม (R_1 และ R_2) ถูกกำหนดให้คงที่มีค่าเท่ากับ 113.80 3.13 และ 5.30 mm (ตารางที่ 4.1) โดยได้ทำการปรับรัศมี (R_3) ของ AS จำนวน 5 ขนาดมิติด้วยกันคือ 71.7 73.7 75.7 77.7 และ 79.7 mm ตามลำดับ นอกจากนี้การตัดขอบด้วยร่องว่างรูปทรงดังกล่าว ได้ถูกจำกัดรัศมี (R_3) ไว้ที่ 79.7 mm เนื่องจากเกิดการทับซ้อนและแทรกซ้อนกับร่องว่างวงแหวนกลม (การป้อนเชิงประจูปริมาณ)

รูปที่ 4.11 (ก) คือผลการจำลอง ช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เมื่อปรับเปลี่ยนรัศมี (R_3) ของ AS พบว่ามี ช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 16.26 15.74 14.97 14.51 และ 13.54% ตามลำดับ

และรูปที่ 4.11 (ข) คือผลจำลองช่วงกว้างอัตราส่วนแแกน 3 dB เมื่อปรับเปลี่ยนรัศมี (R_3) ของ AS เช่นเดียวกับรูปที่ 4.11 (ก) พบว่ามี ช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 8.63 8.75 8.90 10.05 และ 11.24% ตามลำดับ

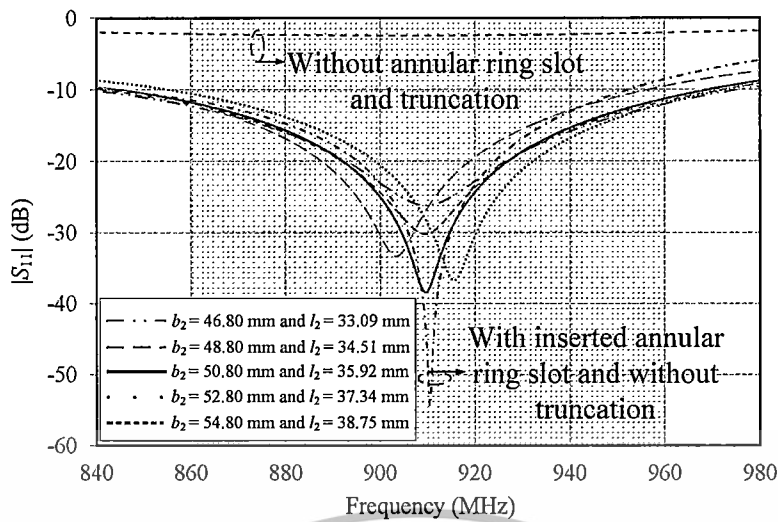
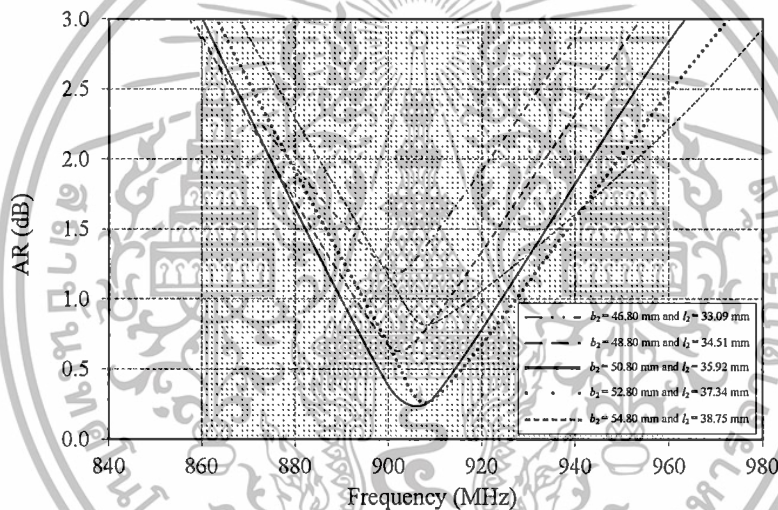
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองในรูปแบบที่ 4.11 (ก) และ (ข) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนรัศมี (R_4) ของ AS ตั้งแต่ 71.7 ถึง 79.7 mm พบว่าช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ครอบคลุมระบบอาร์เอฟไอเดียความถี่ยูเอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz) แต่ช่วงกว้างอัตราส่วนแฉก 3 dB ไม่สามารถครอบคลุมความถี่ตามที่ระบบต้องการได้ แต่อย่างไรก็ตาม รัศมี (R_4) เท่ากับ 79.7 mm มีค่าอัตราส่วนแฉกน้อยที่สุดคือ 0.89 dB และมีช่วงกว้างอัตราส่วนแฉก 3 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 849.7 ถึง 952.0 MHz (11.24%)



รูปที่ 4.11 ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยรูปทรง AS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) $|S_{11}|$ 

(ข) อัตราส่วนแค้น

รูปที่ 4.12 ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยรูปทรง ITS

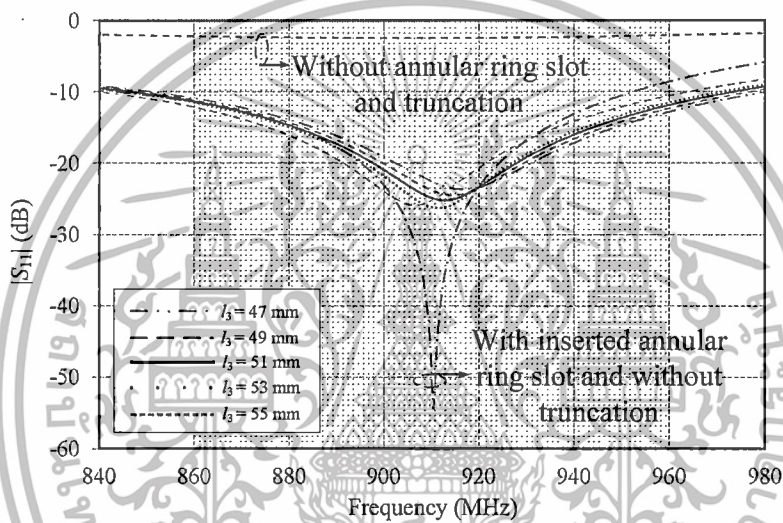
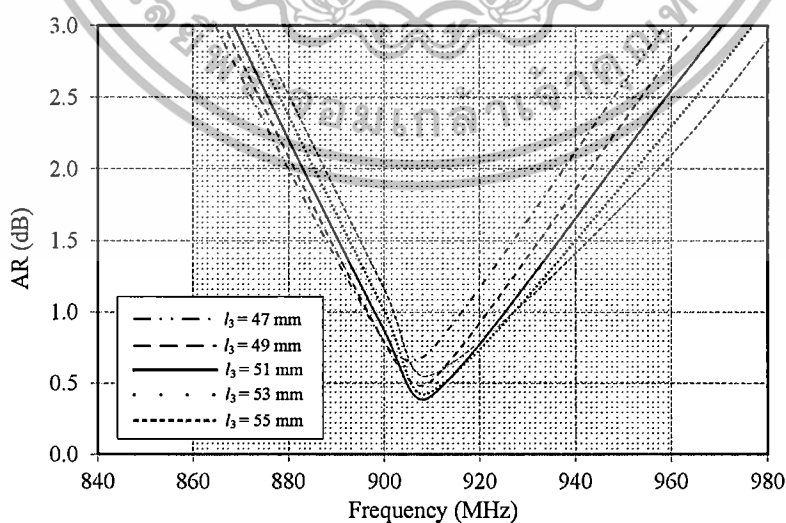
จากรูปที่ 4.9 (ค) แผ่นแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกตัดขอบด้วยร่องว่างสามเหลี่ยมหน้าจั่ว (ITS) ในส่วนของแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (W) และรัศมีของร่องว่างวงกลม (R_1 และ R_2) ถูกกำหนดให้คงที่มีค่าเท่ากับ 112.2 2.96 และ 5.3 mm (ตารางที่ 4.1) โดยได้ทำการปรับความกว้าง (b_2) และความยาว (l_2) ของ ITS จำนวน 5 คู่ด้วยกัน คู่แรกคือ 46.80 และ 33.09 คู่ที่สองคือ 48.80 และ 34.51 คู่ที่สามคือ 50.80 และ 35.92 คู่ที่สี่คือ 52.80 และ 37.34 และคู่สุดท้ายคือ 54.80 mm และ 38.75 mm ตามลำดับดังรูปที่ 4.12

รูปที่ 4.12 (ก) คือผลการจำลองช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้างและความยาว (b_2 และ l_2) ของ ITS คู่แรกพบว่ามีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 15.47% คู่ที่สองมีแถบความถี่เท่ากับ 14.31% คู่ที่สามมีแถบความถี่เท่ากับ 13.65% คู่ที่สี่มีแถบความถี่เท่ากับ 12.84% และคู่สุดท้ายมีแถบความถี่เท่ากับ 12.32%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และรูปที่ 4.12 (ข) คือผลการจำลอง ช่วงกว้างอัตราส่วนแกน 3 dB และปรับเปลี่ยนความกว้างและความยาว (b_2 และ l_2) ของ ITS โดยคู่แรกพบว่ามี ช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 9.34% คู่ที่สองมี ช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 11.04% คู่ที่สามมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 11.44% คู่ที่สี่มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 11.89% และคู่สุดท้ายมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 12.32%

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความกว้างและความยาว (b_2 และ l_2) ของ ITS จำนวน 5 คู่ พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ สามารถครอบคลุมระบบอาร์เอฟไอดี ย่านความถี่ยูเอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz) แต่ ช่วงกว้างอัตราส่วนแกน 3 dB จำนวน 5 คู่ดังกล่าวไม่สามารถครอบคลุมความถี่ตามที่ระบบต้องการได้ แต่อย่างไรก็ตามคู่ที่สามของ ITS เท่ากับ 50.80 และ 35.92 (b_2 และ l_2) มีค่าอัตราส่วนแกนต่ำที่สุดคือ 0.35 dB และมี ช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 860.80 ถึง 964.90 MHz (11.44%)

(ก) $|S_{11}|$ 

(ข) อัตราส่วนแกน

รูปที่ 4.13 ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยรูปทรง RS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 (ง) แผ่นแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกตัดขอบด้วยร่องว่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า (RS) ในส่วนของแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (W) และรัศมีของร่องว่างวงแหวนกลม (R_1 และ R_2) ถูกกำหนดให้คงที่มีค่าเท่ากับ 109.50 3.13 และ 5.71 mm (ตารางที่ 4.1) โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนความยาว (I_3) ของ RS จำนวน 5 ขนาดมิติด้วยกันคือ 47.0 49.0 51.0 53.0 และ 55.0 mm ตามลำดับดังรูปที่ 4.13

รูปที่ 4.13 (ก) คือผลจำลองช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความยาว (I_3) ของ RS จำนวน 5 ขนาดมิติ พบว่ามี ช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 14.15 14.02 13.86 13.65 และ 13.60% ตามลำดับ

และรูปที่ 4.13 (ข) คือผลจำลอง ช่วงกว้างอัตราส่วนแบน 3 dB พบว่ามีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 10.30 10.82 11.21 11.52 และ 12.47% ตามลำดับ

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความยาว (I_3) ของ RS จำนวน 5 ขนาดมิติ พบว่าความยาว I_3 (47.0 ถึง 55.0 mm) มีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ สามารถครอบคลุมระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz) แต่ช่วงกว้างอัตราส่วนแบน 3 dB ของความยาวของ RS ทั้ง 5 ขนาดมิติ ไม่สามารถครอบคลุมความถี่ตามที่ระบบต้องการได้ แต่อย่างไรก็ตาม I_3 เท่ากับ 51 mm มีค่าอัตราส่วนแบนต่ำที่สุดคือ 0.41 dB และมีช่วงกว้างอัตราส่วนแบน 3 dB ตั้งแต่ช่วงกว้างความถี่ 868.00 ถึง 970.10 MHz (11.21%)

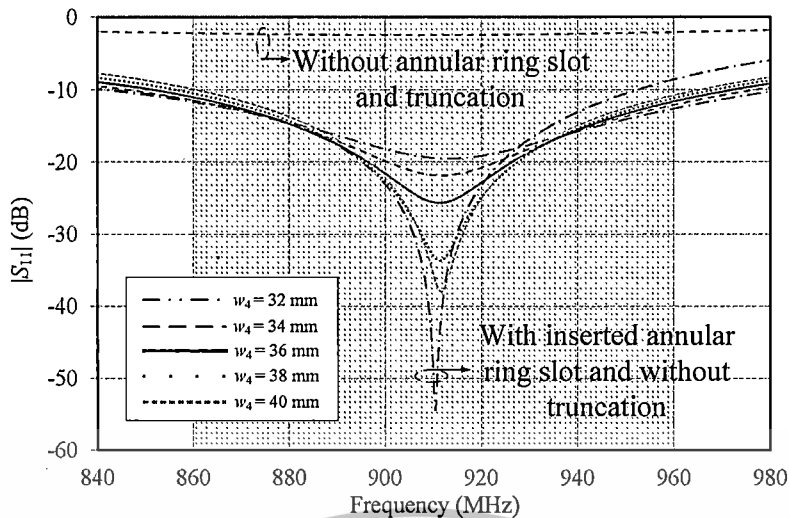
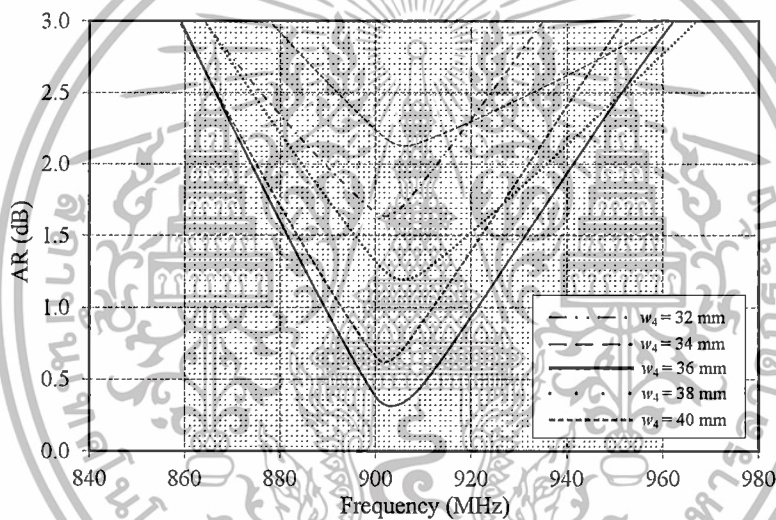
จากรูปที่ 4.9 (จ) แผ่นแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกตัดขอบด้วยร่องว่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส (SS) ในส่วนของแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (W) และรัศมีของร่องว่างวงแหวนกลม (R_1 และ R_2) ถูกกำหนดให้คงที่มีค่าเท่ากับ 109.70 3.05 และ 5.32 mm (ตารางที่ 4.1) โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนความกว้าง (w_4) ของ SS จำนวน 5 ขนาดมิติด้วยกันคือ 32.0 34.0 36.0 38.0 และ 40.0 mm ตามลำดับดังรูปที่ 4.14

รูปที่ 4.14 (ก) คือผลช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความกว้าง (w_4) ของ SS จำนวน 5 ขนาดมิติพบว่ามีช่วงกว้างความถี่ เท่ากับ 15.43 14.22 13.20 12.26 และ 11.45% ตามลำดับ

และรูปที่ 4.13 (ข) คือผลจำลองช่วงกว้างอัตราส่วนแบน 3 dB พบว่ามีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 7.79 10.78 11.31 11.20 และ 9.31% ตามลำดับ

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความกว้าง (w_4) ของ SS จำนวน 5 ขนาดมิติ พบว่า w_4 (32.0 ถึง 40.0 mm) มีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ครอบคลุมระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz) และ w_4 ขนาดเท่ากับ 32.0 34.0 38.0 และ 40.0 mm ช่วงกว้างอัตราส่วนแบน 3 dB ไม่สามารถครอบคลุมความถี่ตามที่ระบบต้องการได้ ยกเว้น w_4 เท่ากับ 36 mm มีช่วงกว้างอัตราส่วนแบน 3 dB ตั้งแต่ 859.20 ถึง 962.10 MHz (11.31%) และมีค่าอัตราส่วนแบนเท่ากับ 0.47 dB

จากรูปที่ 4.9 (ฉ) แผ่นแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกตัดขอบด้วยร่องว่างวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ARSS) ในส่วนของแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (W) และรัศมีของร่องว่างวงแหวนกลม (R_1 และ R_2) ถูกกำหนดให้คงที่มีค่าเท่ากับ 109.20 3.13 และ 5.58 mm (ตารางที่ 4.1) โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนความกว้าง (w_6) ของ ARSS จำนวน 5 ขนาดมิติด้วยกันคือ 34.5 36.5 38.5 40.5 และ 42.5 mm ตามลำดับดังรูปที่ 4.15

(ก) $|S_{11}|$ 

(ข) อัตราส่วนแแกน

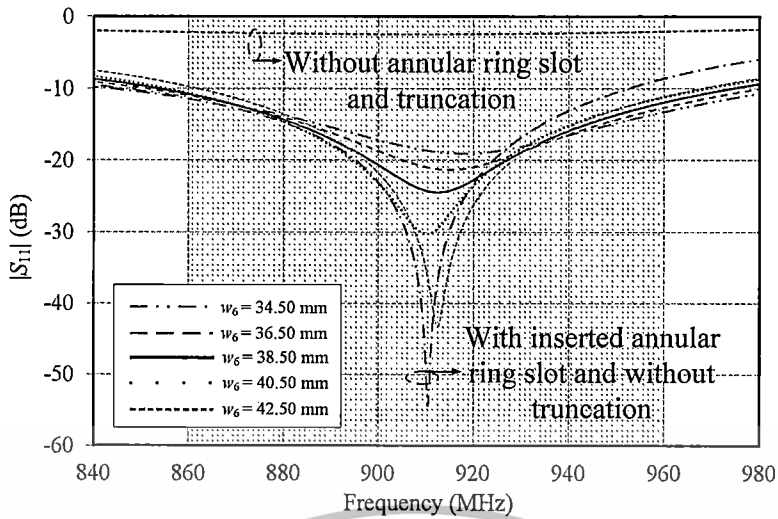
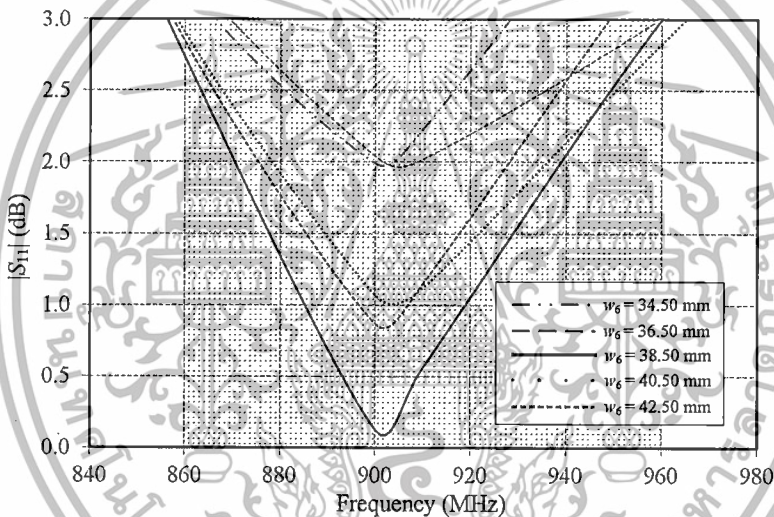
รูปที่ 4.14 ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยรูปทรง SS

รูปที่ 4.15 (ก) คือผลจำลองช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความกว้าง (w_6) ของ ARSS จำนวน 5 ขนาดมิติพบว่า มี ช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 15.23 14.11 13.19 12.35 และ 11.54% ตามลำดับ

และรูปที่ 4.13 (ข) คือผลจำลอง ช่วงกว้างอัตราส่วนแแกน 3 dB พบว่ามี ช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 7.00 10.00 11.35, 11.21 และ 9.44% ตามลำดับ

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความกว้าง (w_6) ของ ARSS จำนวน 5 ขนาดมิติ พบว่าช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ สามารถครอบคลุมระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่ยูเอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz) แต่ช่วงกว้างอัตราส่วนแแกน 3 dB ไม่สามารถครอบคลุมความถี่ตามที่ระบบต้องการได้ แต่อย่างไรก็ตาม w_6 เท่ากับ 38.5 mm มีค่าอัตราส่วนแแกนต่ำที่สุดคือ 0.56 dB และมีช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 855.75 ถึง 959.10 MHz (11.35%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

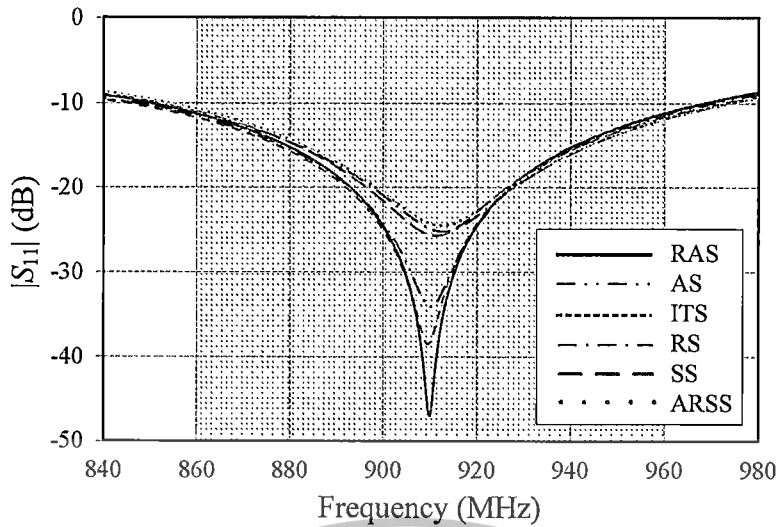
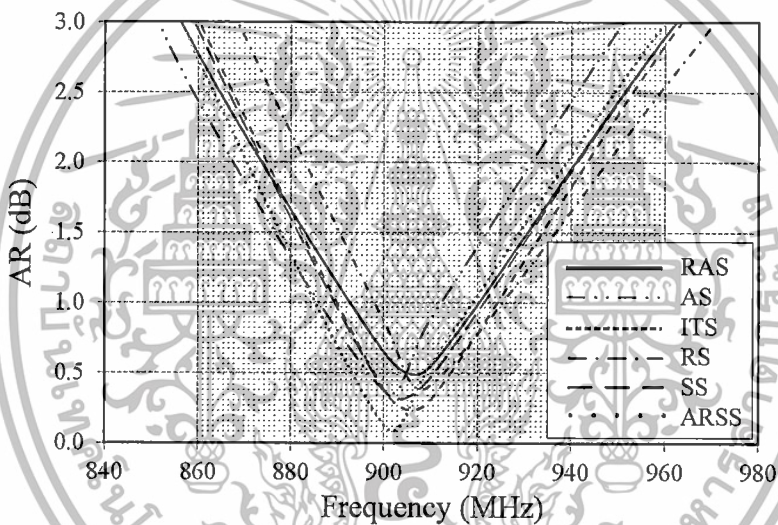
(ก) $|S_{11}|$ 

(ข) อัตราส่วนแกน

รูปที่ 4.15 ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยรูปทรง ARSS

ผลจำลองของการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยร่องว่าง 6 รูปทรง (RAS AS ITS RS SS และ ARSS) ที่ได้นำเสนอแสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.16 (ก) ผลจำลองช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ พบว่า ทั้ง 6 รูปทรงที่ได้นำเสนอสามารถครอบคลุมระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz) โดย การตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วย RS มีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ กว้างมากที่สุดตั้งแต่ 847.22 ถึง 973.38 MHz (13.86%) ถัดมาคือการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วย ITS เท่ากับ 13.65% อันดับสามคือการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วย AS เท่ากับ 13.54% อันดับสี่คือ การตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วย SS เท่ากับ 13.20% อันดับที่ทำคือ คือ การตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วย ARSS เท่ากับ 13.19% และสุดท้ายคือการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วย RAS เท่ากับ 13.00% โดยมีช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 849.98 ถึง 968.22 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

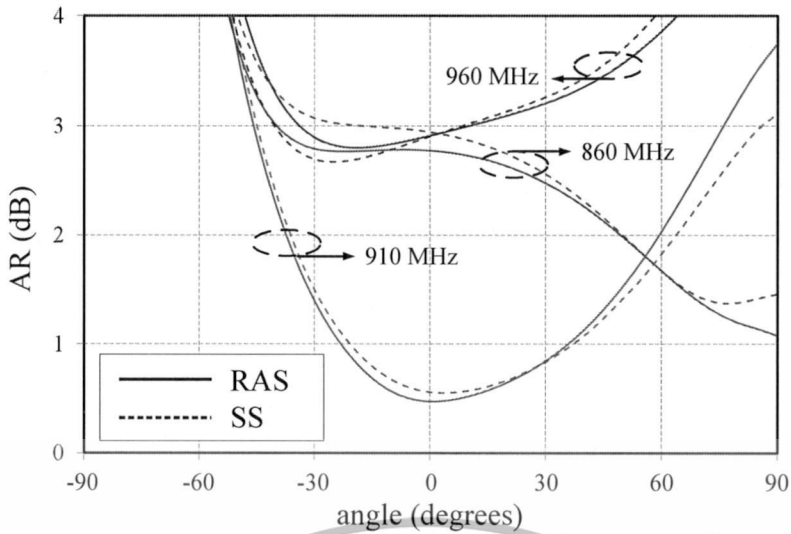
(ก) $|S_{11}|$ 

(ข) อัตราส่วนแบน

รูปที่ 4.16 ผลจำลองการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยร่องว่าง 6 รูปทรงที่ได้นำเสนอ

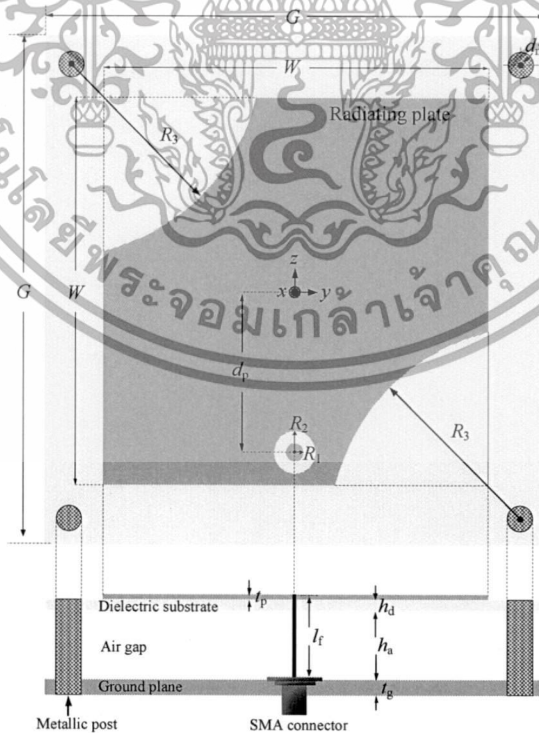
รูปที่ 4.16 (ข) คือผลจำลองช่วงกว้างอัตราส่วนแบน 3 dB ด้วยการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยร่องว่าง 6 รูปทรง พบว่า การตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วย RAS และ SS ทั้งคู่สามารถครอบคลุมระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่เอชเอฟ แต่นอกนั้นไม่สามารถครอบคลุมตามความต้องการของระบบได้ และการตัดขอบด้วย RAS มีช่วงกว้างอัตราส่วนแบนมากกว่าการตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วย SS เท่ากับ 0.4% นอกจากนี้การตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วย ARSS SS RS ITS RAS และ RS มีอัตราขยายที่ความถี่กลาง 910 MHz เท่ากับ 6.46 6.44 6.41 6.37 6.36 และ 6.32 dBic ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ผลจำลองมุมอัตราส่วนแกนระหว่างร่องว่าง RAS และ SS

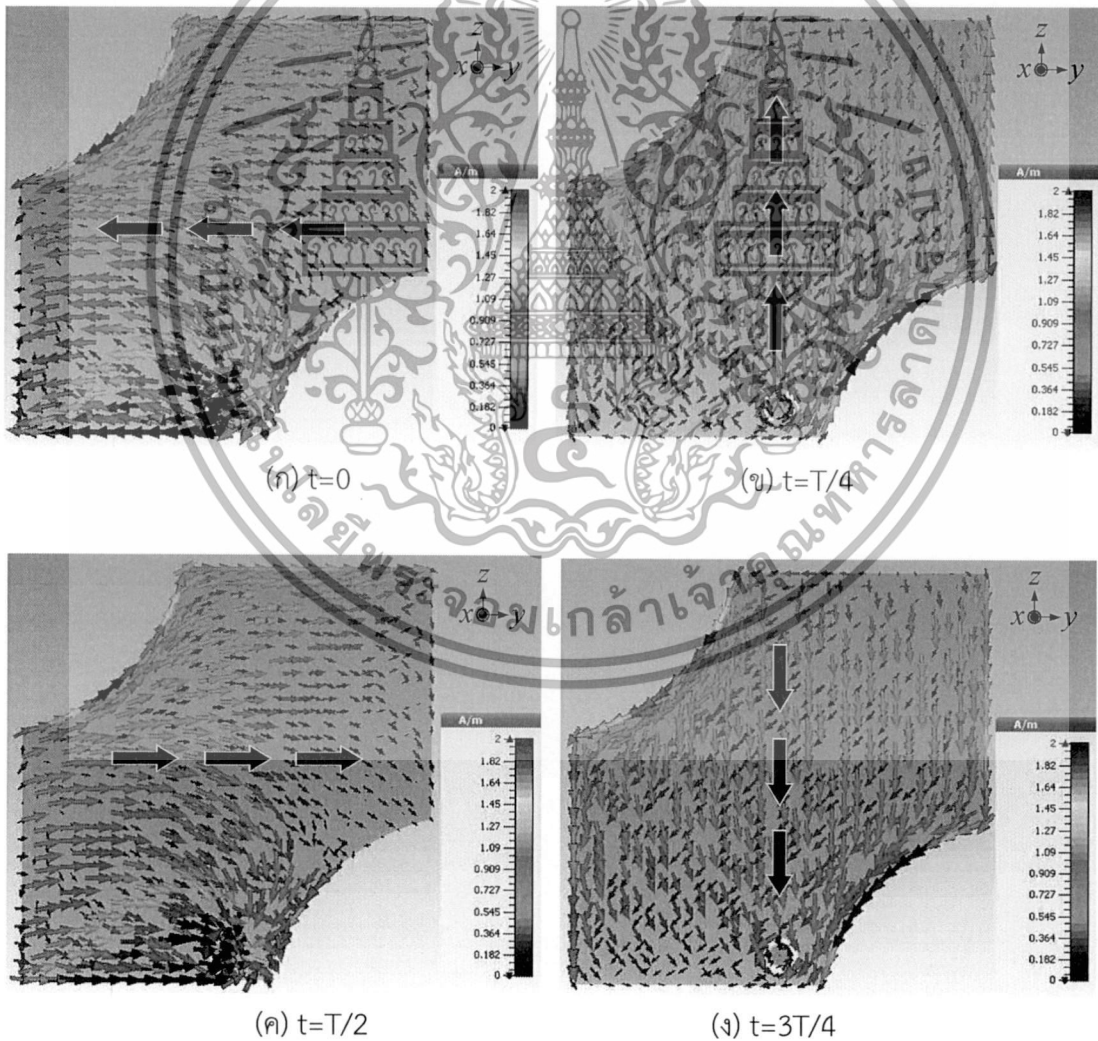
รูปที่ 4.17 คือผลจำลองอัตราส่วนแกนเปรียบเทียบช่วงความกว้างมุมระหว่างการตัดขอบมุมทั้งสองด้านของร่องว่าง RAS และ SS พบว่า ที่ความถี่ 860 MHz เท่ากับ 130.6 และ 110.0 องศา ที่ความถี่ 910 MHz เท่ากับ 131.4 และ 117.2 องศา และที่ความถี่ 960 เท่ากับ 45.3 และ 50.8 องศา โดยการตัดการขอบด้วยร่องว่าง RAS มีช่วงกว้างอัตราส่วนแกนมากกว่าที่ความถี่ 860 และ 910 MHz เท่ากับ 20.6 และ 14.2 องศา และน้อยกว่าที่ความถี่ 960 MHz เพียง 5.5 องศา



รูปที่ 4.18 โครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่วิทยุที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่วิทยุที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีโครงสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (G) เช่นเดียวกันกับแผ่นแพร่กระจายคลื่น (W) เท่ากับ 150.0 mm และ 112.2 mm มีความสูง (h_a) และการสูญเสียแทนเจนต์ ($\text{Tan}\delta$) ของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก ($\epsilon_r=3.78$) เท่ากับ 1.6 mm และ 0.04 ตามลำดับ และมีความหนา (t_g) ของแผ่นแพร่กระจายคลื่นเท่ากับ 0.03 mm สายอากาศที่ได้นำเสนอนี้เป็นโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น โดยมีความสูง (h_a) ของช่องอากาศเท่ากับ 42.0 mm แผ่นแพร่กระจายคลื่นถูกแทรกด้วยร่องว่างวงแหวนกลมซึ่งจะถูกเข้ากับโพรบลวดตัวนำไฟฟ้าความยาว (l_f) และมีตำแหน่งป้อนสัญญาณ (d_p) เท่ากับ 43.6 และ 48.0 mm สำหรับตำแหน่งป้อนสัญญาณถูกวางตามแนวตั้งของโครงสร้างสายอากาศ ในส่วนของร่องว่างวงแหวนกลม (การป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า) มีขนาดรัศมีด้านใน (R_1) และด้านนอก (R_2) เท่ากับ 2.96 และ 5.3 mm นอกจากนี้แผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยร่องว่างวงกลมกลับด้านมีรัศมี (R_3) เท่ากับ 60.0 mm และมีจุดศูนย์กลางของร่องวงกลมอยู่ตำแหน่งเดียวกันกับจุดศูนย์กลางเสาโลหะที่ใช้ร่องแผ่นแพร่กระจายคลื่นและระนาบกราวด์ตั้งรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.19 ผลจำลองการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนตัวแผ่นแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

เครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟที่ได้นำเสนอเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.19 คือผลจำลองการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนตัวแผ่นแพรกระจายคลื่น ณ เวลาที่แตกต่างกันของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่า ณ เวลา $t=0$ กระแสไฟฟ้ามีทิศทางการไหลตามแนวแกน y โดยกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านขวาไปด้านซ้ายของแผ่นแพรกระจายคลื่น (โพลาริซิงเชิงเส้นแนวนอน) มีความแรงของกระแสไฟฟ้าอยู่ด้านล่างและขอมุมที่ถูกตัดด้านบนบนซ้ายของแผ่นแพรกระจายคลื่นเท่ากับ 2 A/m ดังรูปที่ 4.19 (ก)

เวลาถัดต่อมา เมื่อ $t=T/4$ กระแสไฟฟ้ามีทิศทางการไหลตามแนวแกน z โดยกระแสไฟฟ้ามีการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบนของแผ่นแพรกระจายคลื่น (โพลาริซิงเชิงเส้นแนวตั้ง) และมีขนาดความแรงของกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ขอบมุมทั้งสองด้านที่ถูกตัดเท่ากับ 2 A/m ดังรูปที่ 4.19 (ข)

ในเวลาต่อมาที่ $t=t/2$ พบว่า กระแสไฟฟ้ามีทิศทางการไหลตามแนวแกน y โดยกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านซ้ายไปด้านขวาของแผ่นแพรกระจายคลื่น (โพลาริซิงเชิงเส้นแนวนอน) และมีขนาดความแรงของกระแสไฟฟ้าอยู่บริเวณเช่นเดียวกับรูปที่ 4.19 (ก) ดังรูปที่ 4.19 (ค)

และที่ $t=3T/4$ พบว่า กระแสไฟฟ้ามีทิศทางการไหลตามแนวแกน z โดยกระแสไฟฟ้ามีการไหลจากด้านบนลงด้านล่างของแผ่นแพรกระจายคลื่น (โพลาริซิงเชิงเส้นแนวตั้ง) และมีขนาดความแรงของกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ขอบมุมทั้งสองด้านที่ถูกตัดเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.19 (ข) และ 4.19 (ง)

จากการสังเกตรูปที่ 4.19 พบว่าลักษณะการไหลของกระแสบนแผ่นแพรกระจายคลื่นที่ได้นำเสนอประกอบด้วยโพลาริซิงเชิงเส้นแนวตั้ง (TM_{01}) และโพลาริซิงเชิงเส้นแนวนอน (TM_{10}) โดยการไหลของกระแสไฟฟ้ามีช่วงเวลาที่ต่างกัน $t=T/4$ หรือมีเฟสต่างกัน 90 องศาและเวลา $t=0$ ถึง $t=3T/4$ จะมีมีทิศทางการไหลตามเข็มนาฬิกาที่แสดงถึงสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟที่ได้นำเสนอนี้มีการแพร่กระจายคลื่นโพลาริซิงวงกลมหมุนซ้าย ในส่วนลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ เช่น $|S_{11}|$ อัตราส่วนแอมพลิจูดการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศจะถูกนำเสนอในบทต่อไปโดยการเปรียบเทียบระหว่างผลจำลองและผลการทดสอบ

4.5 บทสรุป

เทคนิควิธีการตัดขอบทั้งสองด้านของแผ่นแพรกระจายคลื่นสามารถขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแอมพลิจูด 3 dB มากกว่าเทคนิควิธีอื่นๆ และได้แนะนำเทคนิคการตัดขอบมุมมาศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยได้ศึกษาการตัดขอบมุมทั้งสองด้วยร่องว่างรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ คือ วงกลมกลับด้าน (Reverse-arc shape: RAS) วงกลม (Arc shape: AS) สามเหลี่ยมหน้าจั่ว (Isosceles-triangle shape: ITS) สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular shape: RS) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square shape: SS) และวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Annular-ring square shape: ARSS) พร้อมด้วยการป้อนสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า (ร่องวงแหวนกลม) พบว่า การตัดขอบรูปทรงเดียวกันแต่ต่างขนาดกันสามารถเพิ่มช่วงกว้างความถี่และช่วงกว้างอัตราส่วนแอมพลิจูดได้ และยังพบว่าการตัดขอบสองด้านทั้ง 6 รูปทรงที่ได้นำเสนอมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ครอบคลุมความต้องการของระบบ แต่ช่วงกว้างอัตราส่วนแอมพลิจูด 3 dB มีเพียงวงกลมกลับด้าน (RAS) และสี่เหลี่ยมจัตุรัส (SS) ที่สามารถครอบคลุมตามความต้องการของระบบได้ และร่องว่างรูปทรง RAS มีความกว้างอัตราส่วนแอมพลิจูดมากกว่าร่องว่างรูปทรง SS ซึ่งเป็นที่มาในการใช้ร่องว่างรูปทรง RAS พร้อมทั้งมีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซิงวงกลมหมุนซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟต้นแบบ

5.1 เกริ่นนำ

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟต้นแบบพร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าประกอบไปด้วย $|S_{11}|$ อัตราส่วนแอมพลิจูดการแผ่กระจายคลื่นทั้งสองระนาบ อัตราขยายสายอากาศ โดยทดสอบในห้องไร้การสะท้อน ส่วนการทดสอบหาระยะทางสูงสุดการติดต่อสื่อสารในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟได้ทำการทดสอบบนสถานที่โล่งพื้นคอนกรีตนอกจากนี้ยังได้ทดสอบเทียบกับสายอากาศมาตรฐานโพลาไรซ์เชิงเส้น และส่วนสุดท้ายของบทคือบทสรุป

5.2 สายอากาศต้นแบบ

สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่วิทยุตัวต้นแบบที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีลักษณะแผ่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้ายพร้อมแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง โดยสายอากาศต้นแบบนี้มีขนาดเท่ากับ $150 \times 150 \times 42 \text{ mm}^3$ และมีความกว้าง (W) ของแผ่นแผ่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่ากับ $112.20 \times 112.20 \text{ mm}^2$



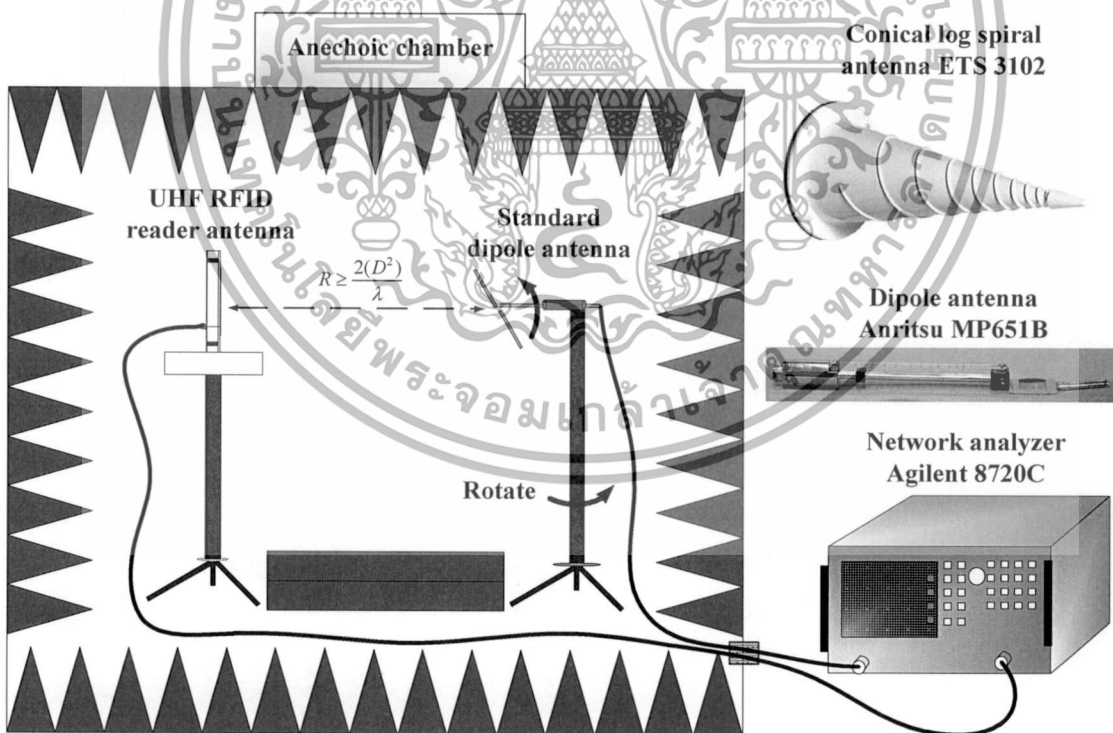
รูปที่ 5.1 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของความสูงวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริก (h_d) และความสูงของช่องว่างอากาศ (h_a) เท่ากับ 1.6 และ 42 mm ตำแหน่งกระตุ่นสัญญาณ (d_p) เท่ากับ 48 mm สำหรับร่องว่างวงกลม (การกระตุ่นสัญญาณเชิงประจุไฟฟ้า) มีขนาดรัศมีด้านใน (R_1) และด้านนอก (R_2) เท่ากับ 2.96 และ 5.30 mm และแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกตัดขอบมุมทั้งสองด้านด้วยร่องว่างวงกลมกลับด้านมีรัศมี (R_3) เท่ากับ 60 mm ดังรูปที่ 5.1

5.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ

การทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟต้นแบบ ได้อาศัยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายยี่ห้อ Agilent รุ่น 8720C สำหรับการทดสอบอัตราส่วนแอมพลิจูดการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายได้ทำการทดสอบในห้องไร้การสะท้อน (Anechoic chamber) โดยมีสายอากาศไดโพลมาตรฐาน (Standard dipole antenna) ยี่ห้อ Anritsu รุ่น MP651B ที่ความถี่ 910 MHz มีค่าอัตราขยายสายอากาศเท่ากับ 2.15 dBi ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งกำลังงาน ในส่วนของสายอากาศกรวยขดลวด (Conical log spiral antenna) ยี่ห้อ EST รุ่น 3102 จะมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางพร้อมการโพลาไรซ์วงกลมเป็นสายอากาศส่งกำลังงานเช่นเดียวกัน ถูกใช้เพื่อทดสอบและการโพลาไรซ์ของสายอากาศต้นแบบดังรูปที่ 5.2



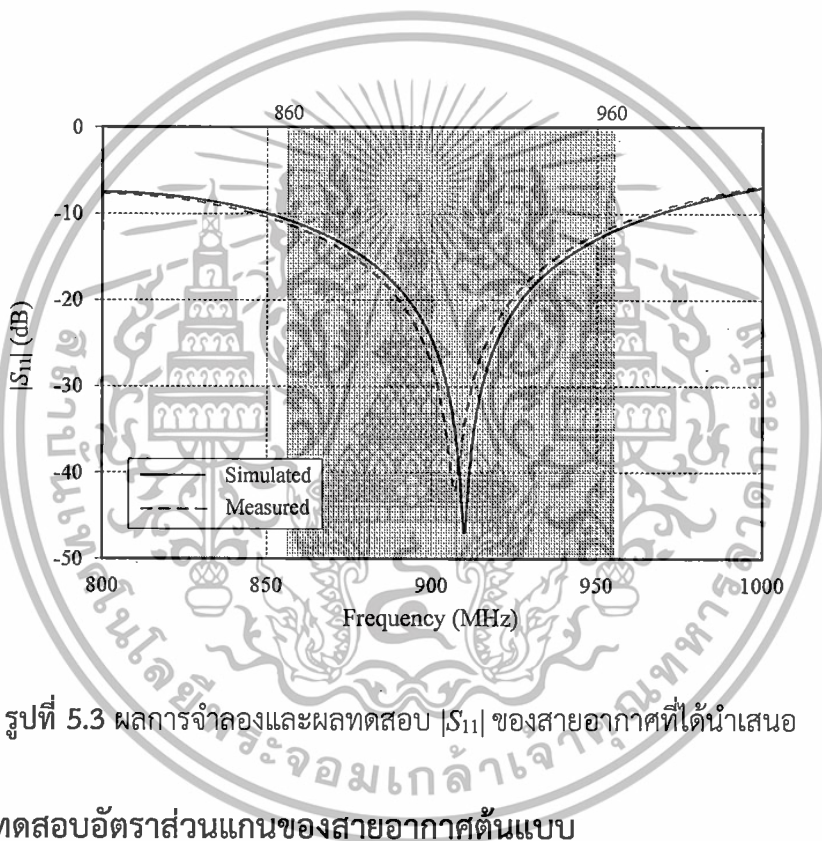
รูปที่ 5.2 การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบในห้องไร้การสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศบนพื้นที่สนามระยะไกล (R) และขนาดโครงสร้างสายอากาศเท่ากับ 150 mm ดังนั้นระยะสนามไกลที่ถูกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1.37 m

5.3.1 การทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบ

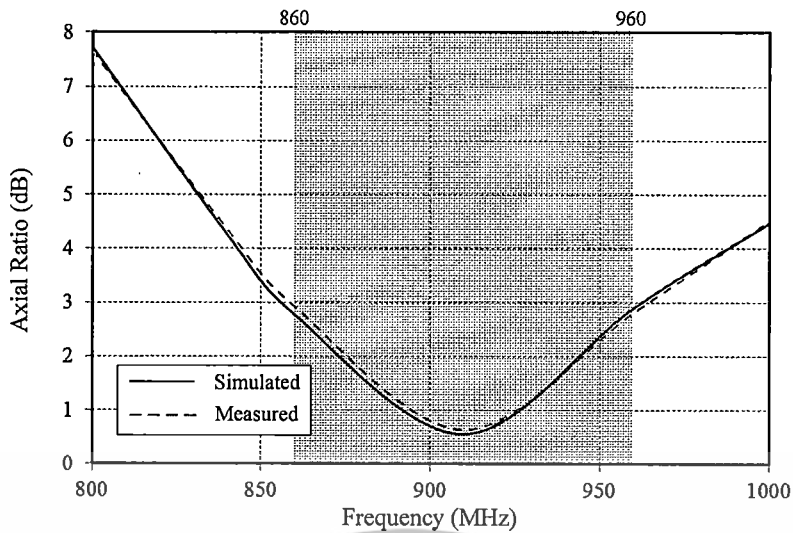
ผลจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ได้นำเสนอมีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่กลาง 910 MHz และมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ตั้งแต่ 849.98 ถึง 968.22 MHz สำหรับในส่วนของผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบมีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 906.6 MHz และมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ตั้งแต่ 846.4 ถึง 965.2 MHz ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งครอบคลุมตามความต้องการของระบบอาร์เอฟไอเดีย้นความถี่ยูเอชเอฟ



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

5.3.2 การทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศต้นแบบ

ผลการจำลองอัตราส่วนแกนพบว่า มีอัตราส่วนแกนต่ำที่สุดเท่ากับ 0.55 dB ที่ความถี่กลาง 910 MHz และมีช่วงกว้างอัตราส่วนแกนตั้งแต่ 855.20 ถึง 962.7 MHz (11.81%) ผลการทดสอบอัตราส่วนแกนได้ทำการทดสอบที่ลำคลื่นหลักหรือทิศด้านหน้า 0 องศาของสายอากาศต้นแบบที่ได้นำเสนอและเข้าสมการที่ 2.29 เพื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนแกนในแต่ละความถี่และพบว่า ที่ความถี่ 860 910 และ 960 MHz มีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 2.92 0.66 และ 2.82 dB โดยมีช่วงกว้างอัตราส่วน 3 dB เท่ากับ 11.65% (854.7 ถึง 960.8 MHz) ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ผลการจำลองและผลทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ได้นำเสนอ

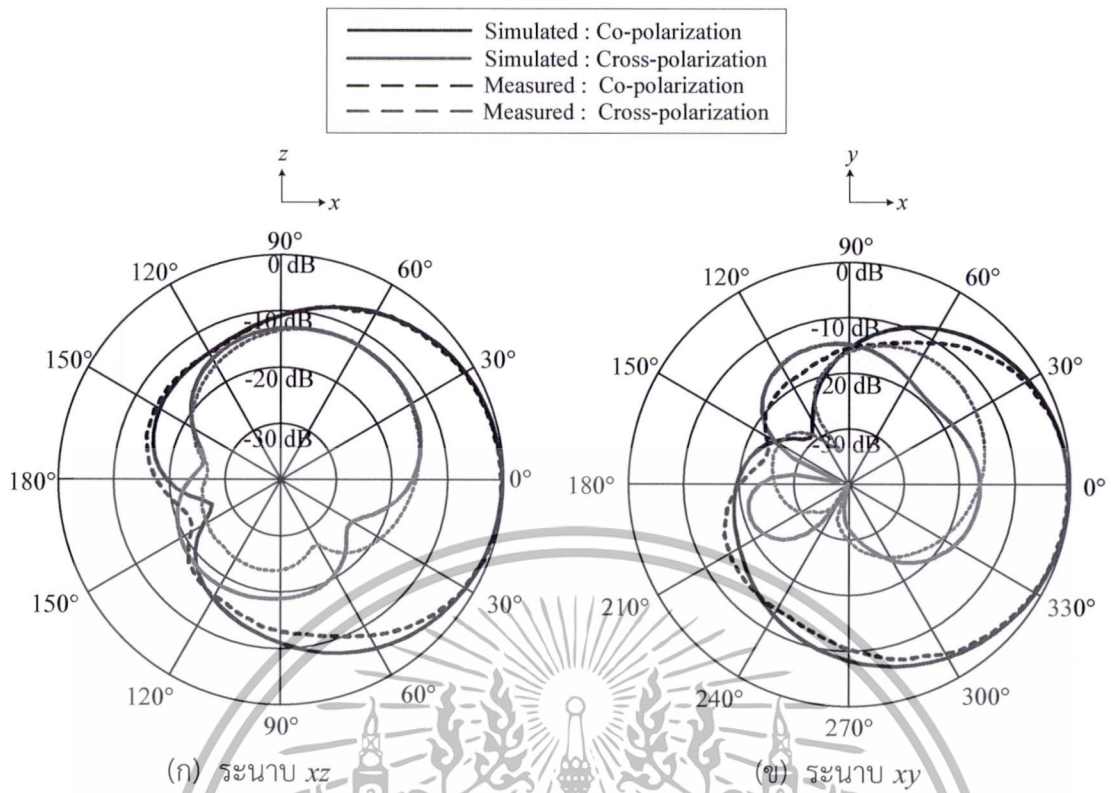
5.3.3 การทดสอบแบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ xz และ xy ประกอบไปด้วยโพลาไรซ์ร่วม (Co-polarization) มีความกว้างครึ่งกำลังของลำคลื่น (Half-power beamwidth: HPBW) และระดับโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization level) โดยแสดงดังตารางที่ 5.1 และรูป 5.5 ถึง 5.7 บนระนาบ xz และ xy ที่ความถี่ 860 910 และ 960 MHz ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางตลอดย่านความถี่ใช้งาน 860 ถึง 960 MHz

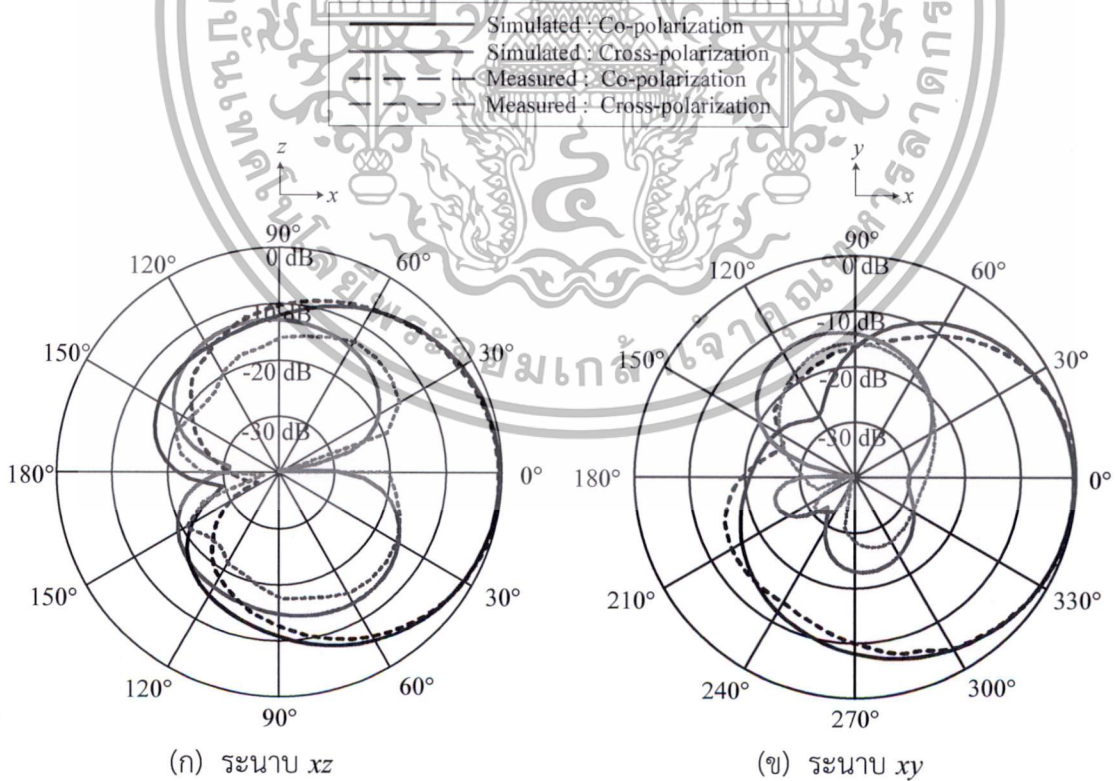
ตารางที่ 5.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้นำเสนอ บนระนาบ xz และ xy

โพลาไรซ์ระนาบ xz	ความถี่ 860 MHz		ความถี่ 910 MHz		ความถี่ 960 MHz	
	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ
HPBW (deg.)	86.9°	85.6°	84.4°	84.2°	82.3°	82.7°
CPL (dB)	-17.6 dB	-17.5 dB	-40 dB	-40 dB	-17.8 dB	-13.5 dB
โพลาไรซ์ระนาบ xy	ความถี่ 860 MHz		ความถี่ 910 MHz		ความถี่ 960 MHz	
	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ
HPBW (deg.)	95.0°	87.0°	95°	85.8°	85.6°	83.4°
CPL (dB)	-17.5 dB	-17.5 dB	-30 dB	-22.6 dB	-15.4 dB	-15.3 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

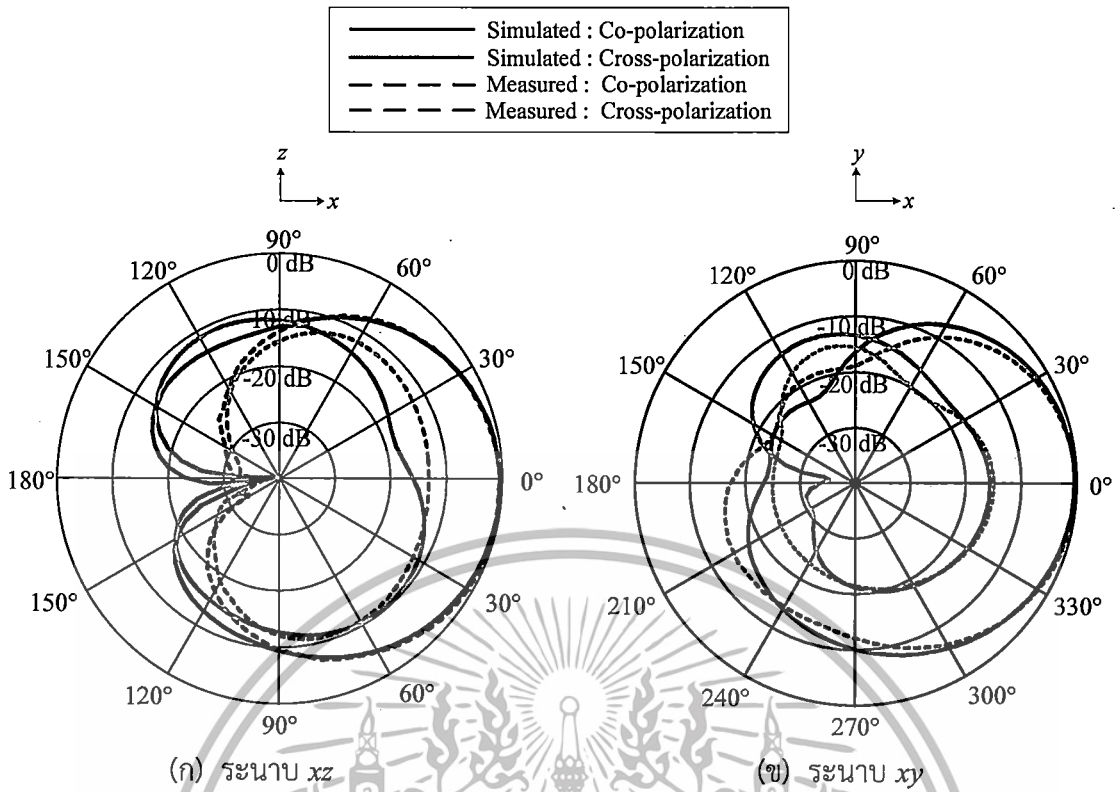


รูปที่ 5.5 ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 860 MHz



รูปที่ 5.6 ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 910 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 960 MHz

5.3.4 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

ในส่วนของการทดสอบอัตราขยายสายอากาศ ได้อาศัยสายอากาศไดโพลมาตรฐานเป็นสายอากาศส่ง (G_T) และใช้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีเป็นสายอากาศรับ (G_R) อัตราขยายสายอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.1 และ 5.2

$$G_r = P_r - P_t - G_t + L_s + L_r + L_l \quad (5.1)$$

เมื่อ

$$L_s = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (5.2)$$

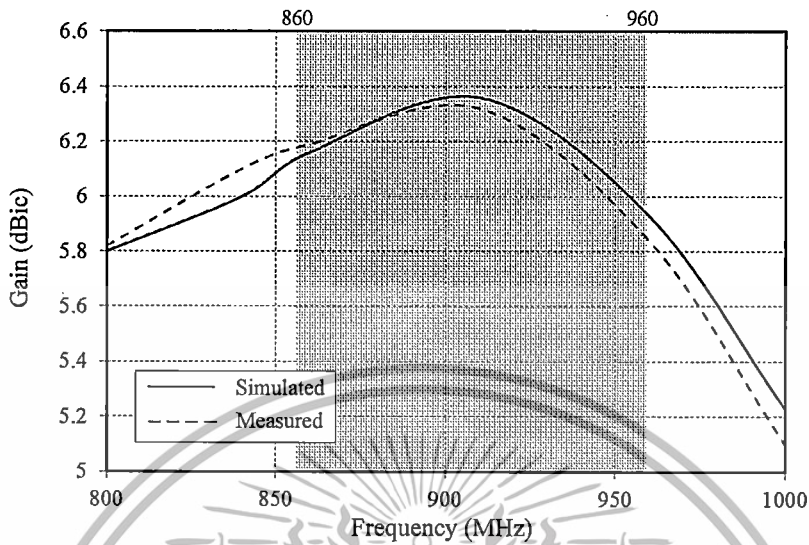
โดย P_r คือกำลังงานด้านรับ (dBm) P_t คือกำลังงานด้านส่ง (dBm) L_t คือการสูญเสียจากสายนำสัญญาณด้านส่ง (dB) L_r คือการสูญเสียจากสายนำสัญญาณด้านรับ (dB) และ L_l คือการสูญเสียจากระยะทาง (dB) และ R คือระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่ง

ผลจำลองอัตราขยายสายอากาศที่ได้นำเสนอที่ความถี่ 860 910 และ 960 MHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 6.16 6.36 และ 5.93 dBic ในส่วนของผลทดสอบอัตราขยายที่ความถี่ 860 910

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 960 MHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 6.19 6.32 และ 5.84 dBic และมีอัตราขยายเฉลี่ยที่ใช้งานในระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่เอชเอฟมากกว่า 6.10 dBic



รูปที่ 5.8 ผลจำลองและผลทดสอบอัตราขยายสายอากาศ

5.3.5 การทดสอบระยะทางการติดต่อสื่อสารอาร์เอฟไอเดียันความถี่เอชเอฟ

การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท็กในระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่เอชเอฟจะขึ้นอยู่กับระยะทางในการรับส่งข้อมูลระหว่างกันโดยอาศัยการเชื่อมต่อบนสนามระยะไกลด้วยวิธีการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscatter) สำหรับการคำนวณหาระยะทาง (R_{max}) ไกลที่สุดสามารถหาได้จากสมการที่ 5.3

$$R_{max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{reader} G_{reader} G_{tag} \chi \tau}{P_{threshold}}} \quad (5.3)$$

โดยที่ P_{reader} คือกำลังงานจากเครื่องอ่านข้อมูล G_{reader} คืออัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล G_{tag} คือ อัตราขยายสายอากาศแท็ก χ คือ สัมประสิทธิ์การแมตซ์ของโพลาริซ (Polarization matching coefficient) τ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน (Power transmission coefficient) และ $P_{threshold}$ คือ กำลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้ไอซีชิพของสายอากาศแท็กทำงานได้

หรือหาระยะทางการอ่านสูงสุด (R_{max}) ได้จากสมการที่ 5.4 [48]

$$R_{max} = 10^\alpha \text{ (m)} \quad (5.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

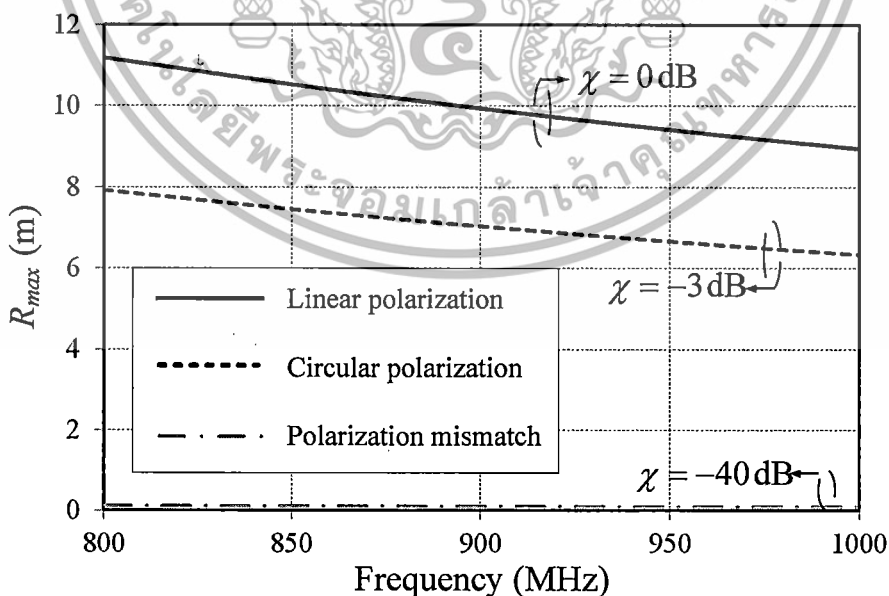
$$\alpha = 27.6 - 20 \log[f_{domain}(\text{MHz})] + P_{reader}(\text{dBm}) + G_{reader}(\text{dBi}) + \frac{G_{tag}(\text{dBi}) + \chi(\text{dB}) + \tau(\text{dB}) - P_{threshold}(\text{dBm})}{20} \quad (5.5)$$

จากสมการที่ 5.4 ถึง 5.5 ถูกคำนวณหาระยะทาง (R_{max}) สูงสุดในการติดต่อสื่อสารของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ โดยกำหนดให้สายอากาศแท่งมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง และสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอนและโพลาไรซ์วงกลม สัมประสิทธิ์การแมตช์ของโพลาไรซ์ (χ) หาได้จากสมการตัวประกอบการสูญเสียทางโพลาไรซ์ (Polarization loss factor: PLF) [8] ได้จากสมการที่ 5.6

$$PLF = |\hat{p}_w \cdot \hat{p}_a|^2 = |\cos(\text{angle polarization})|^2 \quad (5.6)$$

เมื่อ \hat{p}_w คือ เวกเตอร์ของคลื่นที่เกิดบนสนามไฟฟ้าของสายอากาศส่ง และ \hat{p}_a คือ เวกเตอร์ของคลื่นที่เกิดบนสนามไฟฟ้าของสายอากาศรับ

จากสมการที่ 5.6 พบว่า เมื่อโพลาไรซ์ตรงกันหรือเหมือนกัน ($PLF = |\cos(1)|^2$) เท่ากับ 1 จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแมตช์ของโพลาไรซ์ เท่ากับ 0 dB เมื่อโพลาไรซ์ไม่ตรงกันหรือโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน ($PLF = |\cos(90)|^2$) เท่ากับ 0 จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแมตช์ของโพลาไรซ์ เท่ากับ $-\infty$ dB หรือ ≥ -40 dB และเมื่อโพลาไรซ์ทำมุมเฉียง 45 องศา ($PLF = |\cos(45)|^2$) หรือเท่ากับ -0.5 ดังนั้นจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแมตช์ของโพลาไรซ์ เท่ากับ -3 dB หรือเป็นโพลาไรซ์วงกลม

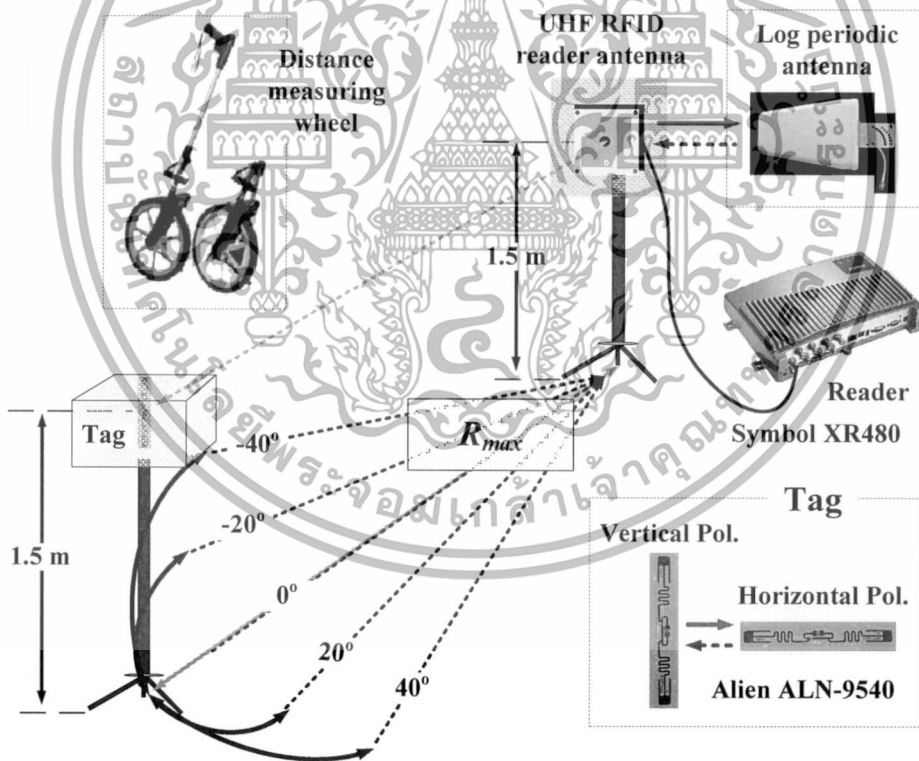


รูปที่ 5.9 ผลจำลองระยะทาง (R_{max}) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนสัมประสิทธิ์การแมตช์ของโพลาไรซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนการคำนวณได้กำหนด G_{reader} G_{tag} τ P_{reader} และ $P_{threshold}$ มีค่าคงที่ตลอดช่วงกว้างความถี่ 800 ถึง 1000 MHz โดยมีค่าอัตราขยายสายอากาศ (G_{reader}) ทั้ง 3 ตัว (ทั้ง 3 โพลาริซ) เท่ากับ 6.0 dBi และ dBiC อัตราขยายสายอากาศแท็ก (G_{tag}) เท่ากับ 1.5 dBi สัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน (τ) เท่ากับ 0 dB กำลังงานเครื่องอ่านข้อมูล (P_{reader}) เท่ากับ 30 dBm (1 Watt) และ $P_{threshold}$ เท่ากับ -14 dBm ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.9 ได้แบ่งผลจำลองหาค่าระยะทางไกลสุด (R_{max}) ออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน โดยส่วนแรก สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีมีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซเชิงเส้นแนวตั้ง ซึ่งจะแมตช์กับโพลาริซของสายอากาศแท็ก ($\mathcal{X} = 0$ dB) พบว่าระยะทางสูงสุดในการติดต่อสื่อสารมากกว่า 11.10 m ที่ความถี่ 800 MHz และระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 8.94 m ที่ 1000 MHz ระยะทางจะถูกลดลงเรื่อยๆ เมื่อความถี่สูงขึ้น สำหรับในส่วนที่สอง สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีมีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซเชิงเส้นแนวนอน ซึ่งจะไม่ตรงกับโพลาริซของสายอากาศแท็ก ($\mathcal{X} = -40$ dB) พบว่า มีระยะทางการติดต่อสื่อสารกันเพียง 0.08-0.10 m เท่านั้น และส่วนสุดท้าย สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีมีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซวงกลม ซึ่งจะมี $\mathcal{X} = -3$ dB พบว่า มีระยะทางการติดต่อสื่อสารระหว่างกันไกลที่สุดเท่ากับ 7.9 m ที่ความถี่ 800 MHz และระยะทางไกลที่สุดเท่ากับ 6.34 m ที่ความถี่ 1000 MHz



รูปที่ 5.10 การติดตั้งและทดสอบเพื่อหาระยะทาง (R_{max}) บนระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ

การทดสอบหาระยะทาง (R_{max}) ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 5.10 ประกอบไปด้วยสายอากาศแท็กยี่ห้อ Alien รุ่น ALN-9540 Squiggle ครอบคลุมย่านความถี่เอชเอฟ 860 ถึง 960 MHz ติดกับแผ่นโฟมโดยมีระยะห่างจากสายอากาศเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอ่านข้อมูลเท่ากับ R_{max} สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟได้ใช้ยี่ห้อ Symbol รุ่น XR480 มีช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 902 ถึง 928 MHz โดยการทดสอบครั้งนี้จะถูกทดสอบที่ความถี่ 910 MHz เท่านั้น และมีกำลังงานส่งออกเท่ากับ 30 dBm (1 Watt) ในส่วนของสายนำสัญญาณถูกต้องเข้าระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลโดยมีค่าสูญเสียของสายนำสัญญาณเท่ากับ 0.89 dB

วิธีการทดสอบหาระยะทาง (R_{max}) ได้นำสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลโพลาริซ์วงกลมที่ได้แนะนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ (อัตราขยาย 6.32 dBic ที่ 910 MHz) นำมาเปรียบกับสายอากาศมาตรฐานโพลาริซ์เชิงเส้นแนวตั้ง (Wideband log periodic directional antenna) ยี่ห้อ Wilson รุ่น 304411 มีช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 800 ถึง 2500 MHz มีอัตราขยายประมาณ 7.5 dBi (902 ถึง 928 MHz) พร้อมด้วยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง มี HPBW กว้างกว่า 70 องศา อัตราส่วนกำลังงานด้านหน้าต่อด้านหลัง (Front to back ratio: F/B) มากกว่า 20 dB รองรับกำลังงานได้สูงสุดถึง 100 watt และมีขนาดโครงสร้างสายอากาศเท่ากับ 290x210x65 mm³

การทดสอบหาระยะทางได้กำหนดให้สายอากาศแท็กมีการวางตำแหน่งแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน นอกจากนี้ได้จำลองให้สายอากาศแท็กมีการเคลื่อนที่ตามมุมสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลตั้งแต่มุม -40 ถึง 40 องศา โดยกำหนดให้ด้านหน้าของสายอากาศทั้งสองชี้ไปทิศทางที่มุม 0 องศาเท่านั้น และเมื่อสายอากาศที่ได้นำเสนอและสายอากาศมาตรฐานโพลาริซ์เชิงเส้นถูกต้องเข้ากับสายนำสัญญาณและเครื่องอ่านข้อมูลจะมีกำลังงานการแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิกประสิทธิภาพ (Effective isotropic radiated power: EIRP) เท่ากับ 35.47 และ 36.61 dBm

ตารางที่ 5.2 ผลทดสอบหาระยะทาง (R_{max}) ของสายอากาศที่ได้นำเสนอและสายอากาศมาตรฐานโพลาริซ์เชิงเส้น

α องศา	R_{max} (m) เมื่อสายอากาศแท็กโพลาริซ์ เชิงเส้นแนวตั้ง		R_{max} (m) เมื่อสายอากาศแท็กมีโพลาริซ์ เชิงเส้นแนวนอน	
	สายอากาศที่ได้นำเสนอ	สายอากาศมาตรฐานโพลาริซ์เชิงเส้น	สายอากาศที่ได้นำเสนอ	สายอากาศมาตรฐานโพลาริซ์เชิงเส้น
-40	3.6	3.3	3.7	0.3
-20	5.2	5.4	4.9	0.5
0	6.2	7.5	6.1	0.7
20	5.1	5.3	4.9	0.5
40	3.5	3.4	3.3	0.3

จากตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบเมื่อกำหนดให้สายอากาศแท็กวางตำแหน่งแนวแกนตั้งและปรับเปลี่ยนทิศทางมุม (α) การเคลื่อนที่ของสายอากาศแท็กตั้งแต่ช่วง -40 ถึง 40 องศา พบว่าที่ทิศทางลาคี่หลัก (0 องศา) ของสายอากาศมาตรฐานโพลาริซ์เชิงเส้นสามารถติดต่อสื่อสารได้ด้วยระยะทางที่ไกลกว่า 1.3 m เนื่องจากมีค่า EIRP ต่างกัน 1.14 dBm เมื่อสายอากาศแท็กถูกทำให้เคลื่อนที่ไปที่มุม (α) -20 และ 20 องศา สายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานเชิงโพลาริซมีระยะทางติดต่อสื่อสารได้ไกลกว่า 0.2 m แต่ในทางกลับกันที่มุม -40 และ 40 องศา สายอากาศที่ได้นำเสนอสามารถติดต่อสื่อสารด้วยระยะทางไกลกว่า 0.2-0.3 m

ส่วนที่สองเป็นการทดสอบเมื่อกำหนดให้สายอากาศที่กว้างตำแหน่งแนวแกนนอนและปรับเปลี่ยนทิศทางมุม (α) การเคลื่อนที่ของสายอากาศที่กตั้งตั้งแต่ช่วง -40 ถึง 40 องศา เช่นเดียวกันกับการทดสอบที่ผ่านมา พบว่าสายอากาศมาตรฐานโพลาริซเชิงเส้นสามารถติดต่อสื่อสารด้วยระยะทางเพียง 0.3-0.7 m เนื่องจากโพลาริซเชิงเส้นไม่ตรงกันและส่งผลทำให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารด้วยระยะทางไกลกันได้ แต่ในทางกลับกันสายอากาศที่ได้นำเสนอมีโพลาริซวงกลม ลดข้อจำกัดเรื่องโพลาริซไม่ตรงกันและยังสามารถติดต่อสื่อสารด้วยระยะทางที่ไกลระหว่างกันได้เป็นอย่างดีในทุกทิศทางมุม (α) -40 ถึง 40 องศาโดยมีระยะทางเท่ากับ 3.7 4.9 6.1 4.9 และ 3.3 m ตามลำดับ

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบขนาดโครงสร้าง คุณลักษณะทางไฟฟ้าและระยะการอ่านสูงสุดของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ

งานวิจัยที่มีมาก่อน	โครงสร้างสายอากาศ (mm^3)	ช่วงกว้างความถี่ (MHz)	ช่วงกว้างอัตราส่วนแกน (MHz)	อัตราขยาย (dBic)	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	ระยะอ่านสูงสุด (m)
[19]	150×150×32	880-1100 (22%)	900-930 (3.2%)	> 6.9	เจาะจงทิศทาง	3.33
[21]	121×126×0.8	846-1002 (15.3)	857-1023 (17.7%)	> 6.0	เจาะจงสองทิศทาง	5.50
[25]	250×250×33	758-983 (25.8%)	838-959 (13.5%)	> 8.0	เจาะจงทิศทาง	7.00
[29]	250×250×35	760-963 (25.6%)	818-964 (16.4%)	> 7.0	เจาะจงทิศทาง	7.50
[30]	90×90×4.6	904-941 (4.0%)	918-929 (1.2%)	1.0-4.0	เจาะจงทิศทาง	0.96
[34]	60×60×1.6	877-987 (11.8%)	905-935 (3.3%)	1.4	เจาะจงสองทิศทาง	2.5
สายอากาศนำเสนอ	150×150×42	846-965 (13.0%)	854.7-960.8 (11.65%)	> 5.9	เจาะจงทิศทาง	6.20

จากตารางที่ 5.4 พบว่า สายอากาศเอกสารอ้างอิง [21, 25, 29 และสายอากาศที่ได้นำเสนอ] สามารถครอบคลุมช่วงความถี่ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกน 3 dB เป็นไปตามความต้องการในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ (860 ถึง 960 MHz)

สำหรับสายอากาศเอกสารอ้างอิงที่ [25 และ 29] พบว่าสายอากาศมีขนาดโครงสร้างสายอากาศใหญ่ถึง 250×250×33 mm^3 และ 250×250×35 mm^3 นอกจากนี้ยังมีอัตราขยายสายอากาศมากกว่า 7 dBic ส่งผลทำให้มีระยะการอ่านสูงสุดมากกว่า 7 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะเดียวกัน สายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์มีขนาดโครงสร้างสายอากาศเท่ากับ $150 \times 150 \times 42 \text{ mm}^3$ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเกือบเท่าตัวเมื่อเปรียบเทียบกับเอกสารอ้างอิง [25 และ 29] โดยมีอัตราขยายมากกว่า 5.9 dBic แต่มีระยะการอ่านสูงถึง 6.2 m

และเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศเอกสารอ้างอิงที่ [19] และสายอากาศอากาศที่ได้นำเสนอ ซึ่งมีขนาดโครงสร้างที่ใกล้เคียงกันแต่ความสูงของช่องว่างอากาศ (h_a) จะต่ำกว่า 10 mm พบว่า มีระยะการอ่านสูงสุดเพียง 3.3 m เท่านั้นซึ่งน้อยกว่าเกือบเท่าตัวของสายอากาศที่ได้นำเสนอ

5.4 บทสรุป

การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟต้นแบบ ผลจากการทดสอบ $|S_{11}|$ พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ตั้งแต่ 846.4 ถึง 965.2 MHz (13%) และมีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 906.6 MHz ผลจากการทดสอบอัตราส่วนแค้นพบว่า มีช่วงกว้างอัตราส่วนแค้น 3 dB ตั้งแต่ 854.7 ถึง 960.8 MHz (11.65%) และที่ความถี่ 860 910 และ 960 MHz มีค่าอัตราส่วนแค้นต่ำที่สุดเท่ากับ 2.92 0.66 และ 2.82 dB ผลจากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ xz และ xy มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางทางและโพลาริซั่มมีความกว้างลำคลื่นมากกว่า 80 องศา ในส่วนระดับกำลังงานของโพลาริซั่มสูงถึง -13 dB ทั้งสองระนาบที่ความถี่ 860 และ 960 MHz นอกจากนี้ผลการทดสอบอัตราขยายเฉลี่ยมากกว่า 6.0 dBic ตลอดย่านความถี่ใช้งานเช่นเดียวกัน ผลจากการทดสอบหาระยะทางไกลที่สุดที่สามารถติดต่อสื่อสารบนระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟพบว่า สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ในช่วงระยะทาง 0 ถึง 6.2 m ตั้งแต่มุม -40 ถึง 40 องศาและรับได้ดีที่สุดที่มุม 0 เป็นมุมลำคลื่นหลักของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่ได้นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 เกริ่นนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ โดยใช้โครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นการตัดขอบสองด้านและป้อนเชิงประจุไฟฟ้า โดยมีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ และช่วงกว้างอัตราส่วนแบน 3 dB ที่สามารถรองรับการทำงานในย่านความถี่ยูเอชเอฟสากลตั้งแต่ 860 ถึง 960 MHz สายอากาศที่ได้นำเสนอมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโพลาริซวงกลมหมุนซ้ายและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางด้วยความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมากกว่า 80 องศาทั้งสองระนาบ (xz และ xy) นอกจากนี้มีอัตราขยายเฉลี่ยที่ใช้ในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟมากกว่า 6.1 dBic โครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้มีขนาดพอเหมาะแก่การเคลื่อนที่หรือเคลื่อนย้ายได้สะดวก และสะดวกต่อการติดตั้งด้วยขนาดมิติ $150 \times 150 \times 42$ mm³ สำหรับในสถานการณ์จำลองและการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าพบว่ามีความถี่ที่สอดคล้องกันและใกล้เคียงกัน ในส่วนของรายละเอียดของเนื้อหาในบทนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน สำหรับส่วนแรกจะกล่าวถึงการศึกษาและออกแบบสายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยถูกแบ่งออก 5 ส่วนย่อย และส่วนที่สองของบทนี้จะนำเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาสายอากาศในอนาคต

6.2 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

สำหรับส่วนแรก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เริ่มจากการศึกษาประวัติความเป็นมา โครงสร้างระบบอาร์เอฟไอดีและการนำระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ เช่นย่านความถี่ต่ำ ย่านความถี่สูง ย่านความถี่ยูเอชเอฟและย่านความถี่ไมโครเวฟ จากการศึกษาเปรียบเทียบในแต่ละย่านความถี่ใช้งานพบว่ามีความโดดเด่นที่แตกต่างกันออกไป แต่สำหรับย่านความถี่ยูเอชเอฟมีความน่าสนใจและมีประโยชน์ต่อการใช้งานในระบบห่วงโซ่อุปทาน ระบบโลจิสติกส์ และระบบการจัดการสินค้า เป็นต้น ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟมีลักษณะติดต่อสื่อสารแบบการกระจายย้อนกลับ โดยอาศัยสนามไฟฟ้าในการโอนถ่ายกำลังงานบนระยะสนามไกลหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับระบบเรดาร์ การติดต่อสื่อสารดังกล่าวควรมีโพลาริซที่ตรงต่อกันหรือเหมือนกันซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการติดต่อสื่อสารที่ดีด้วย เช่น สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีโพลาริซแบบเชิงเส้นแนวตั้งเช่นเดียวกับสายอากาศแท่ง และในทางตรงกันข้ามสายอากาศอ่านข้อมูลมีโพลาริซแบบเชิงเส้นแนวตั้ง แต่สายอากาศแท่งมีโพลาริซแบบเชิงเส้นแนวนอนเป็นที่แน่นอนประสิทธิภาพการติดต่อสื่อสารลดลงอย่างชัดเจนหรือไม่สามารถติดต่อสื่อสารกัน (โพลาริซไม่ตรงกัน) แต่อย่างไรก็ตามสามารถแก้ไขได้โดยการนำสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาริซแบบวงกลมนำมาใช้งาน แต่ทว่าประสิทธิภาพการติดต่อสื่อสารจะถูกลดลงไปครึ่งหนึ่ง นอกจากนี้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลโพลาริซแบบวงกลมยังสามารถแก้ไขปัญหาเรื่องการจางหายหลายวิถี ได้อีกด้วยจึงเป็นที่มาและความสำคัญในการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลโพลาริซวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่สองกล่าวถึงสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้นที่ถูกบ่อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอคเซียล โดยโครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้มีคุณสมบัติเด่นๆ คือ ง่ายต่อการออกแบบ สะดวกต่อการผลิตและติดตั้งใช้งาน นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาและเคลื่อนย้ายได้สะดวก แต่ในทางกลับกัน จากการจำลองผล พบว่าที่ความสูงช่องว่างอากาศเท่ากับ 26 mm มีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ เพียง 2.97% (894 ถึง 921 MHz) ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟได้ ($\geq 11\%$) และที่ความสูงช่องว่างอากาศ (h_m) ตั้งแต่ 30 ถึง 50 mm พบว่าสายอากาศโครงสร้างที่ได้นำเสนอนี้เกิดการมีสแมตซ์อิมพีแดนซ์และส่งผลกระทบต่ออัตราขยายสายอากาศ แต่ยังคงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง มีโพลาริเซชันเส้นแนวตั้งโดยมีค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 40 dB ตลอดมุมด้านของตัวสายอากาศไว้เช่นเดิม สำหรับในส่วนลำคลื่นย่อยด้านหลังของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ xz มีการเปลี่ยนแปลงเป็นลำคลื่นย่อยด้านข้างแทนเมื่อช่องว่างอากาศสูงขึ้น และระดับกำลังงานของลำคลื่นย่อยด้านหลังมีการลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมีการเพิ่มความสูงช่องว่างบนระนาบ xy สำหรับในส่วนของการมีสแมตซ์และช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ แคนนั้นสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวในส่วนต่อจากนี้

สำหรับในส่วนที่สามจะกล่าวถึงการบ่อนสัญญาณเชิงประจูปไฟฟ้าได้อาศัยร่องวงแหวนกลมแทรกลงบนแผ่นแพร่กระจายคลื่น การบ่อนสัญญาณลักษณะนี้มีความมั่นคงและแข็งแรงทางด้านกายภาพ สามารถปรับเมตซ์ได้ง่าย สามารถลดพื้นที่หรือขนาดโครงสร้างสายอากาศได้ ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง การบ่อนสัญญาณเชิงประจูปไฟฟ้าให้กับสายอากาศโครงสร้างช่องว่างระหว่างแผ่นพิมพ์สองชั้น ส่งผลทำให้สายอากาศโครงสร้างดังกล่าวเกิดการเมตซ์ซึ่งและสามารถขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ ได้ตามความต้องการของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ โดยขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ มากกว่า 11.5% หรือเพิ่มขึ้น 7 ถึง 9% เมื่อเทียบกับการบ่อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอคเซียล ในส่วนของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองระนาบและการโพลาริเซชันยังคงเดิม นอกจากนี้มีอัตราขยายสายอากาศมากกว่า 5 dBi

ส่วนที่สี่กล่าวถึงการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริเซชันวงกลมโดยการตัดขอบสองด้านสำหรับอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ ในระบบอาร์เอฟไอดีต้องการสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลโพลาริเซชันวงกลม และการตัดขอบสองด้านยังสามารถขยายช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ และช่วงกว้างอัตราส่วนแกน 3 dB ได้มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการทำโพลาริเซชันวงกลมในแบบต่างๆ สำหรับส่วนนี้ได้ทำการศึกษาและจำลองผลการตัดขอบด้วยร่องว่างรูปทรงเลขาคณิตต่างๆ พร้อมด้วยการบ่อนสัญญาณเชิงประจูปไฟฟ้า (ร่องวงแหวนกลม) โดยร่องว่างที่ใช้ตัดขอบมีจำนวน 6 รูปทรงด้วยกันคือ วงกลมกลับด้าน (RAS) วงกลม (AS) สามเหลี่ยมหน้าจั่ว (ITS) สี่เหลี่ยมผืนผ้า (RS) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (SS) และวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ARSS) ผลจำลองพบว่าการตัดขอบด้วยร่องว่างรูปทรงเดียวกันแต่ต่างขนาดกันสามารถเพิ่มช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}|$ และช่วงกว้างอัตราส่วนแกน 3 dB ได้ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า การตัดขอบสองด้านทั้ง 6 รูปทรง มีช่วงกว้างความถี่ $|S_{11}| \geq 11\%$ ครอบคลุมความต้องการของระบบอาร์เอฟไอดี แต่ช่วงกว้างอัตราส่วนแกน 3 dB มีเพียงร่องว่างวงกลมกลับด้าน (RS) และร่องว่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส (SS) ที่สามารถครอบคลุมความถี่ตามความต้องการของระบบได้ โดยมีช่วงกว้างอัตราส่วนแกน 3 dB เท่ากับ 11.81% (855.2 ถึง 962.7 MHz) สำหรับ RS และ 11.31% (855.75-959.10 MHz) สำหรับ SS นอกจากนี้ร่องว่างรูปวงกลมกลับด้านยังมีมุมอัตราส่วนแกนของด้านหน้าตัวสายอากาศกว้างกว่าร่องว่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ความถี่ 860 เท่ากับ 20.6 องศา และที่ความถี่ 910 MHz เท่ากับ 14.2 องศา สายอากาศที่ถูกตัดขอบสองด้านด้วยร่องว่างวงกลมกลับด้านมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการใดๆ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดเท่ากับ 0.55 dB ที่ความถี่ 910 MHz มีแบบแผนรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางทั้งสองระนาบพร้อมด้วยโพลาริซวงกลมหมุนซ้ายและมีอัตราขยายมากกว่า 6.3 dBic ที่ความถี่ 910 MHz

และส่วนสุดท้ายกล่าวถึง การทดสอบลักษณะทางไฟฟ้าของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียันความถี่ยูเอชเอฟต้นแบบ ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ พบว่ามีช่วงกว้างความถี่ตั้งแต่ 846.4 ถึง 965.2 MHz (13%) และรีโซแนนซ์ที่ความถี่ 906.6 MHz ผลการทดสอบอัตราส่วนแอมพลิจูดพบว่ามีช่วงกว้างอัตราส่วนแอม 3 dB ตั้งแต่ 854.7 ถึง 960.8 MHz (11.65%) และมีค่าอัตราส่วนแอมที่ความถี่ 860 MHz เท่ากับ 2.92 dB มีค่าอัตราส่วนแอมที่ความถี่ 910 MHz เท่ากับ 0.66 dB และมีค่าอัตราส่วนแอมที่ความถี่ 960 MHz เท่ากับ 2.82 dB ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ xz และ xy พบว่ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทางทางและความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของโพลาริซร่วมมากกว่า 80 องศา ในส่วนระดับกำลังงานของโพลาริซชี้ไว้เพียง -13 dB ที่ความถี่ 960 MHz นอกจากนี้ผลการทดสอบอัตราขยายเฉลี่ยพบว่ามีมากกว่า 6.0 dBic ตลอดย่านความถี่ใช้งานบนระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่ยูเอชเอฟ ผลจากการทดสอบหาระยะทางไกลที่สุดที่สามารถติดต่อสื่อสารบนระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่ยูเอชเอฟพบว่า สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ในช่วงระยะทาง 0 ถึง 6.2 m ถึงแม้ว่าสายอากาศแท็กมีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งมุม -40 ถึง 40 องศาและเปลี่ยนโพลาริซก็ตาม

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอเดียันความถี่ยูเอชเอฟที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อด้อยอยู่ 2 ประการหลักคือ มีอัตราขยายไม่สูงมากนัก (ปานกลาง) และมีระดับกำลังงานของโพลาริซชี้สูงส่งผลทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างระนาบ xz และ xy กันเกิดขึ้น สำหรับปัญหาแรก สามารถปรับปรุงและการเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศมีเทคนิควิธีที่น่าสนใจอยู่ 2 เทคนิคหลักๆ คือเทคนิคแรกออกแบบสายอากาศที่ได้นำเสนอให้เป็นสายอากาศต่อแถบลำดับ (Array antenna) ด้วยเทคนิควิธีนี้ส่งผลทำให้สายอากาศมีโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นเป็นเท่าตัวและยุ่งยากต่อการสร้างและออกแบบ โดยมีวงจรถ่วงกำลังงานนำมาใช้งานร่วมกับสายอากาศ นอกจากนี้และยังทำให้ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของโพลาริซร่วมแคบลง แต่ด้วยเทคนิควิธีนี้จะสามารถแก้ไขปัญหาระดับกำลังงานของโพลาริซชี้ให้ต่ำลงได้ สำหรับเทคนิควิธีที่สองการเพิ่มอัตราขยายสายอากาศสามารถออกแบบแผ่นตัวนำบนระนาบกราวด์ให้มีรูปทรงต่างๆ เช่นรูปทรงเรขาคณิต วงกลม สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม ห้าเหลี่ยม เป็นต้น วิธีนี้เรียกว่า EBG (Electromagnetic band gap) หรือ AMC (Artificial magnetic conductor) มีความสามารถเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศได้ด้วยเช่นกัน สำหรับปัญหาที่สองระดับกำลังงานของโพลาริซชี้สูงเกิดจากการป้อนสัญญาณด้วยโพรบโคแอกเซียล การปรับปรุงการป้อนสัญญาณดังกล่าวทำได้ยากมากนอกจากเปลี่ยนเทคนิควิธีป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณใหม่ตั้งที่เสนอไว้ในบทที่ 3 เช่นการป้อนสัญญาณด้วยรูปตัวแอล ตัวเอฟ ตัวที หรือ การป้อนสัญญาณแบบเชื่อมต่อร่วมช่องเปิด เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Roberti M. "The History of RFID Technology." [Online]. Available: <http://www.rfidjournal.com/articles/pdf?1338>. Jan. 2005.
- [2] Banks J., Hanny D., Pachano M.A. and Thompson L. G. **RFID Applied**. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [3] Curty J. -P., Declercq M., Dehollain C. and Joehl N. **Design and Optimization of Passive UHF RFID System**. US: Springer, Inc. 2007.
- [4] Finkenzeller K. **RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication**. 3rd ED. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc. 2010.
- [5] Dobkin D. M. **The RF in RFID Passive UHF in Practice**. Boston: Elsevier, Inc. 2008.
- [6] Kumar G. and Ray K. P. **Broadband Microstrip Antennas**. Boston, USA: Artech House Inc., 2003.
- [7] Garg R., Bhartia P., Bahl I. and Ittipiboon A. **Handbook: Microstrip Antenna Design**. Boston, USA: Artech House, Inc., 2001.
- [8] Balanis C. A. **Antenna Theory Analysis and Design**. 3rd ED. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc. 2010.
- [9] Wong K. -L. **Compact and Broadband Microstrip Antenna**. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [10] Lee J. M., Kim N. S. and Pyo C. S. "A Circular Polarized Metallic Patch Antenna for RFID Reader." **Proc. of IEEE Asia-Pacific Conference on Communications**, Oct. 2005. pp. 116-118.
- [11] Chen Z. N. and Chia M. Y. W. "Broadband Suspended Plate Antenna with Probe-Fed Strip." **Proc. of IEE Microwaves Antennas and Propagation**, Aug. 2001. pp. 37-40.
- [12] Laohapensaeng T. and K. Boonying "Dual-Polarized Microstrip Antenna with High Isolation using an Inserted Slot." **Proc. of IEEE Intelligent Signal Processing and Communications Systems International Symposium**, Dec. 2011. pp. 1-5.
- [13] Phongcharoenpanich C., Boonying K. and Kosulvit S. "Dual-Polarized Flat Rectenna for 2.45 GHz." **Proc. of IEEE Antennas and Propagation in Wireless communications**. Sep. 2013. pp. 1433-1436.
- [14] Granholm J. and Woelders K. "Dual Polarization Stacked Microstrip Patch Antenna Array with Very Low Cross-Polarization." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**. Aug. 2001. pp. 1393-1402.
- [15] Waterhouse R. B. "Design of Probe-Fed Stacked Patches." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**. Aug. 1999. pp. 1767-1771.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] GS1. "Regulatory Status for Using RFID in the EPC Gen 2 Band (860 to 960 MHz) of the UHF Spectrum." [Online]. Available: http://www.gs1.org/docs/epcglobal/UHF_Regulations.pdf. Oct. 2014
- [17] Aguirre J. I. "EPCglobal: A Universal Standard." Mater Thesis of Massachusetts Institute of Technology. 2007.
- [18] Mak C. L., Luk K. M., Lee K. F. and Chow Y. L. "Experimental Study of A Microstrip Patch Antenna with An L-Shaped Probe." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**. May. 2000. pp. 777-783.
- [19] Sim C. and Chi Ch.-J. "A Slot Loaded Circularly Polarized Patch Antenna for UHF RFID Reader." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**. Jul. 2012, pp. 4516-4521.
- [20] Ooi, B. L., Lee C. L., Kooi P. S. and Chew S. T. "A Novel F-probe Fed Broadband Patch Antenna." **Proc. of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**. Jul. 2001. pp. 474-477.
- [21] Lu J. -H. and Wang S. -F. "Planar Broadband Circularly Polarized Antenna with Square Slot for UHF RFID Reader." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**. Sep. 2012. pp. 45-523
- [22] Mak C. L., Lee K. F. and Luk K. M. "Broadband Patch Antenna with T-Shape Probe," **Proc. IEEE Microwaves Antennas and Propagation**. Apr. 2000. 73-76.
- [23] Yang X. H. and Shafai L. "Characteristics of Aperture Coupled Microstrip Antennas with Various Radiating Patches and Coupling Apertures." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**, Jan 1995. pp. 72-78.
- [24] Lee J. -K., Ahn Ch. -H. and K. Chang. "Broadband Circularly Polarized Aperture-Coupled Microstrip Antenna with Dual-Offset Feedlines." **Proc. of IEEE Antennas and Propagation International Symposium**. Jul. 2011. pp. 1127-1130.
- [25] Wang Z., Fang S., Fu S. and Jia S. "Single-Fed Broadband Circularly Polarized Stacked Patch Antenna with Horizontally Meandered Strip for Universal UHF RFID Applications." **IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques**. Mar. 2011. pp. 1066-1073.
- [26] Kasabegoudar V. G. and Vinoy K. J. "Coplanar Capacitively Coupled Probe Fed Microstrip Antennas for wideband Applications." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**. Jul. 2010. pp. 3131-3138.
- [27] Mayhew -R. G., Odendaal J. W. and Joubert J. "Single-Layer Capacitive Feed for Wideband Probe Microstrip Antenna Elements." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**. Jul. 2003. pp. 1405-1407.

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [28] Son H. W. "Design of Dual-Polarised Microstrip Antenna with High Isolation using Capacitive Feeds." **Electronics Letters**. May. 2009. pp. 533-534.
- [29] Chen Z. N., Qing X. and Chung H. L. "A Universal UHF RFID Reader Antenna." **IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques**. Mar. 2009. pp. 1275-1282.
- [30] Nasimuddin, Chen Z. N. and Qing X. "Asymmetric-Circular Shaped Slotted Microstrip Antennas for Circular Polarization and RFID Applications." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**. Dec. 2010. pp. 3821-3828.
- [31] Agarwal K., Nasimuddin and Alphones A. "RIS-base compact circularly polarized microstrip antennas." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**. Nov. 2012. pp. 547-554.
- [32] Nasimuddin, Qing X. and Chen Z. N. "Compact Asymmetric-Slit Microstrip Antennas for Circular Polarization." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**. Nov. 2010. pp.285-288.
- [33] Lu J. -H., Yu H. -Ch. and Wong K. -L. "Compact Circular Polarisation Design for Equilateral-Triangular Microstrip Antenna with Spur Lines." **Electronics Letters**. Oct. 1988. pp. 1989-1990.
- [34] Lin Y. -F., Wang Y. -K., Chen H. -M. and Yang Zh. -Z. "Circularly Polarized Crossed Dipole Antenna with Phase Delay Lines for RFID Handheld Reader." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**. Dec. 2011. pp. 1221-1227.
- [35] Lin Y. -F., Chen H. -M., Chu F. -H. and Pan S. -C. "Bidirectional Radiated Circularly Polarised Square-Ring Antenna for Portable RFID Reader." **Electronics Letters**. Nov. 2008. pp. 1383-1384.
- [36] "CST Microwave Studio" (User's Manual, 2011)
- [37] Drabowitch S., Papiernik A., Griffiths H., Encinas J. and Smith B. L. **Modern Antenna**. Cambridge, UK: Chapman & Hall, Inc. 1998.
- [38] Abboud F., Damiano J. P. and Papiernik A. "Accurate Model for The Input Impedance of Coax-Fed Rectangular Microstrip Antenna with and without Air gaps." **Proc. of International Conference Antennas and Propagation**. Apr. 1989. pp. 102-106.
- [39] Abboud F., Damiano J. P. and Papiernik A. "A New Model for Calculating the Input Impedance of Coax-Fed Circular Microstrip Antenna with and without Air gaps." **IEEE Trans. Antennas and Propagation**. Nov. 1990. pp. 1882-1885.
- [40] Chattopadhyay S., Biswas M., Siddiqui J. Y. and Guha D. "Input Impedance of Probe-Fed Rectangular Microstrip Antenna with Variable Air Gap and Varying Aspect Ratio." **Proc. of Microwaves Antennas and Propagation**. Dec. 2009. pp.

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของงานวิจัยสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [41] Shambavi K. "Gain and Bandwidth Enhancement Technique in Square Microstrip Antenna for WLAN Applications." *Proc. of IEEE Asia-Pacific Microwave Conference*. Dec. 2007. pp. 1-4, 2007.
- [42] Budayawan K., Isa M., Ismail A. and Azmir R. S. "Implementation Model of Rectangular Microstrip Antenna with multilayer Air gap." *Proc. of IEEE RF and Microwave Conference*. Dec. 2011. pp. 274-277.
- [43] ไม่นอย ไกรฤกษ์. วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า. บริษัท พิมพ์สวย, จำกัด. 2537.
- [44] Balanis C. A. *Advanced Engineering Electromagnetics*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc. 2012
- [45] Hall P.S. "Probe compensation in thick microstrip patches." *Electronics Letters*. May. 1987. pp. 11:606-607.
- [46] Anguera J., Puente C., Borja C., Font G., and Soler J. "A systematic method to design single-patch broadband microstrip patch antennas." *Microwave and Optical Technology Letters*. Nov. 2001. 185-188.
- [47] Kirschning M., Jansen R.H. and Koster N. H. L. "Measurement and Computer-Aided Modeling of Microstrip Discontinuities by an Improved Resonator Method." *Proc. of IEEE Microwave International Symposium Digest*. May. 1983. Pp. 495-497.
- [48] Chen Z. N. *Antennas for Portable Devices*. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc. 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายคมกฤษ บุญยิ่ง
 วัน เดือน ปีเกิด 8 พฤศจิกายน 2525
 ที่อยู่ 63 ถนนโชติพันธ์ หมู่ที่ 15 ตำบลสำโรง อำเภอกุฑมพรพิสัย
 จังหวัดศรีสะเกษ 33120

ประวัติการศึกษา
 ปริญญาตรี สำเร็จการศึกษา พ.ศ.2551 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ปริญญาโท สำเร็จการศึกษา พ.ศ.2554 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะบัณฑิตวิทยาลัย
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ความชำนาญเฉพาะด้าน สายอากาศโครงสร้างแผ่นพิมพ์

ประสบการณ์การทำงาน พ.ศ.2551-2553 ช่างเทคนิคห้องปฏิบัติการสื่อสารโทรคมนาคม
 ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

วารสารที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] K. Boonying and C. Phongcharoenpanich, "Circularly-polarized capacitively-fed UHF-RFID antenna with truncated reverse-arc shape," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications (JEMWA 2015)*, Taylor & Francis, Sep 2015. pp. 2052-2065.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] K. Boonying, C. Phongcharoenpanich, and, S. Kosulvit, "Dual-band circular plate antenna with annular-ring slot and four-paired rectangular slots," *International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2013)*, Krabi, May 2013. pp. 1-4.
- [2] K. Boonying and, C. Phongcharoenpanich, "Polarization reconfigurable suspended antenna using RF switches and P-I-N diodes," *Joint International Conference on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering 2014 (JICTEE2014)*, Chiang Rai, Mar. 2014. pp. 1-4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้