

สายอากาศไมโครสตริปโพลาไรซ์วงกลมเหนือแผ่นตัวนำแม่เหล็กเทียม

CIRCULARLY POLARIZED MICROSTRIP ANTENNA SUSPENDED
WITH ARTIFICIAL MAGNETIC CONDUCTORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-D-018-197

สายอากาศไมโครสตริปโพลารไรซ์วงกลมเหนือแผ่นตัวนำแม่เหล็กเทียม

CIRCULARLY POLARIZED MICROSTRIP ANTENNA SUSPENDED
WITH ARTIFICIAL MAGNETIC CONDUCTORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-D-018-197

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CIRCULARLY POLARIZED MICROSTRIP ANTENNA SUSPENDED
WITH ARTIFICIAL MAGNETIC CONDUCTORS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013
KMITL-2013-EN-D-018-197

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศไมโครสตริบโพลารไรซ์วงกลมเหนือแผ่นตัวนำแม่เหล็กเทียม
Thesis Title Circularly Polarized Microstrip Antenna Suspended with Artificial Magnetic Conductors
นักศึกษา นายสัญญาชัย เอียดปราบ
รหัสประจำตัว 50060015
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-D-018-197

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.โมไนย	ไกรฤกษ์	
ผศ.ดร.ทับทิม	อ่างแก้ว	
ศ.ดร.ประยุทธ์	อัครเอกตามลิน	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
รศ.ดร.ชวรงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2556 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น (E12) ห้อง E12-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น วันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2556
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศไมโครสตริปโพลาริซวงกลมเหนือแผ่นตัวนำแม่เหล็กเทียม
นักศึกษา	นายสัญญา เอียดปราบ
รหัสนักศึกษา	50060015
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศไมโครสตริปโพลาริซวงกลมเหนือแผ่นตัวนำแม่เหล็กเทียม (Artificial Magnetic Conductors) สำหรับเทคนิคการกระตุ้นหลายจุดป้อนนั้นสามารถช่วยให้สายอากาศไมโครสติปสร้างโพลาริซวงกลมที่มีสมรรถนะสูงโดยใช้การจัดวางจุดป้อนที่เหมาะสม ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่กระตุ้นด้วยสี่จุดป้อน แม้ว่าสายอากาศจะมีโพลาริซวงกลมที่มีสมรรถนะสูงแต่คุณสมบัติอื่นของสายอากาศนั้นยังไม่ดีเท่าที่ควร โดยเฉพาะ ช่วงกว้างความถี่ อัตราขยายและประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ ดังนั้นการปรับปรุงคุณสมบัติสายอากาศโดยการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบ suspended layer กับตัวนำแม่เหล็กเทียมจึงถูกนำเสนอ โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสวงกลม และแปดเหลี่ยมจะถูกออกแบบและนำไปประยุกต์ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเพื่อเพิ่มสมรรถนะของสายอากาศ การจำลองสายอากาศให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับความต้องการ และเมื่อนำโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่นำเสนอนี้มาประยุกต์ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปวงกลม ซึ่งพบว่า ช่วงกว้างความถี่และประสิทธิภาพรวมของสายอากาศนั้นดีขึ้น จึงส่งผลให้อัตราขยายของสายอากาศสูงนั้นขึ้นไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าสมรรถนะของการโพลาริซวงกลมนั้นดียิ่งขึ้น โดยมีความกว้างลำคลื่นที่สายอากาศมีการโพลาริซวงกลมที่กว้างและมีอัตราส่วนแกนที่ดี สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ model-O ได้ถูกเลือกเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบสำหรับการยืนยันผลการจำลอง โดยที่ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศนั้นครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการ โดยมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 36.65 % จากความถี่ 2.45 GHz ส่วนโพลาริซวงกลมของสายอากาศสามารถเลือกได้ว่าจะให้มีโพลาริซแบบหมุนขวาหรือหมุนซ้าย โดยที่ความกว้างลำคลื่นที่อัตราส่วนแกนของสายอากาศมีโพลาริซวงกลมที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่า 120° และค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 5.19 dBic ส่วนค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสายอากาศที่ได้จากการจำลองนั้นมีเท่ากับ 6.87 dBic ตลอดช่วงกว้างความถี่ 2.3 ถึง 2.6 GHz ซึ่งเป็นช่วงกว้างความถี่ที่นำมาใช้ประโยชน์ของตัวนำแม่เหล็กเทียม

Thesis Title	Circularly Polarized Microstrip Antenna Suspended with Artificial Magnetic Conductors
Student	Mr. Sanchai Eardprab
Student ID.	50060015
Degree	Doctoral of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

The proposed antenna is a circular microstrip structure excited by four feeds and suspended with artificial magnetic conductors (AMCs). The multi-feed circular microstrip antennas can generate a high circularly polarized performance by using a different feed arrangements. The study of a circular microstrip antenna excited by four feeds is performed. Despite the high circularly polarized performance, the other characteristics of the antenna are not good enough for the specific application, especially the impedance bandwidth, antenna gain and total efficiency. Therefore, the circular microstrip antenna suspended with AMCs is proposed to enhance the antenna performance. AMC structures with a square, circular, or octagonal patch on a unit cell are designed and applied to circular microstrip patch antennas for the enhancement of antenna performance. It is found that simulated results of the proposed antenna are well suited. The properties of wide beamwidth with good axial ratio, wider bandwidth and higher antenna gain can be achieved when applying the proposed AMC structures to circular microstrip antennas. The antenna with the AMC model-O compromises the formers and is employed in this study. Finally, the antenna prototype was fabricated to validate simulated results. It is found that the bandwidth covers 36.65% at the operating frequency of 2.45GHz. The left-handed circular polarization (LHCP) or right-handed circular polarization (RHCP) can be achieved by using proper phase arrangement for each feed point. The measurement of axial ratio beamwidth is larger than 120° . The measured and simulated average gains are 5.19 dBic and 6.87 dBic, respectively, in the frequency range of 2.3 – 2.6 GHz that is the useful bandwidth of AMCs.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณ รศ.ดร.दनัย ต.รุ่งเรือง และ รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร ที่ได้ช่วยในด้านวิชาความรู้ แนะนำ ตรวจสอบ ที่มีประโยชน์ในงานวิจัย ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกคนที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้กับบิดาและมารดาของข้าพเจ้า และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สัญญา เอียดปราบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	4
บทที่ 2 สายอากาศไมโครสตริป.....	5
2.1 สายอากาศไมโครสตริป.....	5
2.1.1 สายอากาศไมโครสตริปวงกลม.....	8
2.1.2 ความนำไฟฟ้า.....	10
2.1.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง.....	11
2.1.4 อิมพีแดนซ์อินพุตที่ความถี่เรโซแนนซ์.....	11
2.1.5 ตัวประกอบเชิงคุณภาพ.....	12
2.2 สายอากาศไมโครสตริปโพลาริซวงกลม.....	13
2.3 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อน.....	15
2.4 การศึกษาพารามิเตอร์สายอากาศ.....	28
2.4.1 ขนาดของแผ่นตัวนำวงกลม.....	28
2.4.2 ความหนาของวัสดุฐานรอง.....	32
2.4.3 ขนาดวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์.....	34
2.4.4 ตำแหน่งจุดป้อน.....	38
2.5 สรุป.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้โครงสร้างแบบ suspended layer.....	44
3.1 งานวิจัยที่มีมาก่อน.....	44
3.2 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนโครงสร้างแบบ suspended layer.....	46
3.3 การศึกษาพารามิเตอร์สายอากาศ.....	53
3.3.1 ความสูง Suspended layer.....	53
3.3.2 ขนาดแผ่นระนาบกราวด์.....	56
3.3.3 ขนาดของแผ่นตัวนำวงกลม.....	60
3.4 สรุป.....	63
บทที่ 4 การปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้ระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม.....	65
4.1 งานวิจัยที่มีมาก่อน.....	65
4.2 การออกแบบระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย.....	68
4.2.1 ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์และตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์.....	69
4.2.2 ตัวนำแม่เหล็กเทียม.....	72
4.2.3 ช่วงกว้างความถี่เฟสการสะท้อนของตัวนำแม่เหล็กเทียม.....	74
4.2.4 การออกแบบตัวนำแม่เหล็กเทียม.....	77
4.3 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนระนาบตัวนำ แม่เหล็กเทียม.....	78
4.4 สรุป.....	86
บทที่ 5 การสร้างและทดสอบ.....	87
5.1 สายอากาศต้นแบบ.....	87
5.2 การทดสอบ.....	89
5.3 สรุป.....	93

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์.....	94
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	94
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	97
เอกสารอ้างอิง.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	103



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ความต้องการของสายอากาศ.....	4
2.1 ค่าของ X_{nm} บางค่าที่นำมาใช้.....	9
2.2 ค่าระยะเชิงมุมที่ทำให้เกิดโหมดต่างๆและมีการโพลาริซวงกลม.....	14
2.3 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างๆ ที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz.....	19
2.4 พารามิเตอร์ของสายอากาศตั้งต้น.....	27
2.5 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ.....	30
2.6 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่างๆ โดยมีความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz.....	33
2.7 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ขนาดต่างๆ ที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz.....	35
2.8 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีตำแหน่งจุดป้อนต่างๆ ที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz.....	39
3.1 พารามิเตอร์ตั้งต้นของสายอากาศ.....	48
3.2 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz.....	48
3.3 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer เมื่อศึกษาผลกระทบของความสูง suspended layer ที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz.....	54
3.4 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer ศึกษาขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์ที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz.....	57
3.5 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ.....	61
4.1 ความต้องการของระบบ.....	69
4.2 พารามิเตอร์ของตัวนำแม่เหล็กเทียมเมื่อศึกษาผลกระทบของ H_{amc}	74
4.3 พารามิเตอร์ของตัวนำแม่เหล็กเทียมเมื่อศึกษาผลกระทบของ H_{air}	75
4.4 พารามิเตอร์ของตัวนำแม่เหล็กเทียมเมื่อศึกษาผลกระทบของ W_{gap}	76
4.5 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz.....	85
5.1 พารามิเตอร์สายอากาศไมโครสตริปวงกลมต้นแบบ.....	87
6.1 พารามิเตอร์สายอากาศไมโครสตริปวงกลมต้นแบบ.....	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การสื่อสารในสภาวะแวดล้อมแบบแบบหลากหลายวิถีและจางหาย.....	1
1.2 โครงสร้างพื้นผิวตัวสะท้อน.....	2
2.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	5
2.2 วิธีกระตุ้นของสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ.....	6
2.3 วงจรสมมูลของวิธีกระตุ้นของสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ.....	7
2.4 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม.....	8
2.5 การวางจุดป้อนสองจุดเพื่อสร้างโพลาริซวงกลม.....	13
2.6 จุดป้อนสี่จุดที่มีการจัดวางเชิงมุมและเฟสที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นโหมด เรโซแนนซ์ต่าง ๆที่ทำให้เกิดโพลาริซวงกลม.....	14
2.7 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนตั้งต้น.....	16
2.8 $ S_{ii} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่า $\epsilon_r = 1.25$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	17
2.9 $ S_{ii} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่า $\epsilon_r = 2.2$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	17
2.10 $ S_{ii} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่า $\epsilon_r = 4.3$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	18
2.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อใช้วัสดุฐานรองชนิดรีดิง ($\epsilon_r = 1.25$) ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	20
2.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อใช้วัสดุฐานรองชนิดรีดิง ($\epsilon_r = 2.2$) ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	20
2.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อใช้วัสดุฐานรองชนิดรีดิง ($\epsilon_r = 4.3$) ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	21
2.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนอร์แมลไลซ์ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริป วงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมดต่างๆ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	22
2.15 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM ₁₁ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	23
2.16 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM ₂₁ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{31} ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	23
2.18 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{41} ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	24
2.19 รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีลักษณะตามการกระตุ้นด้วยโหมดต่างๆ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	25
2.20 รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} จากมุมมองด้านหลังที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	26
2.21 รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{21} จากมุมมองด้านหลังที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	26
2.22 $ S_{ii} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ.....	29
2.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนอร์มัลไลซ์ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ.....	30
2.24 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ.....	31
2.25 $ S_{ii} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่างๆ.....	32
2.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนอร์มัลไลซ์ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่างๆ.....	33
2.27 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่างๆ.....	34
2.28 $ S_{ii} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์ขนาดต่างๆ.....	36
2.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนอร์มัลไลซ์ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์ขนาดต่างๆ.....	36
2.30 คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์ขนาดต่าง ๆ.....	37
2.31 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์ขนาดต่าง ๆ.....	38

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.32 $ S_{ii} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีตำแหน่งจุดป้อนต่างๆ.....	39
2.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนอร์มัลไลซ์ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีตำแหน่งจุดป้อนต่างๆ.....	40
2.34 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีตำแหน่งจุดป้อนต่างๆ.....	41
2.35 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีตำแหน่งจุดป้อนต่างๆ.....	42
3.1 โครงสร้างแบบ Suspended layer.....	44
3.2 โครงสร้างแบบ suspended layer นำเสนอโดย Z. N. Chen และ M.Y.W. Chia ในปี 2000.....	45
3.3 โครงสร้างแบบ suspended layer นำเสนอโดย Secmen และ Hizal ในปี 2012.....	45
3.4 โครงสร้างแบบ suspended layer นำเสนอโดย K. Boonying ในปี 2010.....	46
3.5 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer.....	47
3.6 $ S_{ii} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz.....	49
3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz.....	50
3.8 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz.....	50
3.9 รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมบนโครงสร้างแบบ suspended layer เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} ที่ความถี่ 2.45 GHz.....	51
3.10 รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมบนโครงสร้างแบบ suspended layer เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} จากมุมมองด้านหลังที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz.....	52
3.11 $ S_{ii} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อศึกษาผลกระทบของความสูง suspended layer ที่ความถี่ 2.45 GHz.....	53
3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อศึกษาผลกระทบของความสูง suspended layer ที่ความถี่ 2.45 GHz.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัด X อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อศึกษาผลกระทบของความสูง suspended layer ที่ความถี่ 2.45 GHz.....	55
3.14 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง แบบ suspended layer ที่ความถี่ 2.45 GHz.....	56
3.15 $ S_{ii} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อศึกษาผลกระทบของขนาดแผ่นระนาบกราวนด์ ที่ความถี่ 2.45 GHz.....	57
3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อศึกษาผลกระทบของขนาด แผ่นระนาบกราวนด์ ที่ความถี่ 2.45 GHz.....	58
3.17 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อศึกษาผลกระทบของขนาดแผ่นระนาบกราวนด์ ที่ความถี่ 2.45 GHz.....	58
3.18 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อศึกษาผลกระทบของขนาดแผ่นระนาบกราวนด์ ที่ความถี่ 2.45 GHz.....	59
3.19 $ S_{ii} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ.....	60
3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ ไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำ ให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ.....	62
3.21 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ.....	62
4.1 โครงสร้างแบบระนาบแม่เหล็กเทียมที่มีเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปร่างต่างๆ.....	65
4.2 โครงสร้างสายอากาศของ Feresidis ที่นำเสนอในปี 2005	66
4.3 โครงสร้างสายอากาศของ Baracco ที่นำเสนอในปี 2008	67
4.4 โครงสร้างสายอากาศของ Nakamura ที่นำเสนอในปี 2011.....	68
4.5 การตกกระทบของคลื่นแบบตั้งฉากกับระนาบขอบเขต.....	69
4.6 เซลล์หนึ่งหน่วยของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม.....	73
4.7 แบบจำลองของเซลล์หนึ่งหน่วยของตัวนำแม่เหล็กเทียม.....	73
4.8 คุณลักษณะเฟสการสะท้อนของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีแผ่นตัวนำของ เซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อศึกษาผลกระทบของ H_{amc}	74
4.9 คุณลักษณะเฟสการสะท้อนของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีแผ่นตัวนำของ เซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อศึกษาผลกระทบของ H_{air}	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

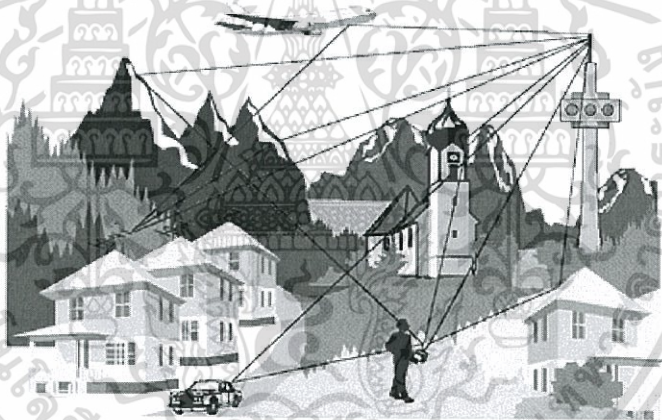
รูปที่	หน้า
4.10	คุณลักษณะเฟสการสะท้อนของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อศึกษาผลกระทบของ W_{gap}76
4.11	เซลล์หนึ่งหน่วยของตัวนำแม่เหล็กเทียม.....77
4.12	ความสัมพันธ์ของ W_{pa} กับ W_{gap} เมื่อแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยมีรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสวงกลมและแปดเหลี่ยม.....78
4.13	โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมเมื่อถูกนำไปประยุกต์ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปวงกลม...79
4.14	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมทั้งสามรูปแบบ.....79
4.15	$ S_{11} $ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz.....80
4.16	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz.....81
4.17	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนอร์มัลไลซ์ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz.....82
4.18	อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz.....82
4.19	รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมบนโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} ที่ความถี่ 2.45 GHz.....83
4.20	รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมบนโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม model-C เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} ที่ความถี่ 2.45 GHz.....84
5.1	ระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมขนาด 3×3 เซลล์หนึ่งหน่วยที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ.....88
5.2	สายอากาศต้นแบบ.....88
5.3	$ S_{11} $ ของสายอากาศต้นแบบ.....89
5.4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศต้นแบบ.....90
5.5	อัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ.....91
5.6	อัตราส่วนแกนของในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศต้นแบบ.....92
5.7	อัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศต้นแบบ.....93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สายอากาศโพลาริซวงกลมกำลังเป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ทางการสื่อสารไร้สายระบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) การสื่อสารผ่านดาวเทียม (Satellite communications) หรือการประยุกต์ใช้งานกับยานพาหนะ (Automotive applications) โดยเฉพาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในสภาวะแวดล้อมแบบหลากหลายวิถีและจางหาย (Multipath and fading) ซึ่งเป็นสภาวะแวดล้อมที่มีวัตถุต่าง ๆ เป็นสิ่งกีดขวาง ทำให้สัญญาณที่ส่งมาเกิดการสะท้อน การหักเห เกิดการกระเจิงในหลายทิศทาง และมีการจางหายของสัญญาณเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.1 จากสภาวะแวดล้อมดังกล่าว โพลาริซของสัญญาณจะมีความไม่แน่นอนเมื่อไปถึงเครื่องรับ ดังนั้นการที่สายอากาศมีโพลาริซวงกลมจึงสามารถแก้ปัญหาเรื่องนี้ได้ ข้อดีของสายอากาศโพลาริซวงกลมคือ สายอากาศไม่จำเป็นต้องมีการจัดวางในทิศทางที่แน่นอนและความแรงของสัญญาณที่มากเกินไปในกรณีของการแพร่กระจายคลื่นแบบหลากหลายวิถี

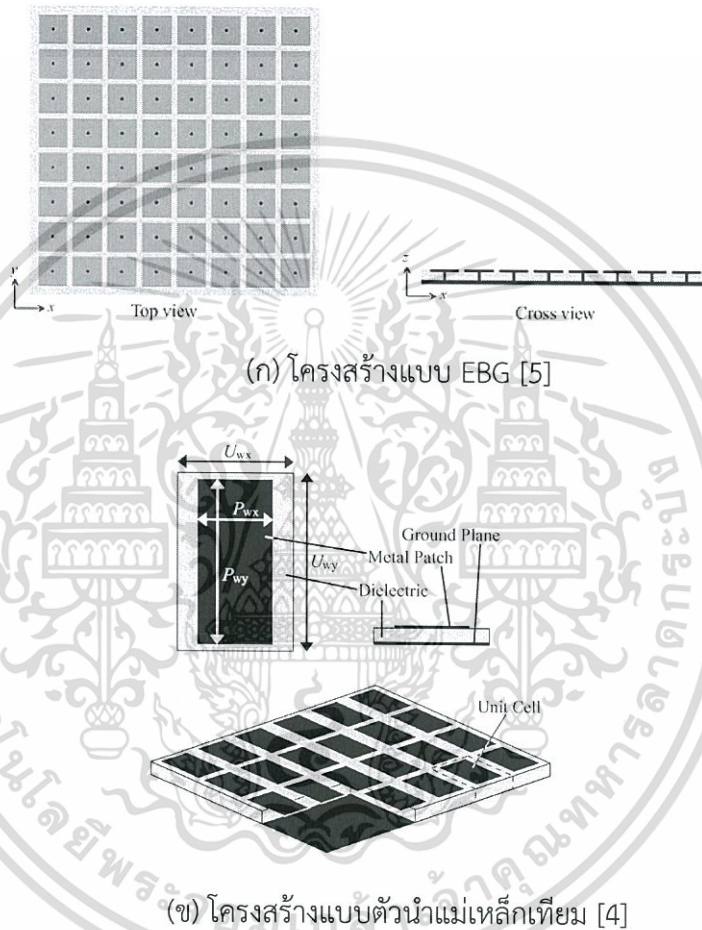


รูปที่ 1.1 การสื่อสารในสภาวะแวดล้อมแบบหลากหลายวิถีและจางหาย

สายอากาศโพลาริซวงกลมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายชนิดหนึ่งคือ สายอากาศไมโครสตริป เนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีน้ำหนักเบา สัณฐานต่ำ และต้นทุนต่ำ รวมทั้งสามารถนำไปติดตั้งหรือนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม สายอากาศไมโครสตริปนั้นมีย่านความถี่ที่ใช้งานแคบทั้งทางด้านอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนแกน นอกจากนี้แบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศมีลำคลื่นกว้างซึ่งส่งผลให้มีค่าสภาพเงาเงจทิศทางและอัตราขยายต่ำ

เทคนิคที่ช่วยให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาริซวงกลมนั้นสามารถทำได้หลายเทคนิค เทคนิคการกระตุ้นแบบหลายจุดป้อนก็เป็นเทคนิคหนึ่งช่วยให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาริซวงกลม จากงานวิจัยที่มีก่อน [1] ได้นำเสนอ สายอากาศไมโครสตริปแผ่นตัวนำวงกลมที่มีโพลาริซวงกลมโดยใช้เทคนิคการจัดวางจุดป้อนมากกว่าหนึ่งจุดสำหรับการกระตุ้นสายอากาศให้เหมาะสมด้วยเทคนิคนี้ยังช่วยให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีความสมมาตรที่ดีขึ้นเมื่อเทียบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับสายอากาศที่มีการกระตุ้นด้วยจุดป้อนหนึ่งจุดหรือสองจุด นอกจากนี้ยังช่วยให้อัตราส่วนแแกนดีขึ้นอีกด้วย และในงานวิจัยดังกล่าวยังได้ศึกษาผลกระทบของระนาบกราวด์ขนาดจำกัดด้วยเช่นกัน พบว่า ขนาดระนาบกราวด์ที่มีขนาด $3\lambda \times 3\lambda$ จะเริ่มไม่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศ โดยที่ λ เป็นความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ ซึ่งขนาดสายอากาศดังกล่าวนั้นจะทำให้ขนาดสายอากาศรวมมีขนาดใหญ่จนเกินไปสำหรับการประยุกต์ใช้งานตามที่กล่าวมาข้างต้น และนอกจากนี้ สายอากาศไมโครสตริปแผ่นตัวนำวงกลมที่กระตุ้นด้วยหลายจุดป้อนนั้นมีประสิทธิภาพรวมของสายอากาศต่ำและนำไปสู่การมีอัตราขยายของสายอากาศที่ต่ำ



รูปที่ 1.2 โครงสร้างพื้นผิวตัวสะท้อน

สำหรับเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะของสายอากาศไมโครสตริปโดยมีอยู่หลายเทคนิค ได้แก่ เทคนิคการใช้ประยุกต์โครงสร้างแบบ suspended layer และโครงสร้างพื้นผิวตัวสะท้อน (Reflector Surface Structure) ซึ่งเป็นทั้งสองเทคนิคการปรับเปลี่ยนโครงสร้างสายอากาศเดิมโดยการดัดแปลงหรือเพิ่มโครงสร้างใหม่เข้ามา สำหรับโครงสร้างที่มีพื้นผิวเป็นตัวสะท้อนนั้น ได้แก่ โครงสร้างแบบ EBG (Electromagnetic Band Gap) [2], [3] และโครงสร้างแบบตัวนำแม่เหล็กเทียมหรือ AMC (Artificial Magnetic Conductor) ซึ่งโครงสร้างทั้งสองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.2 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างแบบ EBG และตัวนำแม่เหล็กเทียม [4] พบว่า โครงสร้างแบบ EBG นั้นมีลักษณะเป็นวัสดุฐานรองแบบ Periodic ที่ประกอบด้วยแผ่นตัวนำขนาดเล็กอยู่บนวัสดุฐานรองและมีเส้นลวด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเล็ก (Vias) เชื่อมต่อระหว่างแผ่นตัวนำและระนาบกราวด์ ด้วยโครงสร้างแบบนี้จะช่วยให้สายอากาศมีช่วงกว้างความถี่อิมพีแดนซ์สูงในย่านความถี่ที่สอดคล้องกับคุณลักษณะการสะท้อนแบบเฟสเดียวกัน (In-phase) ของคลื่นตกกระทบ ส่วนโครงสร้างแบบตัวนำแม่เหล็กเทียมจะมีลักษณะของโครงสร้างที่คล้ายกับโครงสร้างแบบ EBG แต่จะแตกต่างกับตรงที่ไม่มีเส้นลวดขนาดเล็กเชื่อมระหว่างแผ่นตัวนำและระนาบกราวด์แต่คงมีคุณลักษณะการสะท้อนแบบเฟสเดียวกันอยู่

จากงานวิจัยที่มีมาก่อน [4] ได้ศึกษาการนำโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมไปประยุกต์ใช้งาน พบว่าโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมนั้นสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติและสมรรถนะของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการนำโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปเพื่อให้ได้สายอากาศโพลาริซวงกลมที่มีสมรรถนะสูงและมีการปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปให้ดีขึ้น โดยเฉพาะช่วงกว้างความถี่และอัตราขยายของสายอากาศซึ่งเป็นข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริปที่มีโครงสร้างทั่วไป

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอ การศึกษา วิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบ สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่กระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนที่มีการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบ suspended layer และตัวนำแม่เหล็กเทียม สำหรับการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศนั้นจะใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO [6] เพื่อหาช่วงกว้างความถี่ คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศและอัตราส่วนแกน ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมุ่งเน้นการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปวงกลมให้มีโพลาไรซ์วงกลมที่มีสมรรถนะสูงและคุณสมบัติของสายอากาศที่สอดคล้องกับความต้องการของระบบ โดยกำหนดขอบเขตให้สายอากาศมีช่วงกว้างความถี่ครอบคลุมย่านความถี่ที่พิจารณา โดยจะเน้นไปที่ย่านความถี่ 2.40–2.484 GHz ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้งานทางด้านโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย เนื่องจากเป็นระบบที่นำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ส่วนขนาดรวมของสายอากาศจะทำการออกแบบให้มีขนาดเล็กกะทัดรัด สั้นฐานต่ำ และเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานและติดตั้งได้หลากหลายการประยุกต์ใช้งาน โดยที่คุณลักษณะทางด้านการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกำหนดให้จะต้องมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวที่มีลำคลื่นแคบ มีความสมมาตรของลำคลื่น และลำคลื่นด้านหลังต่ำ ส่วนลักษณะการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมสามารถเลือกได้ว่าจะให้หมุนขวาหรือหมุนซ้าย และมีอัตราขยายของสายอากาศมากกว่า 5 dBic ซึ่งความต้องการของสายอากาศสามารถสรุปได้ในตารางที่ 1.1 หลังจากทำการออกแบบและได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นจะทำการสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองเพื่อยืนยันผลลัพธ์ของคุณลักษณะของสายอากาศ สำหรับการศึกษาสายอากาศที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบและสร้างสายอากาศที่ต้องการโพลาไรซ์วงกลมที่มีสมรรถนะสูงและ คุณสมบัติของสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ต่อไป

ตารางที่ 1.1 ความต้องการของสายอากาศเบื้องต้น

ย่านความถี่	2.400–2.484 GHz (Wireless LAN)
ขนาดสายอากาศ (มากที่สุด)	100 มิลลิเมตร × 100 มิลลิเมตร × 10 มิลลิเมตร
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	แบบทิศทางเดียว - ลำคลื่นแคบ - ลำคลื่นที่สมมาตร - ลำคลื่นด้านหลังต่ำ
การโพลาไรซ์	โพลาไรซ์วงกลม สามารถเลือกได้ หมุนขวาหรือหมุนซ้าย
อัตรายาย	มากกว่า 5 dBic

1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎี งานวิจัยที่มีมาก่อนของสายอากาศไมโครสตริป เทคนิคที่ช่วยทำให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาไรซ์วงกลม รวมถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศไมโครสตริป ตลอดจนการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์โดยการจำลองสายอากาศ เพื่อจะนำข้อมูลที่ได้มาทำการปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปโพลาไรซ์วงกลมต่อไป

บทที่ 3 กล่าวถึงการปรับปรุงคุณสมบัติสายอากาศโดยใช้โครงสร้างแบบ suspended layer โดยจะทำการจำลองสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบ suspended layer เพื่อศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์และนำไปเป็นข้อมูลในการออกแบบสายอากาศให้สมรรถนะสูงสุด

บทที่ 4 กล่าวถึงการปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้ระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม โดยจะทำการออกแบบระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมเพื่อนำมาใช้ในงานวิจัย โดยใช้ช่วงกว้างความถี่เฟสการสะท้อนในการออกแบบตัวนำแม่เหล็กเทียม โดยที่เซลล์หนึ่งหน่วยที่มีแผ่นตัวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม และแปดเหลี่ยมจะถูกศึกษาค้นคว้าเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศให้ดีขึ้น

บทที่ 5 กล่าวถึงการสร้างสายอากาศต้นแบบและการทดสอบ โดยนำพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ได้จากการศึกษาและออกแบบ มาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบและนำไปทดสอบเพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองของสายอากาศต้นแบบ คุณลักษณะของสายอากาศที่พิจารณาคือ ช่วงกว้างความถี่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตรายาย และอัตราส่วนแกน

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์นี้ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

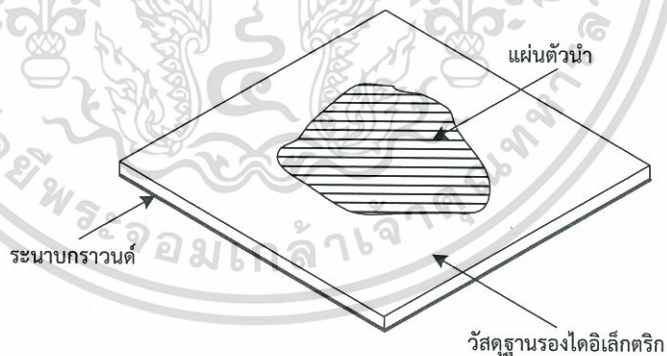
บทที่ 2

สายอากาศไมโครสตริปโพลาริซวงกลม

สำหรับบทนี้จะนำเสนอทฤษฎี งานวิจัยที่มีมาก่อนของสายอากาศไมโครสตริป และเทคนิคที่ช่วยทำให้สายอากาศไมโครสตริปโพลาริซวงกลม โดยจะทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศไมโครสตริป จากนั้นจะทำการจำลองสายอากาศเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติและสมรรถนะของสายอากาศไมโครสตริปต่อไป

2.1 สายอากาศไมโครสตริป

ในปัจจุบันสายอากาศไมโครสตริปได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในระบบการสื่อสารไร้สาย ไม่ว่าจะเป็นระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) การติดต่อสื่อสารแบบเคลื่อนที่ การประยุกต์ใช้งานบนยานพาหนะ เพราะว่าสายอากาศไมโครสตริปนั้นมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา ราคาถูก สัมฐานต่ำ และสามารถสร้างได้ง่าย สำหรับสายอากาศที่นิยามได้ว่าเป็นสายอากาศไมโครสตริปนั้นจะต้องมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบไปด้วย [7] แผ่นตัวนำที่วางอยู่บนวัสดุฐานรองที่เป็นไดอิเล็กตริก และแผ่นตัวนำที่เป็นองค์ประกอบในการแพร่กระจายคลื่น โดยทั่วไปแผ่นตัวนำจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม วงกลม ลายเส้นบาง (ไดโพล) วงรี สามเหลี่ยมหรือรูปร่างใดๆก็ได้ ซึ่งแผ่นตัวนำนั้นจะมีความหนาน้อยมาก ($t \ll \lambda_0$ โดยที่ λ_0 คือ ความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ) ส่วนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกมีความหนาปกติอยู่ที่ $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$ และพื้นผิวข้างใต้วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) นั้นจะเป็นระนาบกราวด์

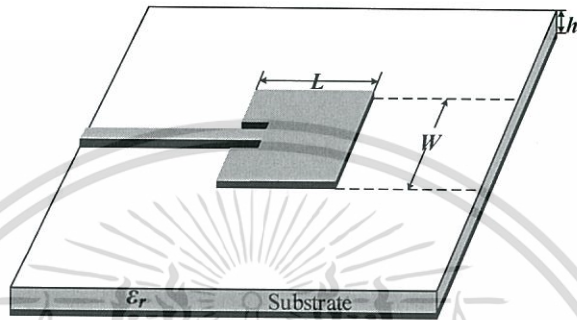


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

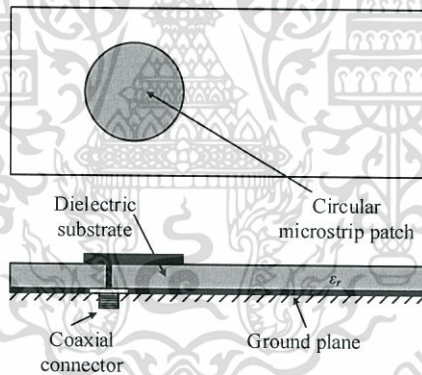
ข้อดีที่สำคัญของสายอากาศไมโครสตริป [8] คือ ต้นทุนในการสร้างที่ไม่สูง มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา สัมฐานต่ำ และสามารถนำไปติดตั้งเข้ากับพื้นผิวที่มีลักษณะโค้งได้ มีความต้านทานต่อการสั่นไหวได้ดี สามารถออกแบบให้มีโพลาริซเชิงเส้นหรือวงกลมได้ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลากหลายรูปแบบและให้อัตราขยายอยู่ที่ประมาณ 2.5 ถึง 10 dBi ถึงอย่างไรสายอากาศไมโครสตริปก็มีข้อเสียตรงที่มีช่วงกว้างความถี่ที่แคบมาก (5% ถึง 10% [2:1 VSWR])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

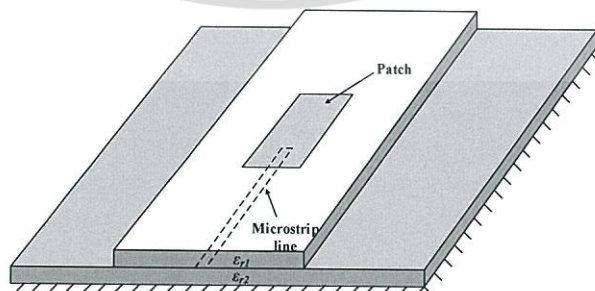
มีวัสดุฐานรองหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้สำหรับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป โดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองเหล่านั้นจะอยู่ในช่วง $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ ถ้าต้องการสมรรถนะสายอากาศที่ดี ควรเลือกใช้วัสดุฐานรองหนาและมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ เพราะจะทำให้สมรรถนะที่ดีกว่า มีช่วงกว้างความถี่ที่มากกว่า แต่จะมีขนาดขององค์ประกอบที่ใหญ่ขึ้น ส่วนวัสดุฐานรองที่บางและมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงนั้นเหมาะจะนำไปใช้ทางด้านวงจรไมโครเวฟเพราะต้องการสนามบริเวณขอบ (bound field) หนาแน่นเพื่อทำให้การแพร่กระจายคลื่นและการเชื่อมต่อรวม (Coupling) ที่ไม่ต้องการซึ่งนำไปสู่มีขนาดองค์ประกอบที่เล็ก แต่จะมีค่าประสิทธิภาพต่ำและช่วงกว้างความถี่แคบ



(ก) เส้นไมโครสตริป



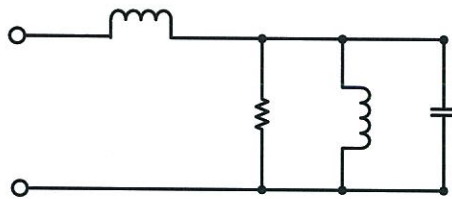
(ข) โพรบโคแอกเซียล



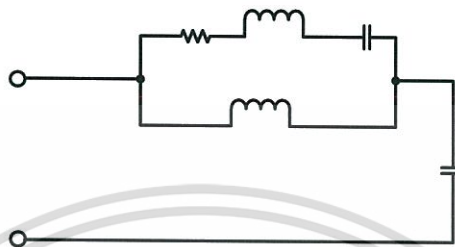
(ค) การเชื่อมต่อช่องเปิด

รูปที่ 2.2 วิธีกระตุ้นของสายอากาศไมโครสตริปแบบต่าง ๆ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เส้นไมโครสตริปและโพรบโคแอกเซียล



(ข) การเชื่อมร่วมช่องเปิด

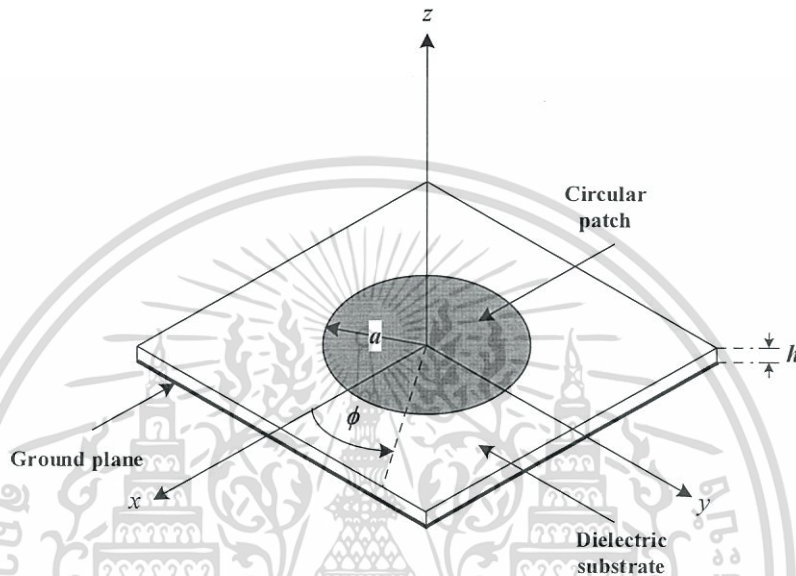
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของวิธีการกระตุ้นของสายอากาศไมโครสตริปแบบต่าง ๆ [8]

วิธีการกระตุ้นสายอากาศไมโครสตริปมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี สำหรับวิธีที่ได้รับความนิยมนั้น ได้แก่ เส้นไมโครสตริป (Microstrip line) โพรบโคแอกเซียล (Coaxial probe) และการเชื่อมร่วมช่องเปิด (Aperture coupling) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ส่วนวงจรสมมูลของการกระตุ้นสายอากาศไมโครสตริปแต่ละวิธีจะแสดงในรูปที่ 2.3 สำหรับวิธีเส้นป้อนไมโครสตริปเป็นวิธีที่ใช้เส้นของตัวนำมากระตุ้น โดยปกติแล้วความกว้างของเส้นจะมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของแผ่นตัวนำ การป้อนด้วยเส้นไมโครสตริปนั้นสามารถสร้างและแมตช์ได้ง่าย แต่จะมีคลื่นพื้นผิวเกิดขึ้นและแพร่กระจายคลื่นรบกวนมากขึ้นในกรณีที่ว่าวัสดุฐานมีความหนาเพิ่มขึ้น ขณะที่การกระตุ้นด้วยโพรบโคแอกเซียลนั้น ตัวนำด้านในสายโคแอกเซียลจะเชื่อมต่อกับแผ่นตัวนำที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่น และตัวนำด้านนอกจะเชื่อมต่อระนาบกราวด์ ตัวป้อนแบบโพรบโคแอกเซียลสามารถสร้างและแมตช์ได้ง่ายเช่นกันแต่จะมีการแพร่กระจายของคลื่นรบกวนที่ต่ำและมีช่วงกว้างความถี่ที่แคบ ทั้งวิธีเส้นป้อนไมโครสตริปและโพรบโคแอกเซียลจะมีลักษณะโครงสร้างที่ไม่สมมาตรอยู่ ซึ่งทำให้เกิดโหมดลำดับสูงและมีการแพร่กระจายคลื่นโพลาไรซ์ไขว้เกิดขึ้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วิธีการเชื่อมร่วมช่องเปิดในรูปที่ 2.2 (ค) จึงถูกนำมาใช้ แต่ก็เป็วิธีที่สร้างยากที่สุดในวิธีการกระตุ้นที่กล่าวมา แต่ยังให้ช่วงกว้างความถี่ที่แคบเช่นกัน วิธีการเชื่อมร่วมช่องเปิดนั้นประกอบไปด้วยวัสดุฐานรองสองชั้น และถูกแยกออกจากกันโดยระนาบกราวด์ ข้างใต้วัสดุฐานรองล่างสุดนั้นมีเส้นป้อนไมโครสตริปเป็นตัวกระตุ้นพลังงานทำให้เกิดการเชื่อมต่อไปยังแผ่นตัวนำผ่านช่องเปิดบนระนาบกราวด์

สำหรับรูปลักษณะแผ่นตัวนำของสายอากาศไมโครสตริปที่ได้รับความนิยมและนำมาใช้งานบ่อยในทางปฏิบัติก็คือ รูปสี่เหลี่ยมและวงกลม แต่เนื่องจากแผ่นตัวนำวงกลมมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่หลากหลายและมีสมมาตรดีกว่าแผ่นตัวนำสี่เหลี่ยม ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอเฉพาะสายอากาศไมโครสตริปวงกลม โดยนำมาปรับปรุงและเลือกใช้ให้เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานต่อไป

2.1.1 สายอากาศไมโครสตริปวงกลม

แผ่นตัวนำแบบวงกลมเป็นรูปลักษณะแผ่นตัวนำของสายอากาศไมโครสตริปแบบหนึ่งที่ยิมนำมาใช้ จากโครงสร้างสายอากาศในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า สายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วยแผ่นตัวนำโลหะที่มีรัศมี a และมีระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำกับระนาบกราวด์เท่ากับ h โดยมีวัสดุฐานรองที่มีค่าไดอิเล็กตริก ϵ_r เป็นชั้นคั่นระหว่างแผ่นตัวนำกับระนาบกราวด์ จากโครงสร้างดังกล่าวสามารถนำมาจัดองค์ประกอบได้ทั้งแบบเดี่ยว [9] – [14] และแถวลำดับ [15]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม

ในการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปวงกลมนั้น [7] สนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปสามารถอธิบายได้โดย

$$E_z = E_0 J_n(kr) \cos(n\phi) \quad (2.1)$$

และองค์ประกอบสนามแม่เหล็กสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$H_r = -\frac{j\omega\epsilon n}{k^2 r} E_0 J_n(kr) \sin(n\phi) \quad (2.2)$$

$$H_\phi = -\frac{j\omega\epsilon}{k} E_0 J'_n(kr) \cos(n\phi) \quad (2.3)$$

โดยที่ k เป็นค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในไดอิเล็กตริก ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ส่วน J_n เป็นฟังก์ชันเบสเซลที่หนึ่ง (First kind Bessel function) ลำดับที่ n และ J'_n เป็นอนุพันธ์ของฟังก์ชันเบสเซล ส่วน ω คือความถี่เชิงมุม ($\omega = 2\pi f$) สำหรับแต่ละโหมดของสายอากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครสตริปนั้นสอดคล้องกับรัศมีของแผ่นตัวนำและขึ้นอยู่กับค่าที่ทำให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเบสเซล เท่ากับศูนย์ ส่วน E_0 เป็นค่าของสนามไฟฟ้าที่ขอบของแผ่นตัวนำระหว่างช่องว่างเล็กๆ

ความถี่เรโซแนนซ์ f_{nm} สำหรับโหมด TM แต่ละโหมดของสายอากาศไมโครสตริปสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$f_{nm} = \frac{X_{nm}c}{2\pi a_{eff} \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.4)$$

โดยที่ c คือ ความเร็วของแสงในช่องว่างอิสระ และ X_{nm} คือ ค่าที่ทำให้อนุพันธ์ฟังก์ชันเบสเซล ลำดับที่ n เท่ากับศูนย์ลำดับที่ m ซึ่งตัว n นั้นแทนโหมดเชิงมุม ในขณะที่ตัว m แทนโหมดเชิงรัศมี สำหรับค่าของ X_{nm} ที่นำมาใช้จะแสดงได้ในตารางที่ 2.1 ส่วน a_{eff} คือรัศมีประสิทธิผล (Effective radius) ของแผ่นตัวนำ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$a_{eff} = a \left[1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left(\ln \left\{ \frac{\pi a}{2h} \right\} + 1.7726 \right) \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

โดยที่ a เป็นค่ารัศมีทางกายภาพของสายอากาศและ $a/h \ll 1$

ตารางที่ 2.1 ค่าของ X_{nm} บางค่าที่นำมาใช้

	TM ₁₁	TM ₂₁	TM ₃₁	TM ₄₁	TM ₅₁	TM ₆₁
X_{n1}	1.841	3.054	4.201	5.317	6.415	7.501

โดยทั่วไปแล้ว โหมดต่ำสุดของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมคือ TM₁₁ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ใกล้เคียงกับโหมดต่ำสุดของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมและมีโพลาริซิงชัน ส่วนโหมดที่สูงกว่าลำดับถัดมาของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมก็คือ TM₂₁ จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรูปกรวยและโพลาริซิงชันวงกลม จากสมการที่ 2.4 และ 2.5 เห็นได้ว่าขนาดของแผ่นตัวนำนั้นเป็นฟังก์ชันของความสูงของวัสดุฐานรอง (h) ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ และโหมดที่ถูกกระตุ้น สำหรับการเลือกขนาดของแผ่นตัวนำและพารามิเตอร์อื่น ๆ ให้เหมาะกับการประยุกต์ใช้งาน รวมถึงผลกระทบของพารามิเตอร์เหล่านั้นจะได้ทำการวิเคราะห์เบื้องต้นต่อไป

จากการศึกษาผลกระทบวัสดุฐานรองของไมโครสตริป [16] – [18] พบว่า ผลกระทบของแผ่นตัวนำที่วางขนานกับระนาบกราวด์ จะทำให้เกิดสนามขยายไปตามแนวขอบ (fringing field) และรอบ ๆ ของแผ่นตัวนำ ซึ่งทำให้ค่าความจุระหว่างแผ่นตัวนำและระนาบกราวด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์นั้นเลื่อนต่ำลงมา และจากการศึกษาผลกระทบความหนาของวัสดุฐานรองที่ได้จากการทดสอบ [16] พบว่า ความหนาของวัสดุฐานรองจะส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริป แต่จะไม่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์หรือวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง นอกจากนี้งานวิจัย [17] พบว่าคลื่นพื้นผิวจะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อความหนาของวัสดุฐานรองเป็นไปตามเงื่อนไข $h/\lambda_0 < 0.02$ และจากการศึกษาผลกระทบของค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพยอมไฟฟ้าของวัสดุฐานรอง [18] พบว่า ขนาดของแผ่นตัวนำและบริเวณการแพร่กระจายคลื่นนั้นลดลง เมื่อเลือกใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์สูง

ในทางปฏิบัติ ระบายกราวด์ขนาดใหญ่ขึ้นนั้นไม่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้งานจริง ดังนั้น ขนาดระบายกราวด์ที่นำมาใช้งานจริงจะต้องมีขนาดเล็กเท่าที่เป็นไปได้ จากการศึกษาผลกระทบของระบายกราวด์ที่มีขนาดจำกัด [19] – [22] พบว่าขนาดระบายกราวด์นั้นไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อระบายกราวด์มีขนาด $3\lambda \times 3\lambda$ โดยที่ λ เป็นความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ แต่ขนาดดังกล่าวก็ยังถือว่าเป็นขนาดใหญ่เกินไปสำหรับนำมาใช้งานจริงในบางการประยุกต์ใช้งาน

2.1.2 ความนำไฟฟ้า

ความนำไฟฟ้า (Conductance) เนื่องจากกำลังการแผ่กระจายคลื่น (Radiated power) ของสายอากาศไมโครสตริปสามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการกำลังการแผ่กระจายคลื่น [8]

$$P_{rad} = |V_0|^2 \frac{(k_0 a_e)^2}{960} \int_0^{\pi/2} [J_{02}'^2 + \cos^2 \theta J_{02}^2] \sin \theta d\theta \quad (2.6)$$

โดยที่

$$V_0 = hE_0 J_1(k a_e) \quad (2.7)$$

$$\alpha = k_0 a_e \quad (2.8)$$

$$k_0 = \frac{2\pi f_r}{v_0} \quad (2.9)$$

$$J_{02}' = J_0(k_0 a_e \sin \theta) - J_2(k_0 a_e \sin \theta) \quad (2.10)$$

$$J_{02} = J_0(k_0 a_e \sin \theta) + J_2(k_0 a_e \sin \theta) \quad (2.11)$$

และ k_0 เป็นค่าคงที่เฟสช่องว่างอิสระ

ดังนั้นความนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำและระบายกราวด์สามารถเขียนได้เป็น

$$G_{rad} = \frac{(k_0 a_e)^2}{480} \int_0^{\pi/2} [J_{02}'^2 + \cos^2 \theta J_{02}^2] \sin \theta d\theta \quad (2.12)$$

สมการที่ 2.12 เป็นความนำไฟฟ้าที่ยังไม่คิดรวมค่าการสูญเสียที่เกิดจากการแผ่กระจายคลื่นและไดอิเล็กตริก ซึ่งความนำไฟฟ้าทั้งสองนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_c = \frac{\varepsilon_{mo} \pi (\pi \mu_0 (f_r)_{10})^{-3/2}}{4h^2 \sqrt{\sigma}} \left[(ka_e)^2 - m^2 \right] \quad (2.13)$$

$$G_d = \frac{\varepsilon_{mo} \tan \delta}{4\mu_0 h (f_r)_{10}} \left[(ka_e)^2 - m^2 \right] \quad (2.14)$$

โดยที่ G_c เป็นความนำไฟฟ้าเนื่องจากการสูญเสียจากความนำไฟฟ้า และ G_d เป็นความนำไฟฟ้าเนื่องจากการสูญเสียจากไดอิเล็กตริก ขณะที่ $\varepsilon_{mo} = 2$ สำหรับ $m=0$ และ $\varepsilon_{mo} = 1$ สำหรับ $m \neq 0$ ส่วน f_r เป็นความถี่เรโซแนนซ์ของโหมด $mn0$ ดังนั้นความนำไฟฟ้ารวม (Total conductance) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G_t = G_{rad} + G_c + G_d \quad (2.15)$$

2.1.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางถือว่าเป็นคุณลักษณะของสายอากาศที่สำคัญ และนิยามได้เป็น [8]

$$D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.16)$$

เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าในสมการที่ 2.1 และกำลังการแผ่กระจายคลื่นในสมการที่ 2.16 ถ้ามีการป้อนแบบช่องเปิด ค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะสามารถเขียนได้เป็น

$$D_0 = \frac{(k_0 a_e)^2}{120 G_{rad}} \quad (2.17)$$

ซึ่งพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางไม่ได้ขึ้นอยู่กับความสูงของวัสดุฐานรองโดยแต่จะขึ้นอยู่กับรัศมีของแผ่นตัวนำ

2.1.4 อิมพีแดนซ์อินพุตที่ความถี่เรโซแนนซ์

อิมพีแดนซ์อินพุตของแผ่นตัวนำที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นค่าจำนวนจริง และกำลังอินพุตจะไม่ขึ้นกับตำแหน่งของจุดป้อนบนเส้นรอบวง [8] เมื่อกำหนดตำแหน่งจุดป้อน $\phi' = 0^\circ$ ความต้านทานอินพุตที่ระยะเชิงรัศมี $\rho' = \rho_0$ จากจุดกึ่งกลางของแผ่นตัวนำสามารถเขียนได้เป็น

$$R_m(\rho' = \rho_0) = \frac{1}{G_t} \frac{J_m^2(k\rho_0)}{J_m^2(ka_e)} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสายอากาศแผ่นตัวนำวงกลม ความต้านทานอินพุตเรโซแนนซ์ที่คิดรวมจุดป้อน สามารถเขียนได้เป็น

$$R_{in}(\rho' = \rho_0) = R_{in}(\rho' = a_e) \frac{J_m^2(k\rho_0)}{J_m^2(ka_e)} \quad (2.19)$$

$$R_{in}(\rho' = a_e) = \frac{1}{G_t} \quad (2.20)$$

2.1.5 ตัวประกอบเชิงคุณภาพ

ตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Quality factor) เป็นตัวบอกการสูญเสียของสายอากาศ โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย การสูญเสียทางการนำไฟฟ้า ไดอิเล็กตริก และคลื่นพื้นผิว ตัวประกอบเชิงคุณภาพเป็นผลรวมของการสูญเสียเหล่านั้นซึ่งเขียนได้เป็น

$$Q_t^{-1} = Q_{rad}^{-1} + Q_c^{-1} + Q_d^{-1} + Q_{sw}^{-1} \quad (2.21)$$

โดยที่ Q_t เป็นตัวประกอบเชิงคุณภาพรวม
 Q_{rad} เป็นตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางการแพร่กระจายคลื่น
 Q_c เป็นตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางการนำไฟฟ้า
 Q_d เป็นตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก
 Q_{sw} เป็นตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียทางคลื่นพื้นผิว

สำหรับวัสดุฐานรองที่บางมาก ๆ จะมีการสูญเสียเนื่องจากคลื่นพื้นผิว Q_{sw} น้อยมากจะสามารถละเว้นไม่ต้องพิจารณาได้ ดังนั้นวัสดุฐานรองที่บางมาก ๆ ($h \ll \lambda_0$) สามารถประมาณค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียต่างๆจากสูตรได้ดังนี้

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (2.22)$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.23)$$

$$Q_{rad} = \frac{2\omega\epsilon_r}{h\left(\frac{G_{rad}}{2a}\right)} \left(\frac{a}{2}\right) \quad (2.24)$$

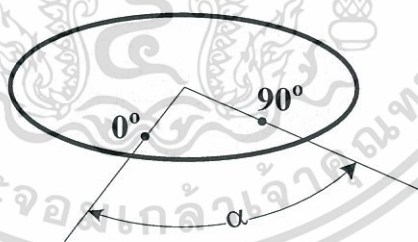
โดยที่ δ คือแทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุฐานรอง σ คือสภาพนำไฟฟ้าของตัวนำที่เกี่ยวข้องกับแผ่นตัวนำและระนาบกราวด์และ $G_{rad}/2a$ คือความนำไฟฟ้ารวมต่อความยาวหนึ่งหน่วยของช่องเปิดที่แพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

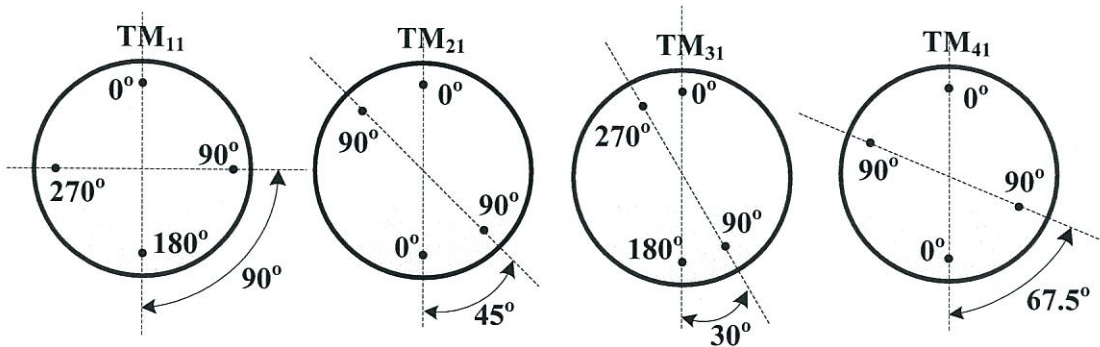
2.2 สายอากาศไมโครสตริปโพลาริซวงกลม

โดยทั่วไปแล้ว องค์ประกอบแผ่นตัวนำของสายอากาศไมโครสตริปเบื้องต้นนั้นมีการแพร่กระจายคลื่นที่มีโพลาริซเชิงเส้น แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ามีการจัดวางจุดป้อนที่เหมาะสมหรือดัดแปลงองค์ประกอบแผ่นตัวนำไป เช่น เจาะแผ่นตัวนำเป็นช่องเปิด ก็สามารถทำให้สายอากาศไมโครสตริปนั้นมีการโพลาริซวงกลมหรือวงรีได้ สำหรับเทคนิคการจัดวางจุดป้อนนั้น โพลาริซวงกลมจะเกิดขึ้นเมื่อกระตุ้นด้วยโหมดที่ตั้งฉากกันสองโหมดและมีเฟสต่างกัน 90° โดยสามารถทำได้โดยปรับขนาดทางกายภาพของแผ่นตัวนำให้เหมาะสมและใช้จุดป้อนอาจจะเป็นจุดป้อนเดี่ยว [23], [24] จุดป้อนคู่ [25] หรือจุดป้อนแบบหลายจุด [1], [26]

สำหรับกลไกการเกิดโพลาริซวงกลมโดยใช้เทคนิคการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนนั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้ [1] เพื่อสร้างโพลาริซวงกลม จำเป็นต้องใช้จุดป้อนสองจุดมาวางทำมุมกันให้เหมาะสมตามตัวอย่างในรูปที่ 2.5 ด้วยตำแหน่งดังกล่าวจะทำให้สนามที่เกิดจากจุดป้อนทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกันภายใต้แผ่นตัวนำรวมถึงรอบ ๆ แผ่นตัวนำ และด้วยระยะเชิงมุมนี้ จะทำให้ตำแหน่งของจุดป้อนตั้งอยู่ในบริเวณที่สนามมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งเกิดจากจุดป้อนอีกจุดหนึ่งเสมอ ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการเชื่อมต่อร่วมระหว่างจุดป้อนทั้งสอง และเมื่อกระตุ้นจุดป้อนทั้งสองให้มีความต่างเฟสกัน 90° จะทำให้โพลาริซวงกลมเกิดขึ้น และเมื่อระยะเชิงมุมระหว่างจุดป้อนทั้งสองเปลี่ยนไป โหมดที่เกิดก็จะเปลี่ยนไปด้วย ในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.6 จะแสดงระยะเชิงมุมที่ทำให้เกิดโหมดต่างๆและมีการโพลาริซวงกลม



รูปที่ 2.5 การวางจุดป้อนสองจุดเพื่อสร้างโพลาริซวงกลม [1]



รูปที่ 2.6 จุดป้อนสี่จุดที่มีการจัดวางเชิงมุมและเฟสที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นโหมดเรโซแนนซ์ต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดโพลาริซวงกลม [1]

ตารางที่ 2.2 ค่าระยะเชิงมุมที่ทำให้เกิดโหมดต่าง ๆ และมีการโพลาริซวงกลม

	TM ₁₁	TM ₂₁	TM ₃₁	TM ₄₁	TM ₅₁	TM ₆₁
α	90°	45° หรือ 135°	30° หรือ 90°	22.5° หรือ 67.5°	18°, 54° หรือ 90°	15°, 45° หรือ 75°

เพื่อให้ลำคลื่นมีความสมมาตรและโพลาริซไซด์ต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่สายอากาศไมโครสตริปมีวัสดุฐานรองหนา จำเป็นต้องกำจัดโหมดที่ไม่ต้องการออกไป โดยทั่วไป โหมดที่อยู่ถัดจากโหมดเรโซแนนซ์สองโหมดแรก จะมีความแรงมากที่สุดรองจากโหมดเรโซแนนซ์ วิธีหนึ่งที่ใช้กำจัดโหมดข้างเคียงเหล่านั้นสามารถทำได้โดยเพิ่มจุดป้อนขึ้นอีกสองจุด โดยมีตำแหน่งในทิศตรงข้ามกับจุดป้อนสองจุดเดิมทางตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง และมีการกระตุ้นจุดป้อนทั้งสองจุดด้วยเฟส 0° 90° 0° 90° สำหรับโหมดลำดับเลขคู่ และ 0° 90° 180° 270° สำหรับโหมดลำดับเลขคี่ ซึ่งเป็นการกำจัดสนามของโหมดที่ไม่ต้องการจากจุดป้อนที่ตรงข้ามกันออกไป

ด้วยความน่าสนใจของเทคนิคการกระตุ้นหลายจุดป้อนนี้ เป็นการช่วยทำให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาริซวงกลม และสายอากาศยังมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมมาตร ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอสายอากาศไมโครสตริปโพลาริซวงกลมโดยใช้เทคนิคการกระตุ้นหลายจุดป้อน โดยจะทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ เพื่อมาเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปโพลาริซวงกลมให้ดียิ่งขึ้นและเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

2.3 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อน

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อน จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า เทคนิคการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนนั้นช่วยทำให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาริซวงกลมได้ เพื่อออกแบบสายอากาศไมโครสตริปโพลาริซวงกลมให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการ ดังนั้นจะต้องทำการศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปโพลาริซวงกลมให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นและเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานต่อไป

เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศ จะกำหนดความต้องการของระบบเบื้องต้นไว้ โดยกำหนดให้สายอากาศถูกนำไปใช้งานที่ย่านความถี่ของการประยุกต์ใช้งานทางด้านโครงข่ายท้องถิ่น ไร้สาย 2.45 GHz ซึ่งเป็นระบบที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ส่วนขนาดรวมของสายอากาศ จะทำการออกแบบให้มีขนาดเล็กกะทัดรัด สั้นฐานต่ำ และเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานได้หลากหลายการประยุกต์ใช้งาน และคุณลักษณะทางด้านการแพร่กระจายคลื่นจะต้องมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีโพลาริซวงกลม และเมื่อทำการกำหนดความต้องการของระบบแล้ว ลำดับถัดไป จะทำการกำหนดพารามิเตอร์สายอากาศตั้งต้นเพื่อการศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศ

ในการศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศนั้น ต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นของสายอากาศนั้นก่อน และจากนั้นก็ทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ไปเพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นจากพารามิเตอร์เหล่านั้น โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนที่นำมาศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งสังเกตได้ว่ารูปร่างของระนาบกราวด์และวัสดุฐานรองมีรูปร่างเป็นวงกลมเนื่องจากต้องการเพิ่มความสมมาตรของการแพร่กระจายคลื่นและความกะทัดรัดของสายอากาศ โดยที่ D คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุฐานรองและระนาบกราวด์ที่มีรูปร่างเป็นวงกลม d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำ h คือค่าความหนาของวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ ϵ_r และ α คือมุมระหว่างจุดป้อนที่อยู่ติดกัน

เมื่ออาศัยการวิเคราะห์จากสมการที่ 2.4 และ 2.5 พบว่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมนั้นขึ้นอยู่กับสองพารามิเตอร์หลัก นั่นก็คือ ขนาดของรัศมีของแผ่นตัวนำ (a) และค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (ϵ_r) เพื่อให้สายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นสามารถนำไปสร้างได้จริง ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศตั้งต้นจะทำการเลือกค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองจากวัสดุฐานรองที่ใช้กันจริงในทางปฏิบัติ ด้วยเหตุนี้จึงทำการพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นพารามิเตอร์แรก

วัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์เท่ากับ 1.25 (วัสดุฐานรองชนิดรังผึ้ง: Honeycomb substrate) 2.2 (วัสดุฐานรองชนิด Duroid) และ 4.3 (วัสดุฐานรองชนิด FR-4) ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุฐานรอง โดยกำหนดให้วัสดุฐานรองจากวัสดุไดอิเล็กตริกเหล่านั้นหนาเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรและนำมาทำให้เป็นวงกลมโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $1.5d$ เมื่อรู้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

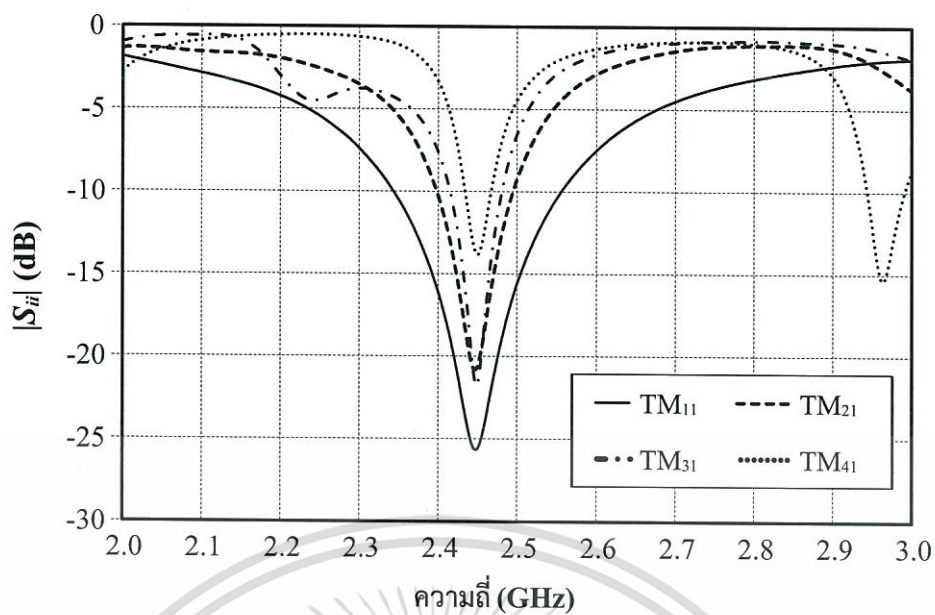
ของวัสดุฐานรองแล้ว จะสามารถประมาณค่ารัศมีแผ่นตัวนำของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมได้ และจุดป้อนแต่ละจุดมีระยะห่างจากกึ่งกลางของแผ่นตัวนำเท่ากับ $0.9p$ โดยที่ $p = d/2$ ส่วนระยะเชิงมุมและการจัดเฟสเป็นไปตามโหมดที่เรโซแนนซ์ดังตารางที่ 2.2

เมื่อนำสายอากาศไปจำลองด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO แล้วจากนั้นจะนำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการออกแบบสายอากาศตั้งต้น โดยจะทำการพิจารณาผลลัพธ์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นให้เกิดโหมดลำดับต่าง ๆ และเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างกันเป็นลำดับแรก โดยที่ค่า S-parameter ของจุดป้อนแต่ละจุดหรือ $|S_{ii}|$ จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 ถึง 2.10 และคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะสรุปไว้ในตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.11 ถึง 2.13 จะเป็นการแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและกระตุ้นให้เกิดโหมดต่าง ๆ

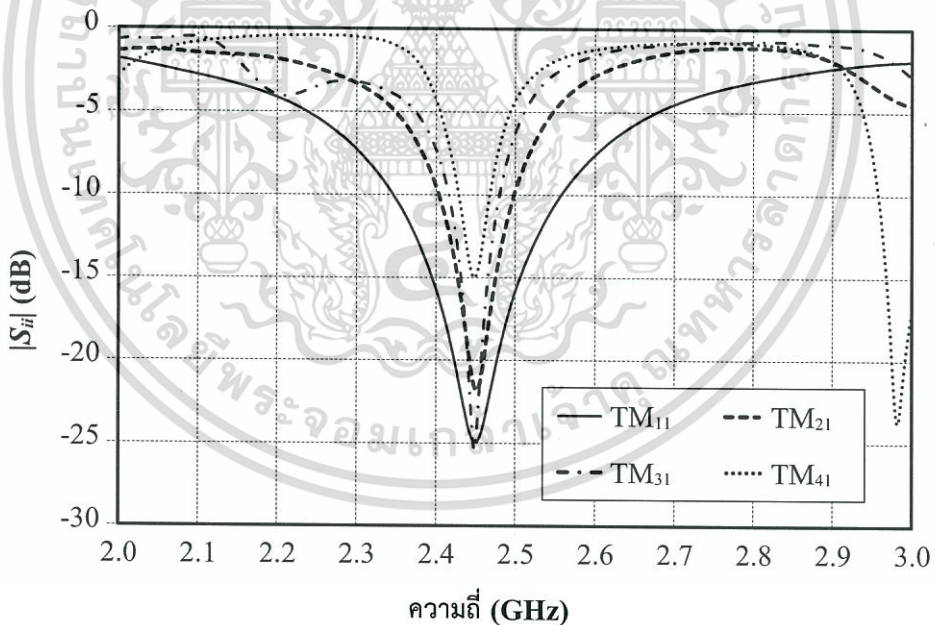


รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

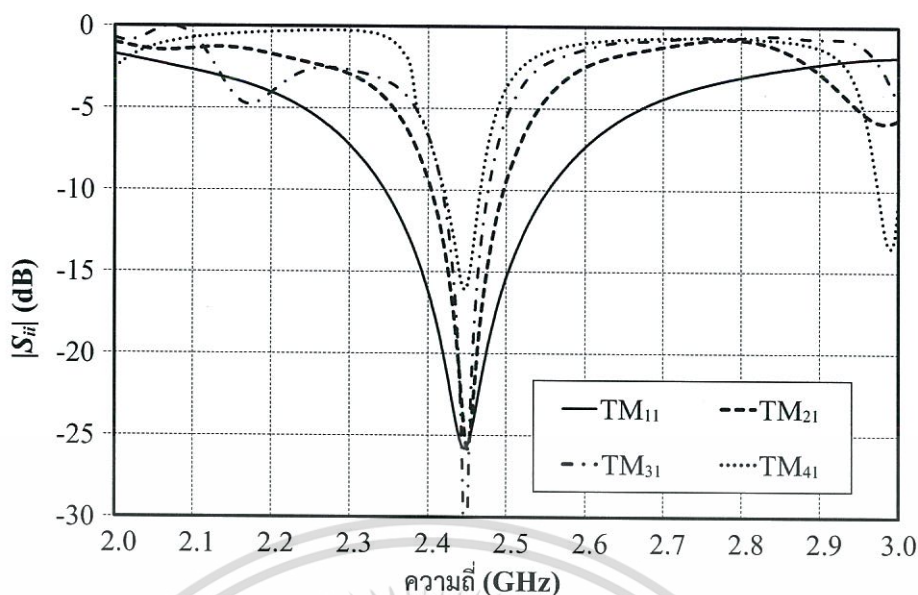


รูปที่ 2.8 $|S_{ii}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่า $\epsilon_r = 1.25$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz



รูปที่ 2.9 $|S_{ii}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่า $\epsilon_r = 2.2$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 $|S_{ii}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มี $\epsilon_r = 4.3$ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

จากค่า $|S_{ii}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่าง ๆ ในรูปที่ 2.8 ถึง 2.10 สังเกตได้ว่า ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมนั้นลดลงเมื่อกระตุ้นด้วยโหมดที่สูงขึ้น โดยที่ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมนั้นอยู่ที่ประมาณ 8.61 % (2.344 ถึง 2.555 GHz) 3.96 % (2.398 ถึง 2.495 GHz) 2.65 % (2.415 ถึง 2.480 GHz) และ 1.27 % (2.435 ถึง 2.466 GHz) จากความถี่ที่ใช้งาน (2.45 GHz) เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} TM_{21} TM_{31} และ TM_{41} ตามลำดับ แต่เมื่อกระตุ้นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมด้วยโหมดเดียวกัน และพิจารณาสายอากาศที่ใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างกัน พบว่า ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อกระตุ้นด้วยโหมดลำดับสูง เช่น โหมด TM_{41} พบว่า มีช่วงกว้างความถี่ที่ต่ำกว่า -10 dB มากกว่าหนึ่งช่วงกว้างความถี่ เนื่องจากขนาดของแผ่นตัวนำมีขนาดใหญ่พอที่จะทำให้โหมดลำดับสูงลำดับถัดไปเกิดขึ้นในช่วงความถี่ที่พิจารณา ถ้ามีการปรับปรุงและกระตุ้นสายอากาศให้เหมาะสมก็สามารถทำให้สายอากาศไมโครสตริปวงกลมนำไปประยุกต์ใช้งานแบบช่วงความถี่คู่หรือมากกว่าได้

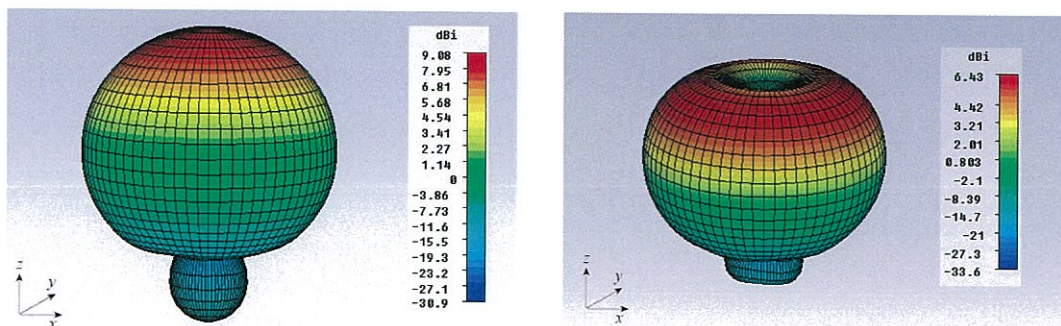
เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่าง ๆ จากตารางที่ 2.3 พบว่า เมื่อสายอากาศไมโครสตริปวงกลมกระตุ้นด้วยโหมดเดียวกัน เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำนั้นมีขนาดเล็กลงเมื่อ ϵ_r ของวัสดุฐานรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าพิจารณาในกรณีที่ใช้วัสดุฐานรองชนิดเดียวกัน พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อกระตุ้นด้วยโหมดที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของ ϵ_r กับขนาดของรัศมีของแผ่นตัวนำในสมการที่ 2.4

เมื่อพิจารณาคูณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมในตารางที่ 2.3 และจากรูปที่ 2.11 ถึง 2.13 พบว่าในกรณีที่ใช้วัสดุรองฐานที่มี $\epsilon_r = 1.25$ เมื่อกระตุ้นด้วยโหมดที่สูงขึ้น ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดจะมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มค่า ϵ_r ให้มากขึ้นก็จะยิ่งทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดลดลงอย่างมาก ในขณะที่ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อกระตุ้นด้วยโหมดที่สูงขึ้น แต่เมื่อเปลี่ยนวัสดุรองฐานที่มีค่า $\epsilon_r = 2.2$ และ 4.3 พบว่าประสิทธิภาพรวมของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมลดลงเมื่อกระตุ้นด้วยโหมดที่สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้วัสดุรองฐานที่มีค่า $\epsilon_r = 4.3$ และกระตุ้นด้วยโหมด TM_{41} นั้นมีประสิทธิภาพรวมของสายอากาศน้อยที่สุด ซึ่งถ้าประสิทธิภาพรวมของสายอากาศมีค่าน้อยก็จะทำให้อัตราขยายของสายอากาศมีค่าต่ำไปด้วย

ตารางที่ 2.3 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองชนิดต่างๆ ที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz

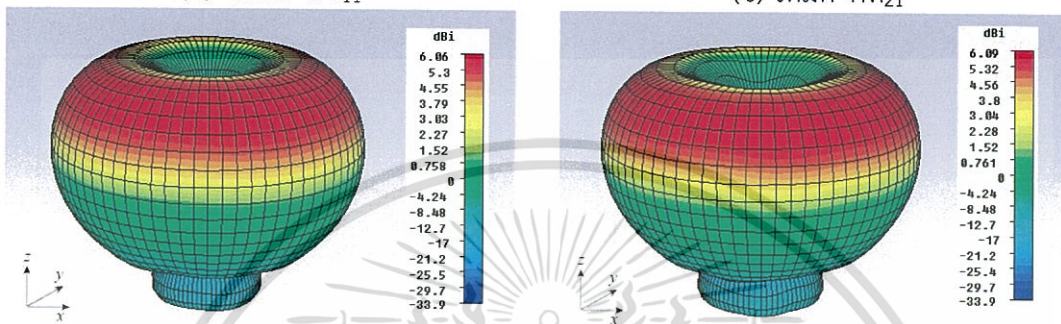
ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์	โหมดเรโซแนนซ์	มุมลำคลื่นที่มีขนาดสูงสุด (องศา)	ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (องศา)	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (dBi)	ประสิทธิภาพรวม (dB)	ชนิดโพลาริเซชันวงกลม	เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำ (λ)
1.25	1,1	0.0	67.6	9.080	-5.107	หมุนขวา	0.525
	2,1	34.0	41.1	6.426	-3.655	หมุนซ้าย	0.859
	3,1	42.0	37.7	6.061	-3.119	หมุนขวา	1.179
	4,1	47.0	35.0	6.085	-2.757	หมุนซ้าย	1.499
2.2	1,1	0.0	81.1	7.612	-5.046	หมุนขวา	0.400
	2,1	40.0	50.4	4.946	-4.081	หมุนซ้าย	0.653
	3,1	50.0	47.3	4.574	-4.165	หมุนขวา	0.898
	4,1	56.0	44.6	4.577	-4.515	หมุนซ้าย	1.138
4.3	1,1	0.0	95.5	6.141	-5.407	หมุนขวา	0.287
	2,1	46.0	58.5	3.316	-5.892	หมุนซ้าย	0.471
	3,1	58.0	57.8	2.770	-7.994	หมุนขวา	0.648
	4,1	65.0	84.2	2.758	-10.87	หมุนซ้าย	0.820

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โหมด TM_{11}

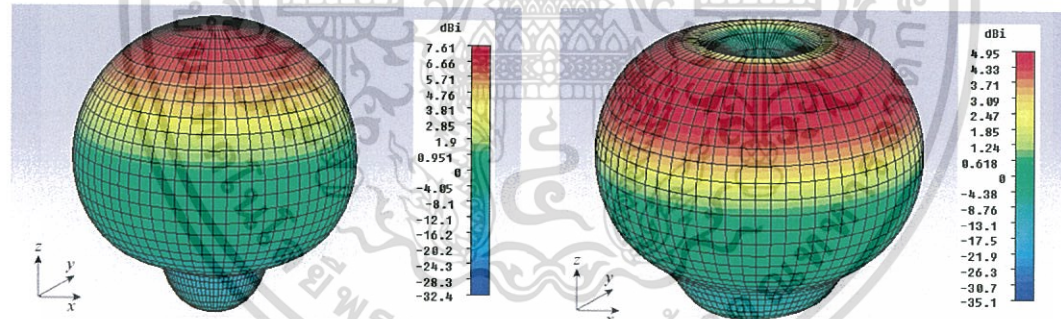
(ข) โหมด TM_{21}



(ค) โหมด TM_{31}

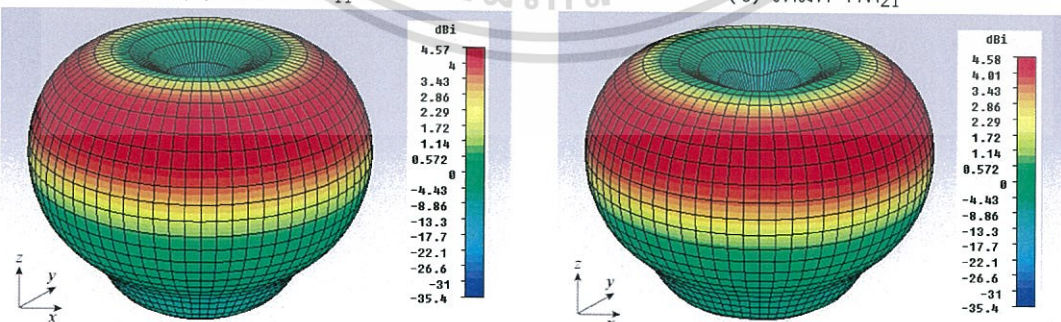
(ง) โหมด TM_{41}

รูปที่ 2.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ ไมโครสตริววงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองชนิดครึ่งฝั่ง ($\epsilon_r = 1.25$) ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz



(ก) โหมด TM_{11}

(ข) โหมด TM_{21}

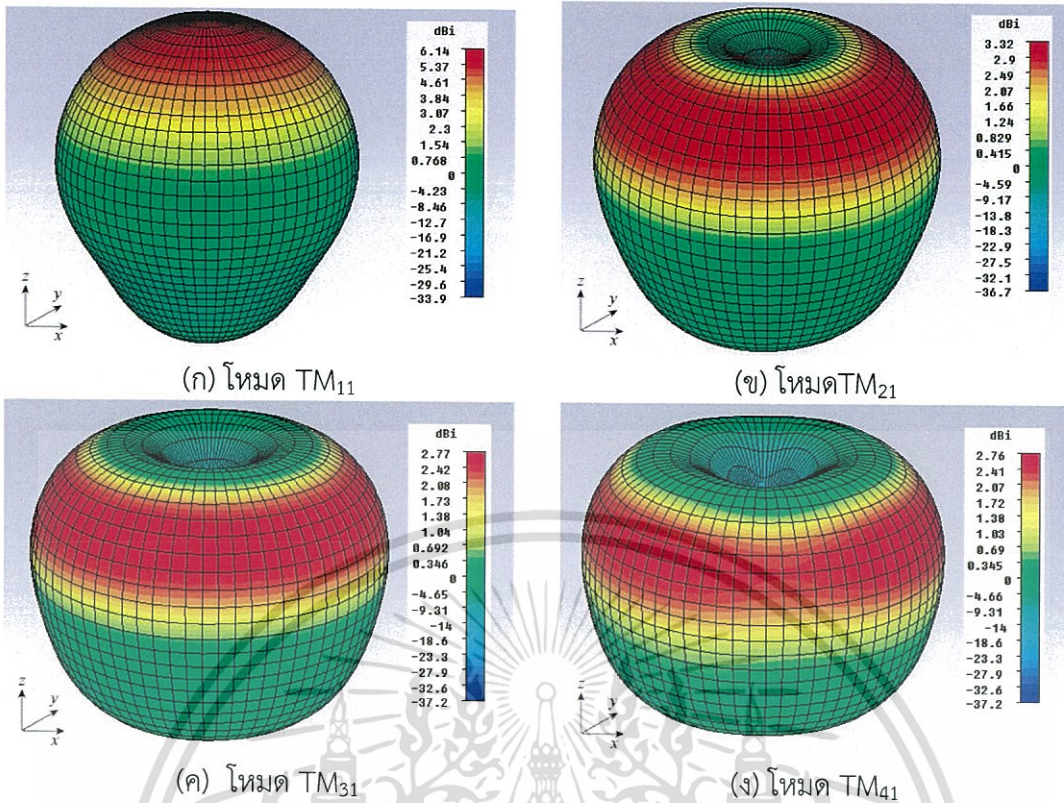


(ค) โหมด TM_{31}

(ง) โหมด TM_{41}

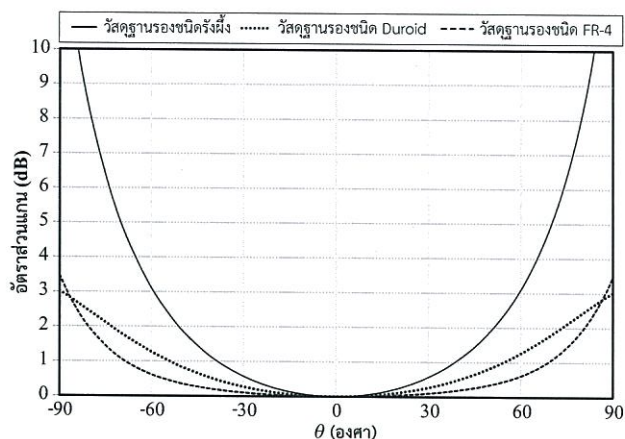
รูปที่ 2.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ ไมโครสตริววงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองชนิด Duriod ($\epsilon_r = 2.2$) ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

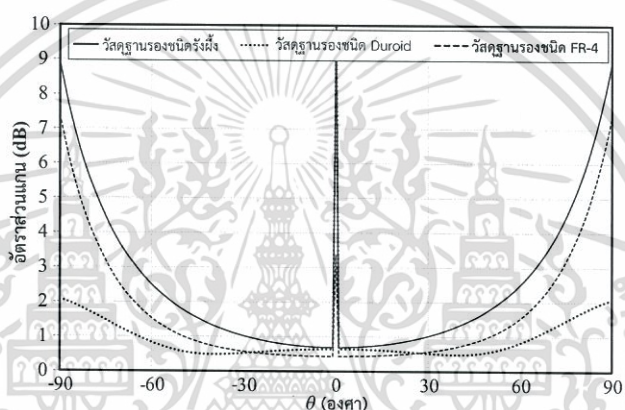


รูปที่ 2.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองชนิด FR-4 ($\epsilon_r = 4.3$) ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

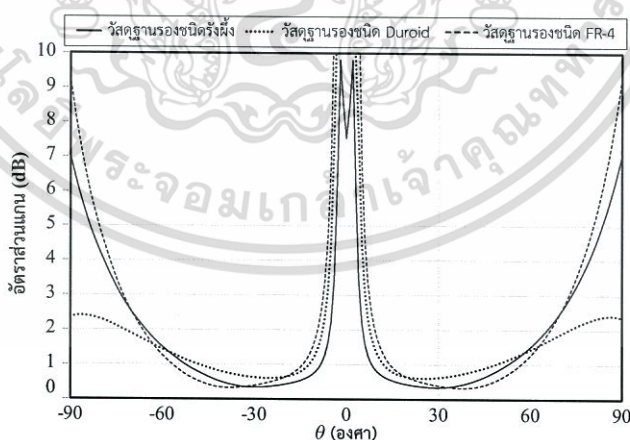
จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมดต่าง ๆ ในรูปที่ 2.11 ถึง 2.13 พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีลักษณะสมมาตรในแนวแกนตั้ง จึงทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ $\phi = 0^\circ$ และ $\phi = 90^\circ$ มีลักษณะเหมือนกัน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเริ่มจะไม่สมมาตรเมื่อถูกกระตุ้นด้วยโหมดลำดับสูง ๆ ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสำหรับโหมด TM_{41} ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ถูกกระตุ้นโหมด TM_{11} นั้นมีลักษณะเป็นแบบทิศทางเดียวตามแนวแกน z หรือ $\theta = 0^\circ$ ทั้งสามชนิดวัสดุฐานรอง แต่เมื่อกระตุ้นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมด้วยโหมดลำดับสูง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศก็จะมีลักษณะเป็นรูปกรวยซึ่งมีมุมลำคลื่นขนาดสูงสุดที่แตกต่างกันตามโหมดที่ถูกกระตุ้น กล่าวคือ เมื่อกระตุ้นด้วยโหมดที่สูงขึ้นจะทำให้มุมลำคลื่นที่มีขนาดสูงสุดมีค่ามากขึ้น ซึ่งทำให้ลำคลื่นที่มีขนาดสูงสุดมีมุมชี้ไปทางในระนาบแนวนอนหรือ $\theta = 90^\circ$ มากขึ้น และเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมดต่าง ๆ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลำคลื่นด้านหลัง พบว่าเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่า ϵ_r สูงขึ้น จะทำให้ลำคลื่นข้างหลังมีขนาดใหญ่ขึ้นไม่ว่าจะกระตุ้นด้วยโหมดใด ๆ ก็ตาม จึงทำให้ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางลดลง แต่ถ้าพิจารณาที่วัสดุฐานรองชนิดเดียวกัน พบว่า เมื่อโหมดที่มากกระตุ้นมีลำดับสูงขึ้นจะทำให้ความกว้างลำคลื่นที่กำลัง



รูปที่ 2.15 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

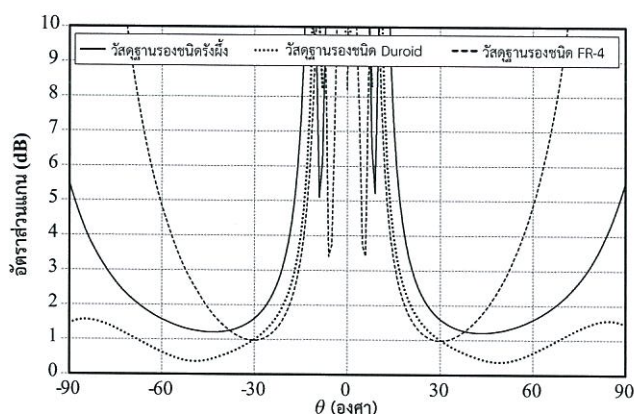


รูปที่ 2.16 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{21} ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz



รูปที่ 2.17 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{31} ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{41} ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

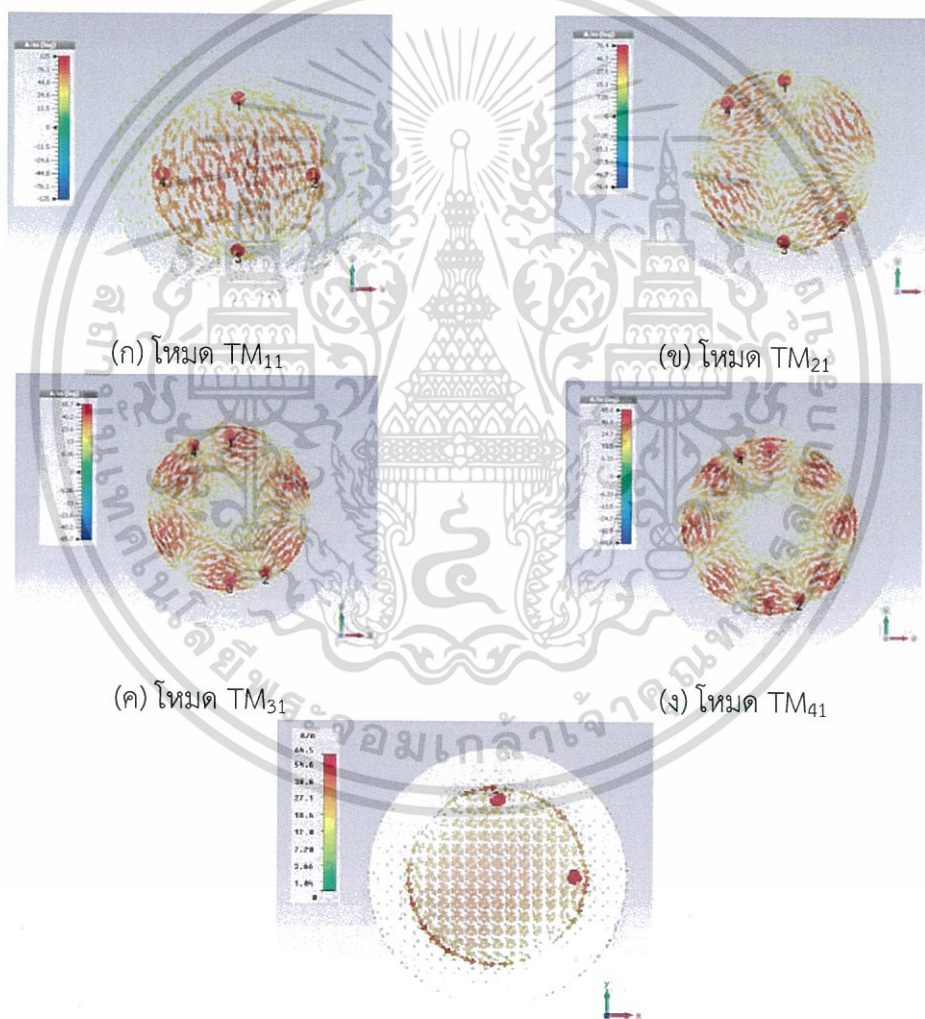
อัตราส่วนแกน (Axial ratio) เป็นคุณลักษณะหนึ่งที่น่ามาใช้พิจารณาว่าสายอากาศนั้นมีกาโรลาไรซ์แบบใดนั้น โดยที่สายอากาศโพลาริซวงกลมควรมีอัตราส่วนแกนน้อยกว่า 3 dB จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า เทคนิคการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนนั้นช่วยให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาริซวงกลมได้ สำหรับอัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนจะแสดงในรูปที่ 2.15 ถึง 2.18 ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันว่าเทคนิคการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนนั้นสามารถทำให้เกิดโพลาริซวงกลมได้จริง เมื่อพิจารณาตามโหมดที่ถูกกระตุ้น จากรูปที่ 2.15 แสดงอัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} พบว่า อัตราส่วนแกนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 dB ที่มุมลำคลื่นที่มีขนาดสูงสุด ($\theta = 0^\circ$) ทุกชนิดวัสดุฐานรอง ซึ่งโพลาริซวงกลมที่ได้นั้นมีความสมมาตรที่ดีเยี่ยมทั้งสองแนวแกน โดยความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมนั้นเท่ากับ 120° 178° และ 176° เมื่อใช้วัสดุฐานรองชนิดรีงฝิ่ง ชนิด Duroid และชนิด FR-4 ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 2.16 ถึง 2.18 แสดงอัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมดลำดับสูง พบว่า อัตราส่วนแกนมีค่าต่ำสุด ณ มุมลำคลื่นที่มีขนาดสูงสุดของสายอากาศ (มุมลำคลื่นรูปกรวย) ทุกชนิดวัสดุฐานรอง โดยค่าอัตราส่วนแกนต่ำสุดนั้นมีค่าเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุฐานรองและมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 3 dB ซึ่งยังถือว่าเป็นโพลาริซวงกลมอยู่ ส่วนความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมนั้นมีค่าแตกต่างกันตามโหมดที่ถูกกระตุ้นและวัสดุฐานรอง จากรูปที่ 2.16 ถึง 2.18 พบว่า เมื่อกระตุ้นสายอากาศด้วยโหมดลำดับที่สูงขึ้น ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมนั้นมีขนาดแคบลง ซึ่งเห็นได้อย่างชัดในรูปที่ 2.18 โดยสายอากาศจะถูกกระตุ้นด้วยโหมด TM_{41} และเมื่อพิจารณาช่วงกว้างความถี่ที่สายอากาศมีโพลาริซวงกลม พบว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนนั้นมีโพลาริซวงกลม (อัตราส่วนแกนค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 dB) ตลอดช่วงกว้างความถี่ที่พิจารณา (2 ถึง 3 GHz)

เมื่อพิจารณาการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ได้จากการจำลองในรูปที่ 2.19 พบว่าลักษณะของการกระจายกระแสเป็นไปตามลักษณะของโหมดที่ถูกกระตุ้นซึ่งสามารถทำได้โดยจัดวางจุดป้อนให้มีระยะเชิงมุมที่เหมาะสมตามตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.6 สำหรับในรูปที่ 2.19 (ก) เป็นแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่กระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} พบว่าลักษณะการกระจายกระแสมีความสม่ำเสมอทั่วแผ่นตัวนำ ส่วนรูปที่ 2.19 (ข) ถึง 2.19 (ง) แสดงแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่กระตุ้นด้วยโหมดลำดับสูง TM_{21}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TM_{31} และ TM_{41} ตามลำดับ ซึ่งพบว่าลักษณะการกระจายกระแสมีลักษณะลูกคลื่นเกิดขึ้นตามเป็นจำนวนสองเท่าของเลขโหมด ซึ่งโหมดเหล่านี้จะทำให้สายอากาศมีแบบรูปการกระจายคลื่นแบบรูปกรวย

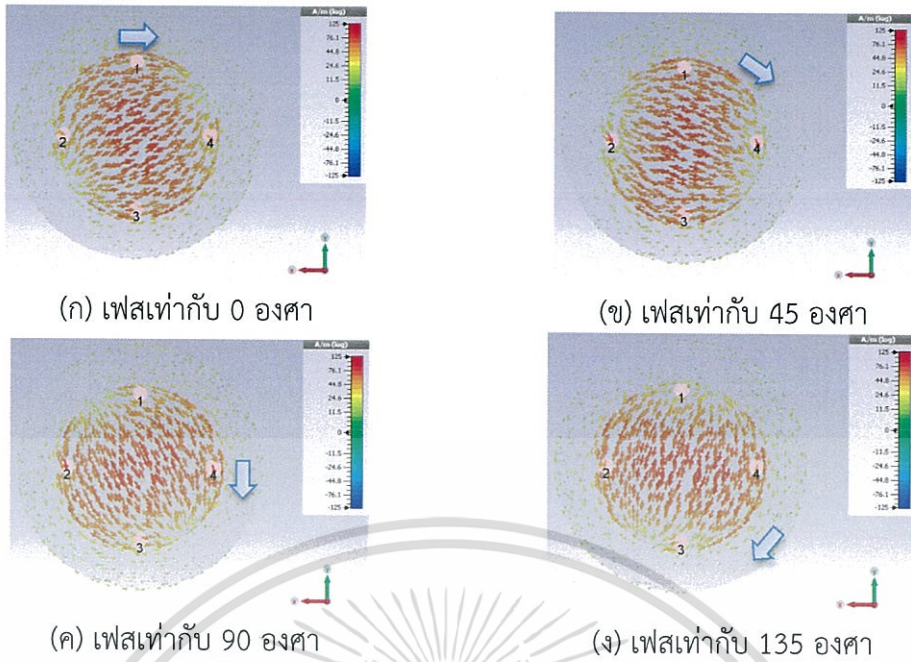
สำหรับในรูปที่ 2.19 (จ) จะแสดงแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่กระตุ้นด้วยสองจุดป้อน พบว่าลักษณะการกระจายกระแสจะไม่สม่ำเสมอทั่วแผ่นตัวนำเหมือนโหมด TM_{11} ในรูปที่ 2.19 (ก) ซึ่งเป็นเพราะว่ามีโหมดลำดับสูงเกิดขึ้น สำหรับในกรณีนี้จะส่งผลให้สายอากาศไมโครสตริปวงกลมไม่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่พิจารณา เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จะต้องกำจัดโหมดลำดับสูงที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มจุดป้อนขึ้นอีกสองจุด โดยมีตำแหน่งในทิศตรงข้ามกับจุดป้อนสองจุดเดิมทางตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น จุดป้อนสองจุดที่เพิ่มเข้ามานั้นจะช่วยให้ลักษณะการกระจายกระแสมีความสม่ำเสมอทั่วแผ่นตัวนำซึ่งเป็นลักษณะการกระจายกระแสของโหมด TM_{11}



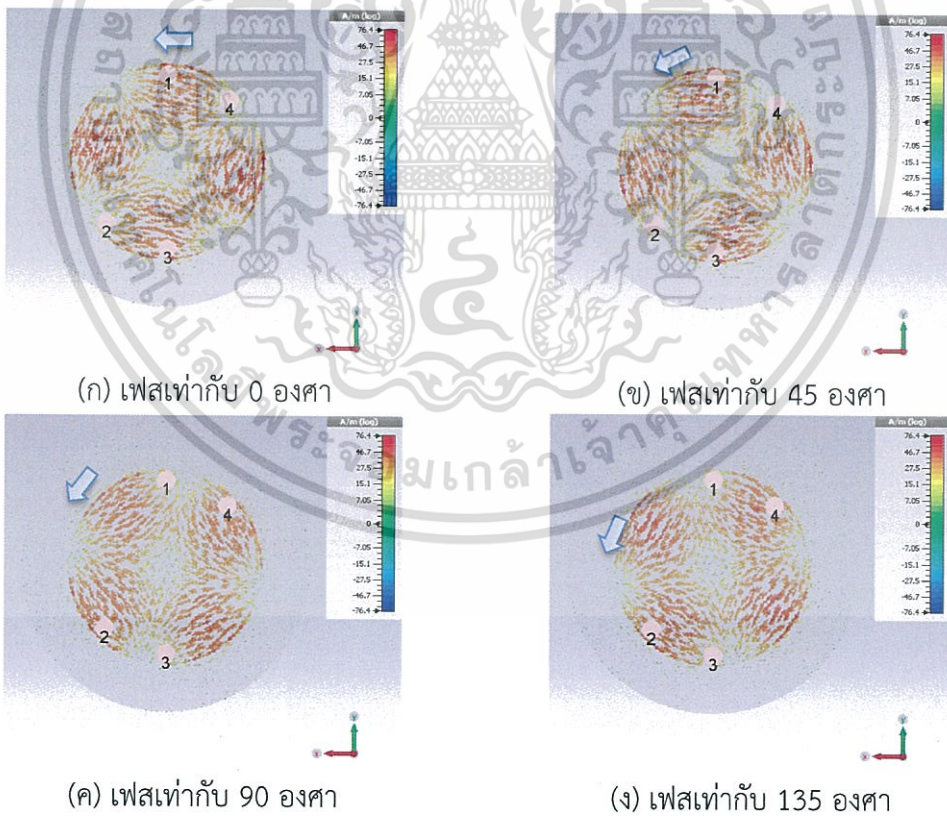
(จ) กรณีกระตุ้นด้วยสองจุดป้อน

รูปที่ 2.19 รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีลักษณะตามการกระตุ้นด้วยโหมดต่าง ๆ ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} จากมุมมองด้านหลังที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz



รูปที่ 2.21 รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{21} จากมุมมองด้านหลังที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากอัตราส่วนแกน พบว่า สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนนั้น สร้างโพลาริซวงกลมที่มีสมรรถนะสูง สำหรับทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมสามารถดูได้จากการพิจารณารูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศจากมุมมองด้านหลังของสายอากาศ ในรูปที่ 2.20 แสดงรูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} พบว่าทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมนั้นหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนขวา ส่วนรูปที่ 2.21 แสดงรูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{21} ซึ่งพบว่าทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมจะหมุนทวนเข็มนาฬิกาหรือหมุนซ้าย และจากชนิดการโพลาริซที่ได้จากผลการจำลองในตารางที่ 2.3 พบว่า โหมดลำดับเลขคี่นั้นมีโพลาริซชนิดหมุนขวา ซึ่งมีการกระตุ้นจุดป้อนทั้งสี่ด้วยการจัดเฟส 0° 90° 180° 270° ส่วนโหมดเลขคู่มีโพลาริซชนิดหมุนซ้าย ซึ่งมีการกระตุ้นจุดป้อนทั้งสี่ด้วยการจัดเฟส 0° 90° 0° 90° แต่ถ้าต้องการสลับชนิดการโพลาริซวงกลมของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม ก็สามารถทำได้โดยการกลับเฟสที่นำมากระตุ้นจุดป้อนทั้งสี่ สำหรับโหมดเลขคี่ที่ต้องการเปลี่ยนชนิดการโพลาริซวงกลมจากหมุนขวาให้เป็นหมุนซ้าย สามารถทำได้โดยกลับเฟสที่นำมากระตุ้นจาก 0° 90° 180° 270° เป็น 0° 270° 180° 90° ส่วนโหมดเลขคู่สามารถเปลี่ยนชนิดการโพลาริซวงกลมจากหมุนซ้ายให้เป็นหมุนขวา ทำได้โดยกลับเฟสที่นำมากระตุ้นจาก 0° 90° 0° 90° เป็น 90° 0° 90° 0°

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์ของสายอากาศตั้งต้น

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ
เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำวงกลม (d)	0.287λ	35.14 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุฐานรอง และแผ่นระนาบกราวด์ (D)	0.431λ ($1.5 d$)	52.71 mm
ความสูงของวัสดุฐานรอง (h)	0.012λ	1.50 mm
ระยะห่างจุดป้อนจากกึ่งกลางของแผ่นตัวนำ (P)	0.129λ ($0.9p$)	15.81 mm
มุมระหว่างจุดป้อนที่อยู่ติดกัน (α)		90°
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r)		4.3 (FR-4)
โหมดกระตุ้น		TM_{11}

หลังจากได้จำลองสายอากาศไมโครสตริปวงกลมตั้งต้นเมื่อกระตุ้นด้วยโหมดลำดับต่าง ๆ และใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างกัน ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้รู้ถึงข้อดีและข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมในแต่ละกรณี จากผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเลือกวัสดุฐานรองและโหมดที่นำมากระตุ้น สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้วัสดุฐานรองชนิด FR-4 ด้วยเหตุผลที่ว่าเมื่อเลือกใช้วัสดุฐานรองดังกล่าวจะช่วยให้สายอากาศมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุฐานรองอีกสองชนิดที่เหลือ นอกจากนี้วัสดุฐานรองชนิด FR-4 ยังสามารถหาได้ง่ายและราคาไม่แพง ส่วนโหมดที่นำมากระตุ้นให้กับสายอากาศตั้งต้นนั้นจะเป็นโหมด TM_{11} ซึ่งเป็นโหมดพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวซึ่งสอดคล้องกับความต้องการของสายอากาศที่กำหนดไว้ นอกจากนี้เมื่อสายอากาศถูกกระตุ้นด้วยโหมดนี้จะทำให้

สายอากาศมีโพลาริซวงกลมและมีขนาดเล็กกว่าสายอากาศที่ถูกกระตุ้นด้วยโหมดลำดับสูง สำหรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศตั้งต้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.4 ดังนั้นเมื่อกำหนดพารามิเตอร์ของสายอากาศตั้งต้นได้แล้ว จากนั้นจะทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ของสายอากาศในหัวข้อถัดไป

2.4 การศึกษาพารามิเตอร์สายอากาศ

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในหัวข้อที่ผ่านมาถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดพารามิเตอร์ของสายอากาศตั้งต้นสำหรับการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ในการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์สายอากาศนั้น เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตั้งต้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษาเพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้น เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาปรับปรุงสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่โพลาริซวงกลมสมรรถนะสูงและเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานต่อไป

สำหรับพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษามีดังต่อไปนี้

- ขนาดแผ่นตัวนำวงกลม
- ความหนาของวัสดุฐานรอง
- ขนาดวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์
- ตำแหน่งจุดป้อน

2.4.1 ขนาดของแผ่นตัวนำวงกลม

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปวงกลม ขนาดแผ่นตัวนำวงกลมถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเนื่องจากเป็นตัวกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ จากสมการความถี่เรโซแนนซ์ f_{nm} ในสมการที่ 2.4 พบว่า ถ้ารัศมีแผ่นตัวนำวงกลมเปลี่ยนจะส่งผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนไปด้วย และเมื่อนำมาจัดรูปเพื่อหารัศมีของแผ่นตัวนำวงกลมเริ่มต้นหรือ a_0 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$a_0 = \frac{X_{nm}}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \lambda_c \quad (2.25)$$

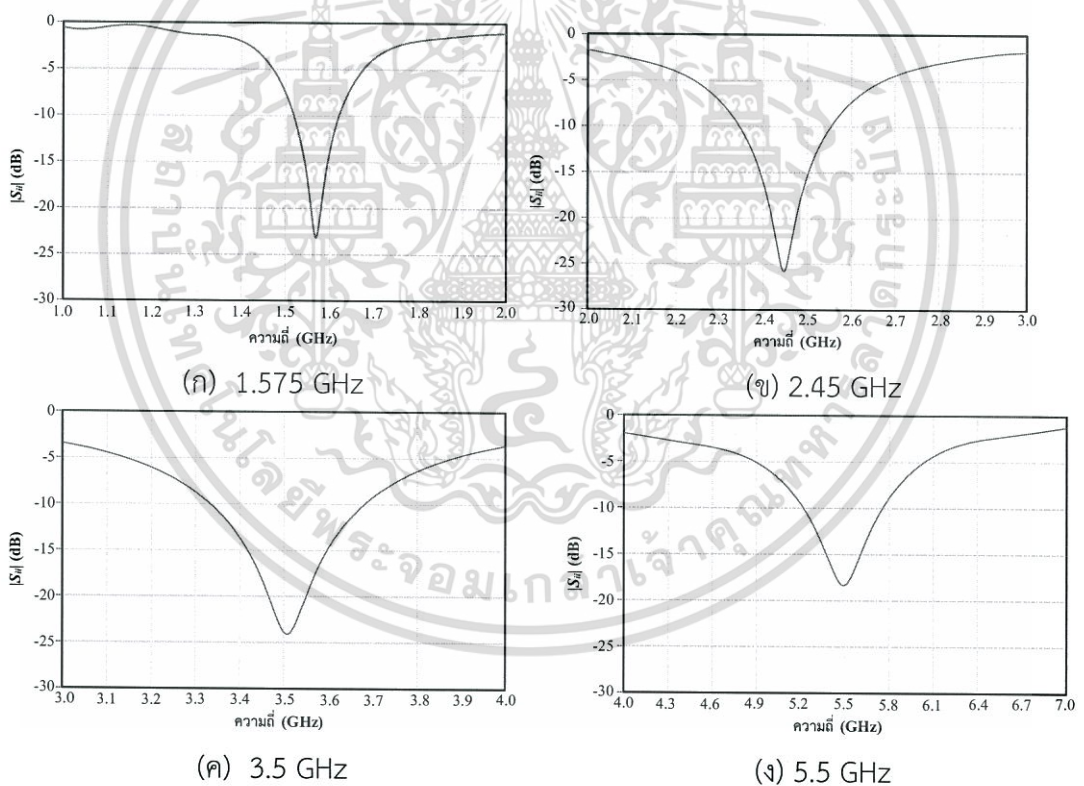
โดยที่ λ_c เป็นความยาวคลื่นที่พิจารณา และเมื่อกำหนดให้ $\epsilon_r = 4.3$ และ $X_{nm} = 1.841$ จะทำให้ได้รัศมีแผ่นตัวนำวงกลมของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ใช้วัสดุฐานรองชนิด FR-4 และกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} โดยที่เขียนให้อยู่ในรูปของความยาวคลื่นได้เป็น

$$a_0 = 0.1413\lambda_c \quad (2.26)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.26 พบว่ารัศมีของแผ่นตัวนำวงกลมนั้นแปรผันตรงกับความยาวคลื่นที่พิจารณา เมื่อปรับเปลี่ยนขนาดรัศมีของแผ่นตัวนำให้สอดคล้องกับความยาวคลื่นที่พิจารณา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็สามารถทำให้สายอากาศไมโครสตริปวงกลมนำไปประยุกต์ใช้งานที่ความถี่ที่ต้องการได้ เนื่องจากขนาดของรัศมีแผ่นตัวนำวงกลมปรับเปลี่ยนไปตามความยาวคลื่น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของรัศมีของแผ่นตัวนำวงกลม โดยจะพิจารณาขนาดของแผ่นตัวนำวงกลมให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ ประกอบด้วยความถี่ 1.575 GHz (GPS) 2.45 GHz (Wireless LAN) 3.5 GHz (WiMax) และ 5.5 GHz (Wireless LAN) ซึ่งแต่ละความถี่นั้นมีขนาดรัศมีของแผ่นตัวนำวงกลมที่แตกต่างกันตามความยาวคลื่น ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.22 ถึง 2.24 และสรุปไว้ในตารางที่ 2.5

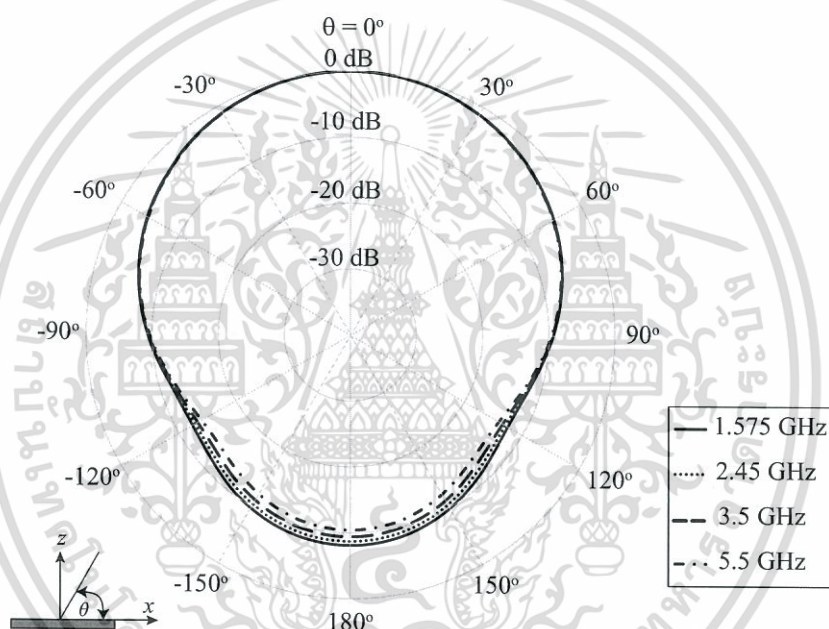
ในรูปที่ 2.22 จะแสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ สังเกตได้ว่า ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจะกว้างมากกว่าเมื่อรัศมีแผ่นตัวนำเรโซแนนซ์ที่ความถี่สูง (สายอากาศมีขนาดเล็ก) โดยที่ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมนั้นอยู่ที่ประมาณ 6.48 % (1.518 ถึง 1.620 GHz) 8.49 % (2.345 ถึง 2.553 GHz) 9.97 % (3.333 ถึง 3.682 GHz) และ 9.709 % (5.218 ถึง 5.752 GHz) จากความถี่ที่พิจารณา เมื่อพิจารณาสายอากาศให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 1.575 GHz 2.45 GHz 3.5 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ



รูปที่ 2.22 $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ

ตารางที่ 2.5 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้
เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ

ความถี่ เรโซแนนซ์ (GHz)	ความกว้าง ลำคลื่นที่ กำลังลดลง ครึ่งหนึ่ง (องศา)	ค่าสภาพ เจาะจง ทิศทางสูงสุด (dB)	ประสิทธิภาพ รวม (dB)	ชนิด โพลาไรซ์ วงกลม	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง แผ่นตัวนำ (λ)	ความยาว คลื่น (mm)
1.575	96.1	6.042	-6.540	หมุนขวา	0.284	190.5
2.45	95.5	6.141	-5.407	หมุนขวา	0.287	122.45
3.5	94.9	6.231	-4.410	หมุนขวา	0.291	85.71
5.5	94.1	6.359	-2.871	หมุนขวา	0.297	54.54

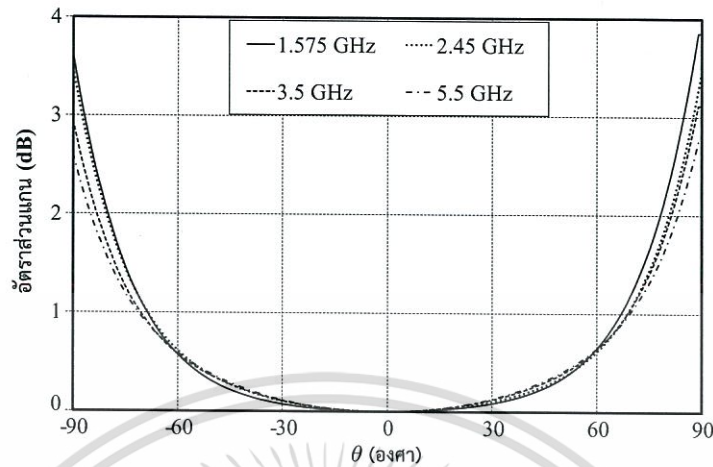


รูปที่ 2.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนอร์มัลไลซ์ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศ
ไมโครสตริปวงกลมเมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาคูณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 พบว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดของสายอากาศเมื่อเลือกรัศมีแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สายอากาศที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่สูงจะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงกว่า ในขณะที่ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำ (สายอากาศมีขนาดใหญ่) จะต่ำกว่าประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่สูง (สายอากาศมีขนาดเล็ก) ส่งผลให้ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่สูงมีค่าดีกว่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลำคลื่นด้านหลังในรูปที่ 2.23 พบว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อเรโซแนนซ์ที่ความถี่สูง จะมีระดับลำคลื่นด้านหลังที่น้อยกว่าสายอากาศที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่สูงแต่ไม่ต่างกันมากนัก เช่นเดียวกับความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง กล่าวคือสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครสตริปวงกลมที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่สูงนั้นมีความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่น้อยกว่าสายอากาศที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่สูง ส่งผลให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางดีขึ้น



รูปที่ 2.24 อัตราส่วนแอมป์ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ

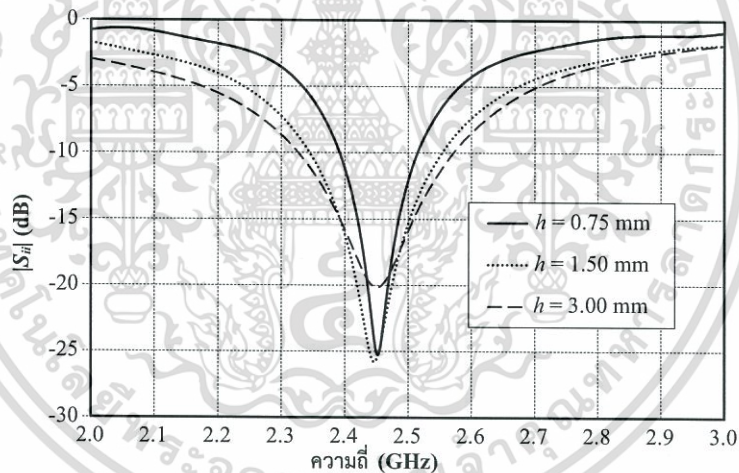
จากอัตราส่วนแอมป์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ ในรูปที่ 2.24 พบว่า สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนไม่ว่าจะเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใดก็ตาม อัตราส่วนแอมป์มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 dB ณ มุมลำคลื่นที่มีขนาดสูงสุด ($\theta = 0^\circ$) เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} ซึ่งบ่งบอกมีสายอากาศมีโพลาริซวงกลมที่มีความสมมาตรในทั้งสองแนวแกน ส่งผลให้ได้โพลาริซที่มีสมรรถนะสูง แต่เมื่อพิจารณาความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลม พบว่า สายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำนั้นมีความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมน้อยกว่าเมื่อเรโซแนนซ์ที่ความถี่สูง แต่ก็แตกต่างกันไม่มาก โดยที่ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมนั้นจะเท่ากับ 172° และ 176° เมื่อสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 1.575 GHz และ 2.45 GHz ตามลำดับ ที่ความถี่ 3.5 GHz และ 5.5 GHz นั้น ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมจะมีค่ามากกว่า 180° ซึ่งหมายความว่าสายอากาศมีโพลาริซวงกลมครอบคลุมลำคลื่นด้านหน้าทั้งหมด ส่วนทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมของสายอากาศในกรณีนี้นั้นเป็นโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนขวา เนื่องจากกระตุ้นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมด้วยโหมดเลขคู่ซึ่งมีการกระตุ้นจุดป้อนทั้งสี่ด้วยการจัดเฟส 0° 90° 180° 270° จะทำให้เกิดการโพลาริซชนิดหมุนขวา

จากการศึกษาผลกระทบของรัศมีของแผ่นตัวนำวงกลม สรุปได้ว่าการนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลมไปประยุกต์ใช้งานที่ความถี่ต่าง ๆ สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดของรัศมีของแผ่นตัวนำให้สอดคล้องกับความยาวคลื่นของความถี่ที่ต้องการ โดยที่คุณสมบัติหรือสมรรถนะที่ความถี่นั้นจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำจะมีประสิทธิภาพรวมของสายอากาศต่ำ ส่งผลให้ค่าอัตราขยายของสายอากาศต่ำไปด้วย ดังนั้นถ้าจะนำสายอากาศไมโครสตริปไปใช้งานที่ความถี่ต่ำ ควรปรับแต่งสายอากาศให้มีค่าประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่ดีขึ้น สำหรับเทคนิคการปรับแต่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป

2.4.2 ความหนาของวัสดุฐานรอง

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับผลกระทบของความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก โดยปกติวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกนั้นมีความหนาอยู่ที่ $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$ เนื่องจากกำหนดให้สายอากาศนำมาใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz ดังนั้นความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกควรอยู่ระหว่าง 0.35 มิลลิเมตร ถึง 6.12 มิลลิเมตร สำหรับในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของความหนาวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก โดยจะพิจารณาวัสดุฐานรองที่มีความหนา 0.75 มิลลิเมตร 1.50 มิลลิเมตร และ 3.00 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความหนาวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่มีใช้ในเชิงพาณิชย์ ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่าง ๆ จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.25 ถึง 2.27 และสรุปไว้ในตารางที่ 2.6

เมื่อสังเกตค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่าง ๆ ในรูปที่ 2.25 พบว่า สายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาน้อยนั้นให้ช่วงกว้างความถี่ที่แคบกว่าเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนามาก โดยที่ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมนั้นจะอยู่ที่ประมาณ 5.02 % (2.392 ถึง 2.515 GHz) 8.49 % (2.345 ถึง 2.553 GHz) และ 9.96 % (2.327 ถึง 2.571 GHz) จากความถี่ที่ใช้งาน (2.45 GHz) สำหรับวัสดุฐานรองที่มีความหนา 0.75 มิลลิเมตร 1.50 มิลลิเมตร และ 3.00 มิลลิเมตร ตามลำดับ



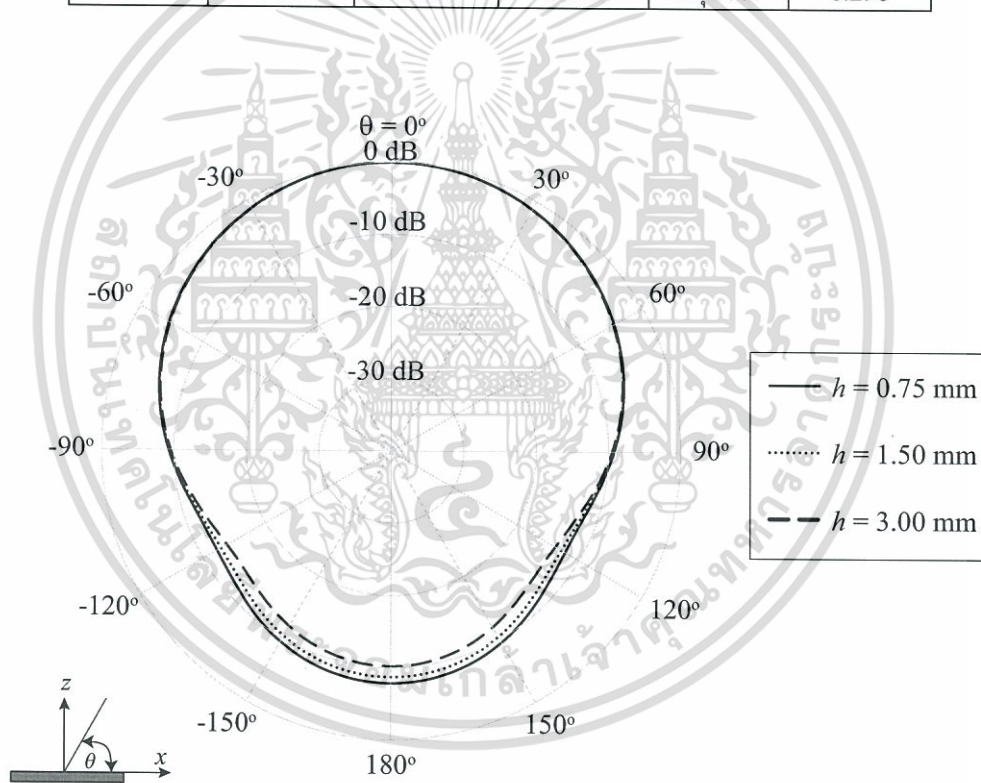
รูปที่ 2.25 $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่าง ๆ

จากเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่าง ๆ จากตารางที่ 2.6 พบว่า เมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนาน้อยกว่าจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่าสายอากาศที่ใช้วัสดุฐานรองที่หนากว่าแต่ก็ไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อพิจารณาคณะลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ พบว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนาขึ้นเช่นเดียวกับประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ กล่าวคือ เมื่อใช้วัสดุฐานรองบางจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าสายอากาศที่วัสดุฐานรองหนา ส่งผลให้อัตราขยายของสายอากาศที่มีวัสดุ

ฐานรองหามีค่าที่ดีกว่า ตรงข้ามกับค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งและระดับลำคลื่นด้านหลังที่มีค่าลดลงและเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 2.26 ซึ่งส่งผลให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงชันนั่นเอง

ตารางที่ 2.6 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่างๆ โดยมีความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz

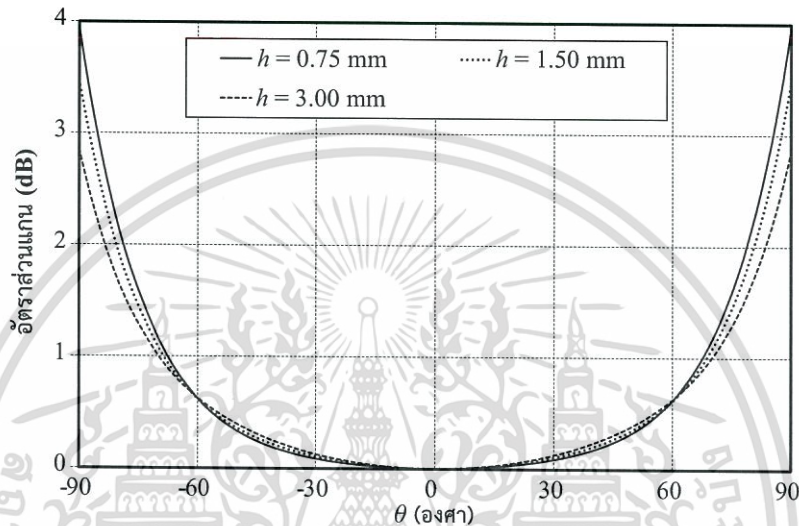
ความสูงของวัสดุฐานรอง (mm)	ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (องศา)	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (dB)	ประสิทธิภาพรวม (dB)	ชนิดโพลาริซวงกลม	เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำ (λ)
0.75	96.1	6.019	-6.603	หมุนขวา	0.281
1.50	95.5	6.141	-5.407	หมุนขวา	0.287
3.00	94.3	6.328	-3.245	หมุนขวา	0.296



รูปที่ 2.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนอร์มัลไลซ์ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่างๆ

จากอัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่างๆ ในรูปที่ 2.27 พบว่า สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนยังคงมีอัตราส่วนแกนที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 dB ณ มุมลำคลื่นที่มีขนาดสูงสุด ($\theta = 0^\circ$ เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11}) ไม่ว่าจะใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาใด ๆ ก็ตาม แต่เมื่อมาพิจารณาความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลาริซวงกลม พบว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองบางนั้นจะมีความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมน้อยกว่าสายอากาศที่ใช้วัสดุฐานรองหนา แต่ก็แตกต่างกันไม่มาก โดยที่ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมนั้นเท่ากับ 170° และ 176° สำหรับวัสดุฐานรองที่มีความหนา 0.75 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนที่ 3.00 มิลลิเมตรนั้น จะมีโพลาริซวงกลมครอบคลุมลำคลื่นด้านหน้าทั้งหมด และเนื่องจากมีการกระตุ้นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมด้วยโหมดเลขคี่จึงทำให้ทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมของสายอากาศในกรณีนี้เป็นโพลาริซหมุนทวนเข็มนาฬิกาหรือหมุนขวา



รูปที่ 2.27 อัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่าง ๆ

จากการศึกษาผลกระทบของความหนาของวัสดุฐานรอง สรุปได้ว่า ความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกจะส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และช่วงกว้างความถี่อย่างชัดเจน รวมถึงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยเฉพาะประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ ถึงแม้ว่าวัสดุฐานรองหนาจะให้คุณสมบัติและสมรรถนะที่ดีกว่า แต่สายอากาศจะมีขนาดใหญ่กว่าและยุ่งยากสำหรับการนำไปสร้างใช้งานจริง

2.4.3 ขนาดวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการศึกษขนาดวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดขนาดรวมของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่นำเสนอ ในทางปฏิบัติแล้ววัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ขนาดใหญ่ นั้นไม่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้งานจริง และควรมีขนาดเล็กเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นในการศึกษาผลกระทบขนาดวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์นั้นจะกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ให้เท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำ ($D = d$) จากนั้นจะทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ D ให้มากขึ้น เพื่อหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

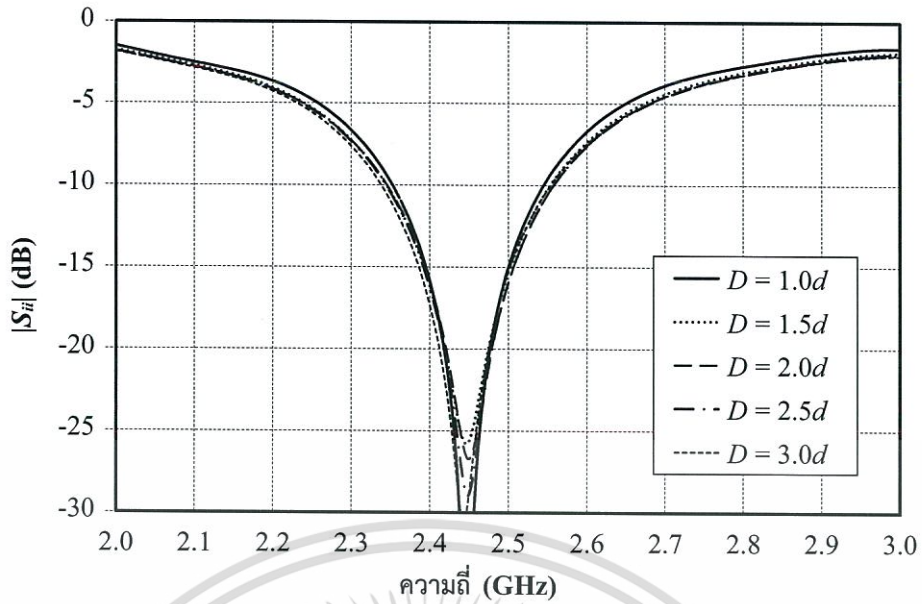
กราวนด์ที่เหมาะสมต่อไป ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ขนาดต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.28 ถึง 2.31 และสรุปไว้ในตารางที่ 2.7

จากรูปที่ 2.28 สังเกตได้ว่าค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ขนาดต่าง ๆ จะสังเกตได้ว่า ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมทุกขนาดนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ช่วงกว้างความถี่มีค่าเท่ากับ 7.84 % (2.353 ถึง 2.545 GHz) 8.49 % (2.345 ถึง 2.553 GHz) 8.61 % (2.346 ถึง 2.557 GHz) 8.69 % (2.344 ถึง 2.557 GHz) และ 8.78 % (2.338 ถึง 2.553 GHz) จากความถี่ที่ใช้งาน (2.45 GHz) เมื่อพารามิเตอร์ D เท่ากับ $1.00d$ $1.5d$ $2.0d$ $2.5d$ และ $3.00d$ ตามลำดับ และจากผลการจำลองในตารางที่ 2.7 เมื่อพิจารณาขนาดแผ่นตัวนำของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำจะลู่เข้าสู่ค่า 0.287λ แม้ว่าขนาดวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ใหญ่มากขึ้นก็ตาม ซึ่งหมายความว่าขนาดของวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์นั้นไม่มีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ

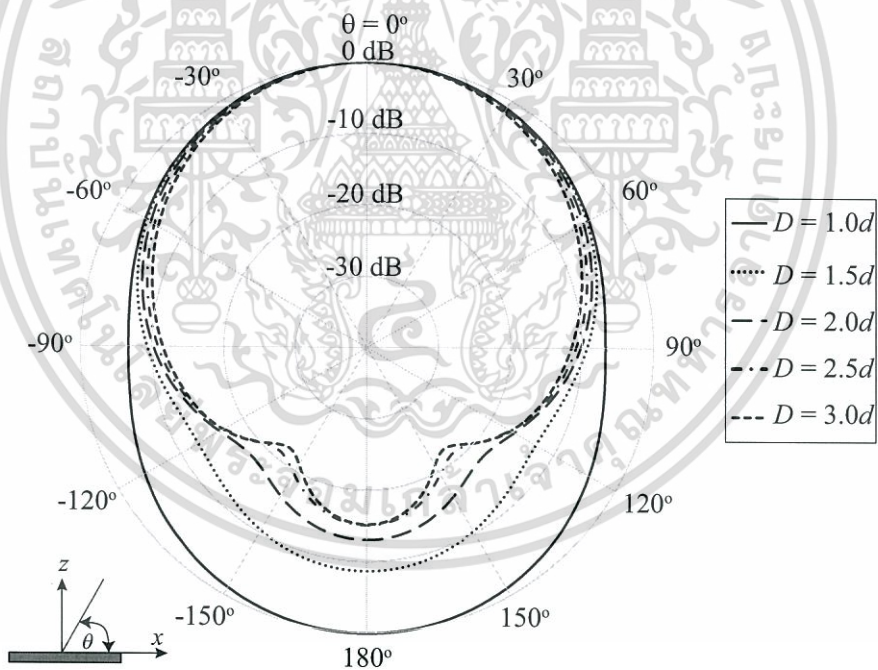
ตารางที่ 2.7 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ขนาดต่างๆ ที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz

เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ (mm)	ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (องศา)	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (dB)	ประสิทธิภาพรวม (dB)	ชนิดโพลาริซวงกลม	เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำ (λ)
1.00d	98.4	3.445	-9.323	หมุนขวา	0.302
1.50d	95.5	6.141	-5.407	หมุนขวา	0.287
2.00d	89.1	6.814	-5.605	หมุนขวา	0.287
2.50d	83.1	7.232	-6.151	หมุนขวา	0.287
3.00d	77.9	7.621	-6.456	หมุนขวา	0.287

ถึงแม้ว่าขนาดวัสดุฐานรองและระนาบกราวนด์ไม่ส่งผลต่อขนาดของแผ่นตัวนำ แต่เมื่อพิจารณาคูณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากรูปที่ 2.29 และ 2.30 พบว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศในรูปที่ 2.30 (ก) จะมีเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดวัสดุฐานรองและระนาบกราวนด์เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ไม่สูงและมีแนวโน้มลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง ในขณะที่ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศจะต่ำสุด เมื่อขนาดของวัสดุฐานรองและระนาบกราวนด์เท่ากับขนาดแผ่นตัวนำ ($D = d$) และประสิทธิภาพรวมของสายอากาศจะสูงขึ้นจนถึงค่า D ที่ไม่มีผลต่อความเรโซแนนซ์ ประสิทธิภาพรวมก็เริ่มจะลดลงและลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง ในขณะที่ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งและระดับลำคลื่นด้านหลังนั้นลดลงสามารถเห็นได้ชัดในรูปที่ 2.29 และ 2.30 (ข) ซึ่งเป็นผลให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงขึ้นนั่นเอง

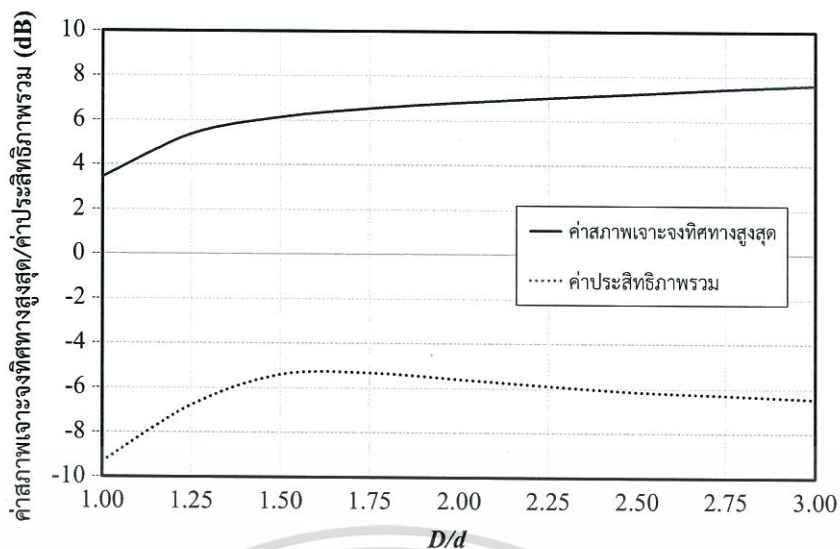


รูปที่ 2.28 $|S_{ii}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ขนาดต่าง ๆ

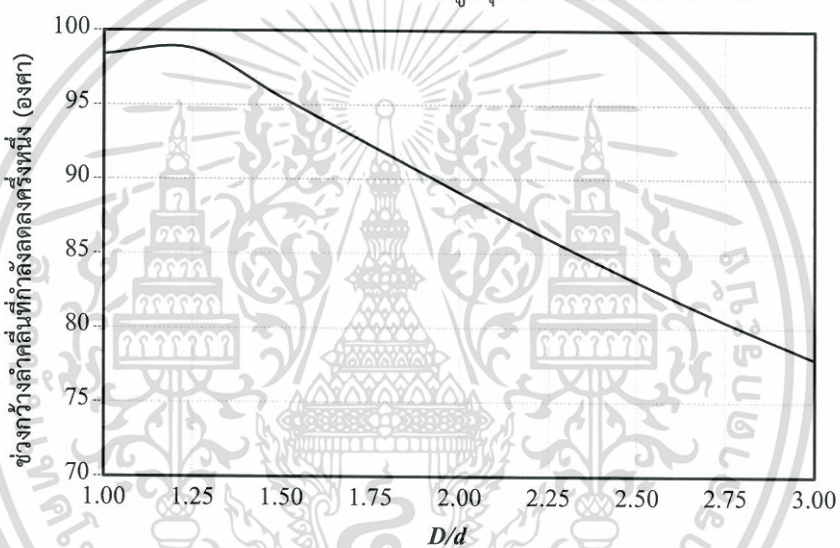


รูปที่ 2.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนอร์แมลไลซ์ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ขนาดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและประสิทธิภาพรวม



(ข) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

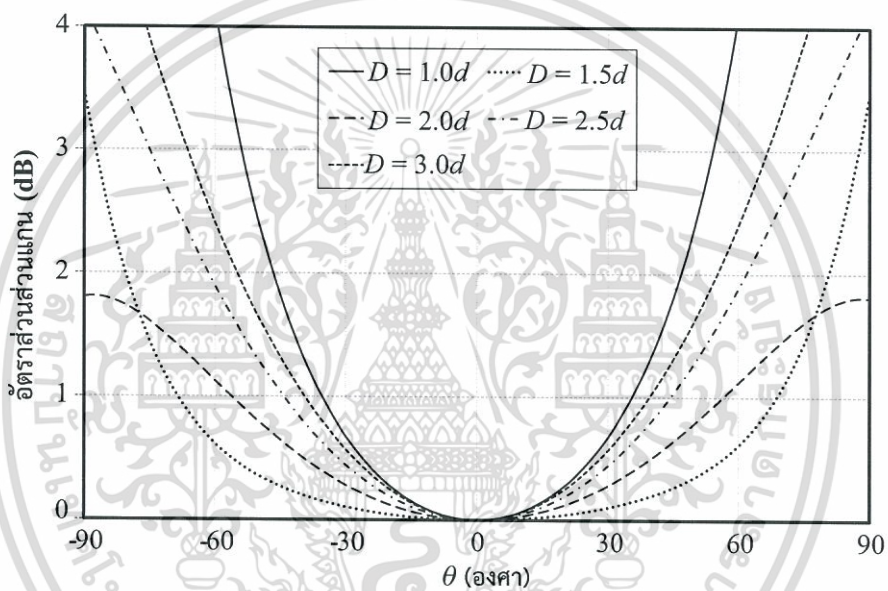
รูปที่ 2.30 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์ขนาดต่าง ๆ

จากอัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีวัสดุฐานรองที่มีวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์ขนาดต่าง ๆ ในรูปที่ 2.31 พบว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนยังคงมีอัตราส่วนแกนนั้นมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 dB ณ มุมลำคลื่นที่มีขนาดสูงสุด ($\theta = 0^\circ$ เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11}) ไม่ว่าสายอากาศนั้นมีขนาดของวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์เท่าใดก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลม พบว่าวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์มีขนาดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมน้อยลง แต่ยังคงครอบคลุมมุมที่ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง โดยที่ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมนั้นเท่ากับ 108° 176° 150° และ 134° สำหรับวัสดุฐานรองและระนาบกราวด์ที่มีขนาด $1.00d$ $1.5d$ $2.5d$ และ $3.00d$ ตามลำดับ ส่วนที่ขนาด $2.5d$ นั้น ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมจะมีโพลาริซวงกลมมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนในชั้นเรียน โดยไม่อนุญาตให้มีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ จะถือว่าผิดกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

180° ครอบคลุมลำคลื่นด้านหน้าทั้งหมด และเนื่องจากกระดุนสายอากาศไมโครสตริปวงกลมด้วย โหมดเลขที่ จะทำให้ทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมของสายอากาศในกรณีนี้จะเป็นโพลาริซหมุน ตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนขวา

จากการศึกษาผลกระทบของขนาดของวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ สรุปได้ว่า ขนาดของวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์นั้นไม่ส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และช่วงกว้างความถี่ แต่จะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยเฉพาะประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ เมื่อวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดแผ่นตัวนำ และเมื่อขนาดของวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์เพิ่มขึ้น ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศก็เริ่มลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่ง สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานจริงควรเลือกขนาดวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ที่ควรมีขนาดเล็กเท่าที่เป็นไปได้และมีคุณสมบัติตามความต้องการของระบบ



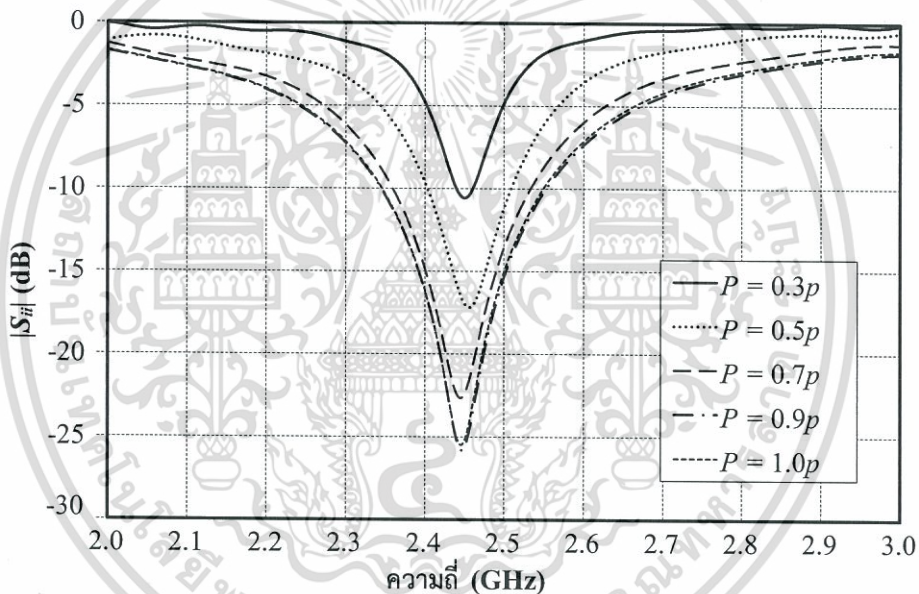
รูปที่ 2.31 อัตราส่วนแอมพลิจูดในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีขนาดของวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวนด์ต่าง ๆ

2.4.4 ตำแหน่งจุดป้อน

การกระดุนด้วยหลายจุดป้อนเป็นเทคนิคช่วยทำให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาริซวงกลมสำหรับกลไกการเกิดโพลาริซวงกลมด้วยเทคนิคนี้ได้ใช้หลักการของการทำมุมของจุดป้อนที่เหมาะสม เพื่อให้ทราบตำแหน่งจุดป้อนแต่ละจุดว่าควรมีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของแผ่นตัวนำเท่าไร ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้ทำการศึกษาผลกระทบของตำแหน่งจุดป้อนแต่ละจุด ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีตำแหน่งจุดป้อนต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.32 ถึง 2.35 และสรุปไว้ในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีตำแหน่งจุดป้อนต่างๆ ที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz

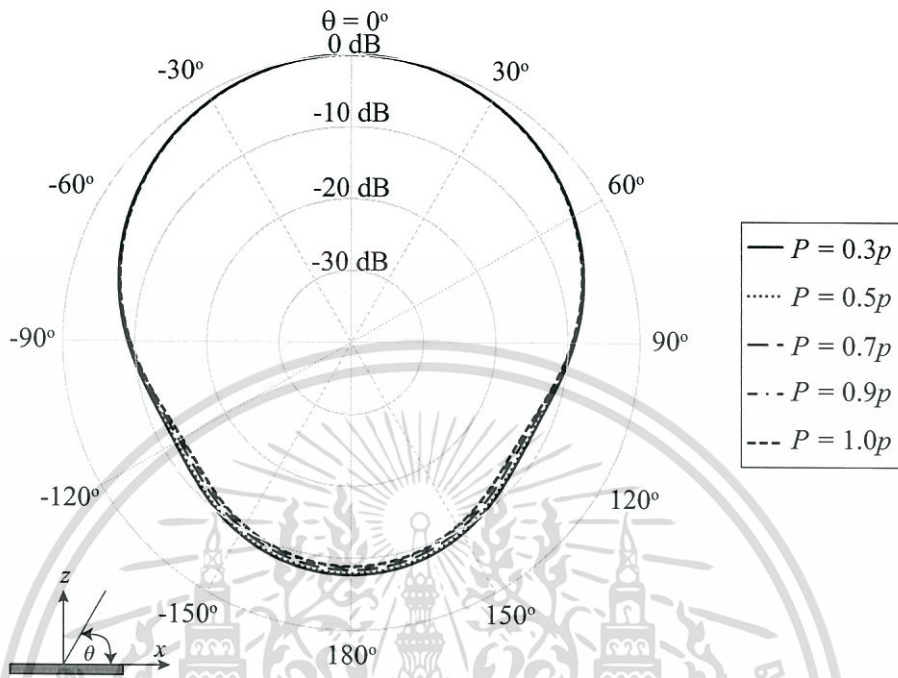
เส้นผ่านศูนย์กลาง ของวัสดุฐานรองและ แผ่นระนาบกราวด์ (mm)	ความกว้าง ลำคลื่นที่ กำลังลดลง ครึ่งหนึ่ง (องศา)	ค่าสภาวะ เจาะจง ทิศทางสูงสุด (dB)	ประสิทธิภาพ รวม (dB)	ชนิด โพลาไรซ์ วงกลม	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง แผ่นตัวนำ (λ)
0.3p	97.1	5.909	-1.061	หมุนขวา	0.273
0.5p	96.8	5.959	-3.272	หมุนขวา	0.276
0.7p	96.1	6.059	-4.718	หมุนขวา	0.282
0.9p	95.5	6.141	-5.407	หมุนขวา	0.287
1.0p	95.2	6.173	-5.453	หมุนขวา	0.289



รูปที่ 2.32 $|S_{ii}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีตำแหน่งจุดป้อนต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาค่า $|S_{ii}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีตำแหน่งจุดป้อนต่าง ๆ ในรูปที่ 2.32 พบว่า ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีจุดป้อนอยู่ใกล้จุดกึ่งกลางของแผ่นตัวนำนั้นแคบมาก แต่เมื่อเลื่อนตำแหน่งจุดป้อนให้ห่างจากจุดกึ่งกลางของแผ่นตัวนำ จะพบว่า ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศนั้นกว้างขึ้นตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น โดยที่ช่วงกว้างความถี่นั้นจะอยู่ที่ประมาณ 0.82 % (2.44 ถึง 2.46 GHz) 4.29 % (2.403 ถึง 2.508 GHz) 7.06 % (2.36 ถึง 2.533 GHz) 8.49 % (2.345 ถึง 2.553 GHz) และ 8.28 % (2.346 ถึง 2.549 GHz) จากความถี่ที่ใช้งาน (2.45 GHz) เมื่อพารามิเตอร์ P เท่ากับ 0.3p 0.5p 0.7p 0.9p และ 1.0p ตามลำดับ และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาขนาดแผ่นตัวนำของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจากผลการจำลองในตารางที่ 2.8 พบว่าจุดบ่อนอยู่ใกล้จุดกึ่งกลางของแผ่นตัวนำนั้นมีขนาดแผ่นตัวนำที่เล็กกว่าแต่จะไม่แตกต่างในทางกายภาพมากนัก



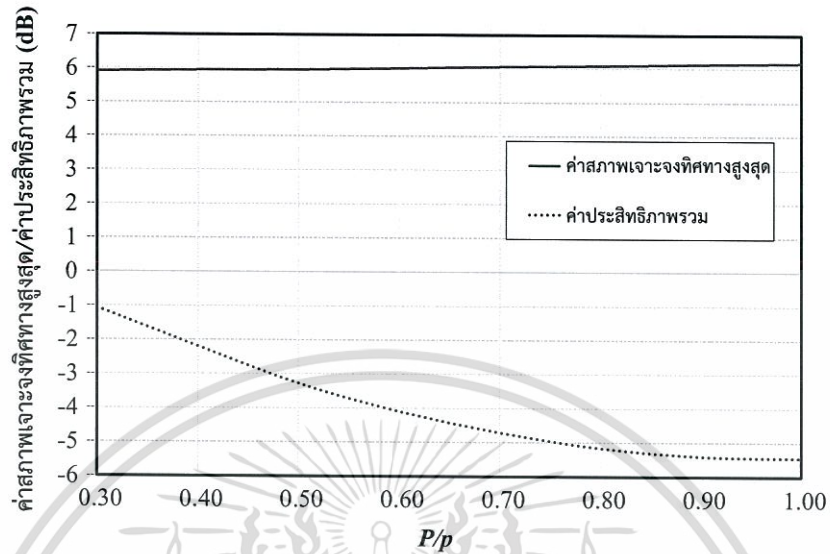
รูปที่ 2.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนอร์แมลไลซ์ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีตำแหน่งจุดบ่อนต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาคูณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากรูปที่ 2.33 และ 2.34 พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศในรูปที่ 2.34 (ก) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งจุดบ่อนอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางของแผ่นตัวนำมากขึ้นแต่จะไม่ต่างกันมากนัก โดยจะมีค่ามากที่สุดตรงบริเวณขอบของแผ่นตัวนำ ในขณะที่ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศนั้นมีค่าน้อยลง เมื่อตำแหน่งจุดบ่อนอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางของแผ่นตัวนำมากขึ้น ในขณะที่ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งและค่าระดับลำคลื่นด้านหลังที่มีค่าลดลง สามารถเห็นได้ชัดในรูปที่ 2.33 และ 2.34 (ข) แต่ยังมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

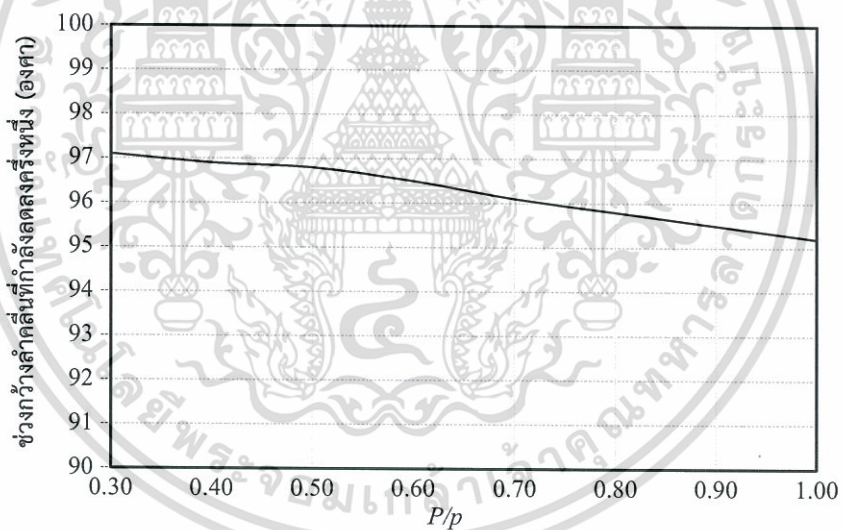
สำหรับอัตราส่วนแกนของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีตำแหน่งจุดบ่อนต่าง ๆ ในรูปที่ 2.34 พบว่า สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดบ่อน ยังคงมีอัตราส่วนแกนต่ำสุดเท่ากับ 0 dB ณ มุมลำคลื่นมีขนาดสูงสุด ($\theta = 0^\circ$ เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11}) ไม่ว่าตำแหน่งจุดบ่อนนั้นมีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่าใดก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลม พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของแผ่นตัวนำกับจุดบ่อนมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมมีค่ามากขึ้น โดยที่ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมเท่ากับ 166° 168° 172° 176° และ 178° เมื่อระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของแผ่นตัวนำกับจุดบ่อนเท่ากับ $0.3p$ $0.5p$ $0.7p$ $0.9p$ และ $1.0p$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ และเนื่องจากการกระตุ้นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมด้วยโหมดเลขคู่จะทำให้ทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมในกรณีนี้เป็นโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนขวา



(ก) ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดและประสิทธิภาพรวม



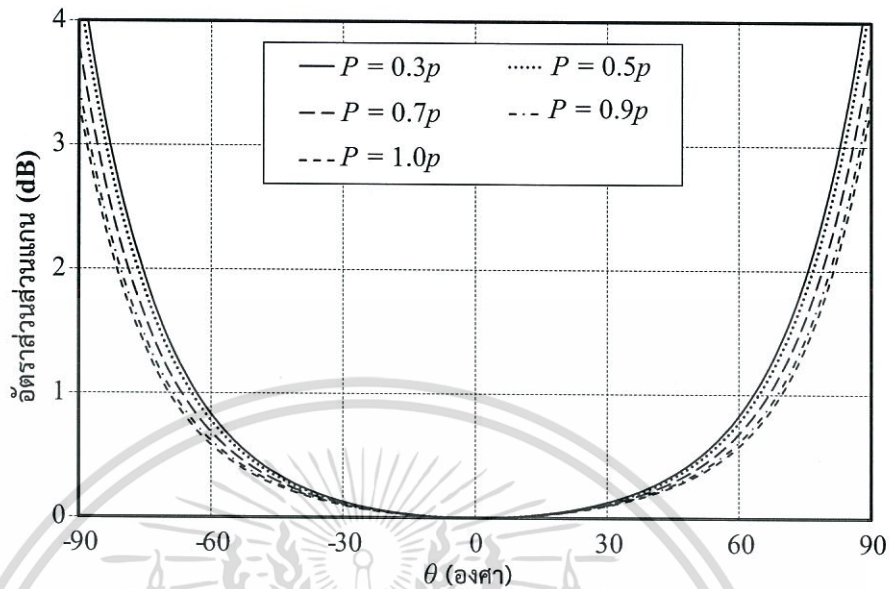
(ข) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

รูปที่ 2.34 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีตำแหน่งจุดป้อนต่าง ๆ

จากการศึกษาผลกระทบของตำแหน่งจุดป้อนต่าง ๆ สรุปได้ว่า ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของแผ่นตัวนำกับจุดป้อนที่เหมาะสม ควรอยู่บริเวณใกล้ขอบของแผ่นตัวนำ ซึ่งให้คุณสมบัติและคุณลักษณะทางการแพร่กระจายคลื่นที่ดีกว่าสายอากาศที่มีจุดป้อนใกล้กึ่งกลางของแผ่นตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าจุดบ่อนใกล้กึ่งกลางของแผ่นตัวนำจะให้ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่ดีกว่าแต่ช่วงกว้างความถี่นั้นแคบมาก



รูปที่ 2.35 อัตรารังสีในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีตำแหน่งจุดบ่อนต่าง ๆ

2.5 สรุป

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎี งานวิจัยที่มีมาก่อนของสายอากาศไมโครสตริป โดยได้ทำศึกษาและวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปวงกลม ซึ่งแผ่นตัวนำวงกลมนั้นจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่หลากหลายและมีความสมมาตรที่ดี และได้นำเทคนิคการกระตุ้นหลายจุดบ่อนมาใช้เพื่อให้สายอากาศไมโครสตริปวงกลมนั้นมีโพลาริเซชันวงกลม หลังจากได้ทำการจำลองสายอากาศไมโครสตริปวงกลมตั้งต้นโดยทำการกระตุ้นด้วยโหมดลำดับต่าง ๆ และใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการเลือกวัสดุฐานรองและโหมดที่นำมากระตุ้น สำหรับวัสดุฐานรองที่ถูกเลือกใช้คือ วัสดุฐานรองชนิด FR-4 ส่วนโหมดที่นำมากระตุ้นให้กับสายอากาศตั้งต้นนั้นเป็นโหมด TM_{11} ซึ่งเป็นโหมดพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว แต่ถ้าต้องการแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรูปกรวยก็สามารถทำได้โดยกระตุ้นสายอากาศด้วยโหมดลำดับสูงซึ่งคุณสมบัติของสายอากาศจะลดลงไป

จากการศึกษาผลกระทบของรัศมีของแผ่นตัวนำวงกลม สรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของรัศมีของแผ่นตัวนำให้สอดคล้องกับความยาวคลื่นของความถี่จะสามารถนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลมไปประยุกต์ใช้งานที่ความถี่ต่าง ๆ ได้โดยที่คุณสมบัติหรือสมรรถนะที่ความถี่ต่าง ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำนั้นมีค่าต่ำ ส่งผลให้ค่าอัตราขยายของสายอากาศต่ำไปด้วย ดังนั้นถ้าจะนำสายอากาศไมโครสตริปไปใช้งานที่ความถี่ต่ำควรจะต้องปรับแต่งสายอากาศให้มีค่าประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาผลกระทบของความหนาของวัสดุฐานรอง สรุปได้ว่า ความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกนั้นส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และช่วงกว้างความถี่อย่างชัดเจน รวมถึงประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ ถึงแม้ว่าวัสดุฐานรองหนาจะให้คุณสมบัติและสมรรถนะที่ดีกว่าแต่สายอากาศนั้นมีขนาดที่ใหญ่กว่า ทำให้การนำไปสร้างใช้งานจริงนั้นยุ่งยากกว่า

จากการศึกษาผลกระทบของขนาดของวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์ สรุปได้ว่าขนาดของวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์นั้นไม่ส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และช่วงกว้างความถี่ แต่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในกรณีที่ขนาดวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์ใกล้เคียงกับขนาดแผ่นตัวนำ โดยเฉพาะประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ และเมื่อขนาดของวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์เพิ่มขึ้น ค่าคุณสมบัติของสายอากาศก็เริ่มลู่ออกค่าใดค่าหนึ่ง สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานจริงควรเลือกขนาดวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์ที่ควรมีขนาดเล็กเท่าที่เป็นไปได้ และมีคุณสมบัติตามความต้องการของระบบ

จากการศึกษาผลกระทบของตำแหน่งจุดป้อน สรุปได้ว่า ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของแผ่นตัวนำกับจุดป้อนที่เหมาะสม ควรอยู่บริเวณใกล้ขอบของแผ่นตัวนำ ซึ่งคุณสมบัติและคุณลักษณะทางการแพร่กระจายคลื่นจะมีค่าที่ดีกว่าสายอากาศที่มีจุดป้อนใกล้กึ่งกลางของแผ่นตัวนำ ถึงแม้ว่าจุดป้อนใกล้กึ่งกลางของแผ่นตัวนำจะมีประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่ดีกว่า แต่มีช่วงกว้างความถี่นั้นแคบมาก

ถึงแม้ว่าเทคนิคการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนช่วยให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาริซวงกลมที่มีสมรรถนะสูงและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดี แต่ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศนั้นต่ำมาก ส่งผลให้อัตราขยายของสายอากาศต่ำไปด้วย ถ้าจะนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลมไปประยุกต์ใช้งาน ควรปรับแต่งสายอากาศให้มีประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่ดีขึ้น เพื่อให้ได้สายอากาศไมโครสตริปโพลาริซวงกลมที่มีสมรรถนะสูงสุด

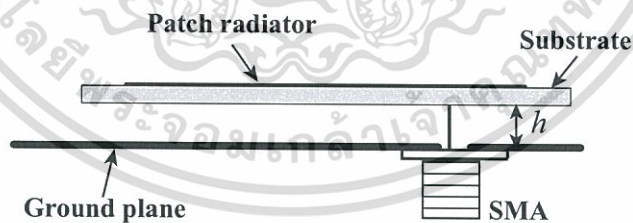
บทที่ 3

การปรับปรุงคุณสมบัติสายอากาศโดยใช้ โครงสร้างแบบ suspended layer

จากการศึกษาและวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปวงกลมในบทที่ผ่านมา เทคนิคการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนช่วยให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาริซวงกลมที่มีสมรรถนะสูงและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดี แต่ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศนั้นมีค่าที่ต่ำมาก ส่งผลให้อัตราขยายของสายอากาศต่ำไปด้วย ถ้านำสายอากาศไมโครสตริปไปใช้งานเพื่อให้ได้สมรรถนะสูงสุด ซึ่งควรจะปรับแต่งสายอากาศให้มีประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่ดีขึ้น ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอเทคนิคการปรับแต่งสายอากาศเพื่อช่วยทำให้คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนนั้นดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะค่าประสิทธิภาพรวมและอัตราขยายของสายอากาศ สำหรับเทคนิคที่นำมาประยุกต์ใช้ นั่นก็คือการใช้โครงสร้างแบบ suspended layer

3.1 งานวิจัยที่มีมาก่อน

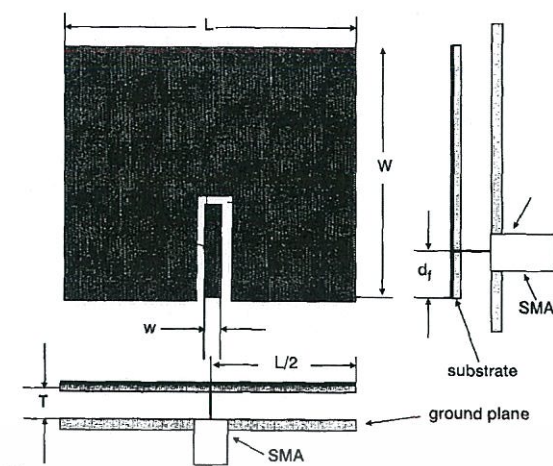
เทคนิคการใช้โครงสร้างแบบ suspended layer ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 เป็นการแยกแผ่นระนาบกราวนจากออกชั้นวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริก โดยมีช่องว่างอากาศหรือวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ ๆ เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกของสายอากาศไมโครสตริปกับระนาบกราวน ซึ่งโครงสร้างแบบ suspended layer โดยทั่วไปความสูงของ suspended layer จะมีขนาดไม่เกิน $0.1\lambda_0$ โดยที่ λ_0 คือความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ [27] ซึ่งข้อดีของโครงสร้างแบบนี้คือ สามารถสร้างได้ง่าย ต้นทุนไม่สูง และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปได้ไม่ยาก



รูปที่ 3.1 โครงสร้างแบบ Suspended layer

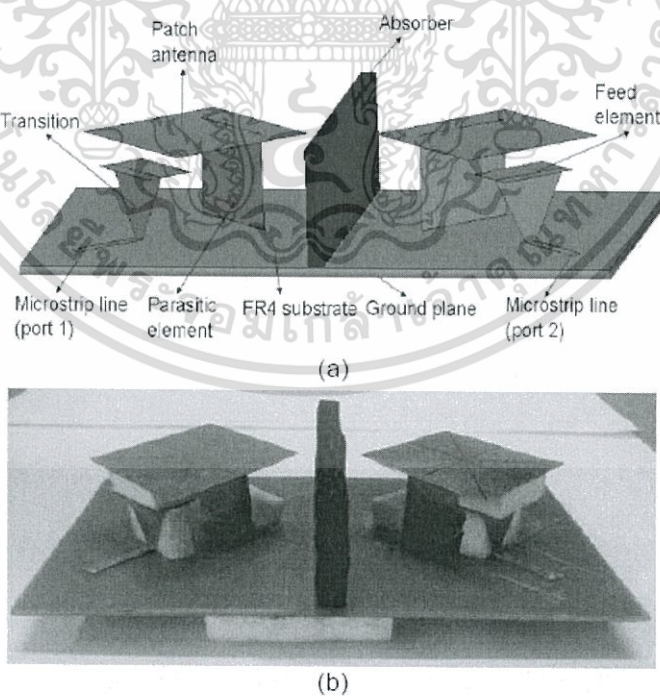
จากงานวิจัยในปี 2000 Z. N. Chen และ M.Y.W. Chia [27] ได้นำเสนอสายอากาศช่วงกว้างความถี่แบบบรอดแบนด์ที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าสายอากาศดังกล่าวมีโครงสร้างแบบ suspended layer และมีโพรบไปกระตุ้นเส้นสตริป จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ช่วงความถี่บรอดแบนด์ของสายอากาศดังกล่าวขยายขึ้นจากเดิมถึง 36% นอกจากนี้ยังมีอัตราขยายที่สูงถึง 4-5 dBi และมีระดับการโพลาริซไวซ์ที่น้อยกว่า -17 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 โครงสร้างแบบ suspended layer นำเสนอโดย Z. N. Chen และ M.Y.W. Chia ในปี 2000

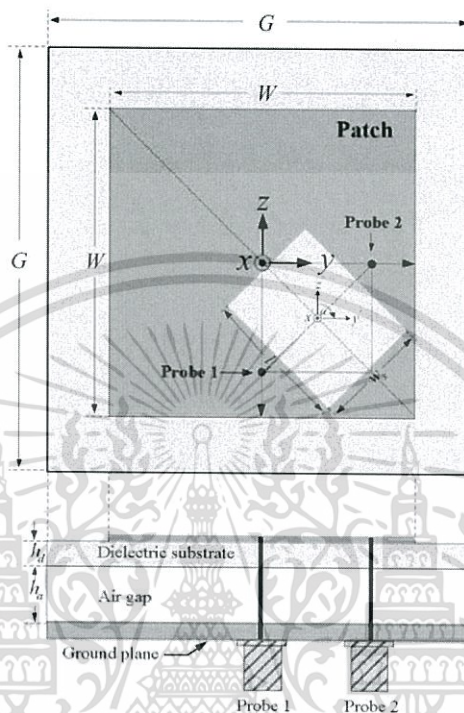
ต่อมาในปี 2010 Secmen และ Hizal [28] ได้นำเสนอสายอากาศที่มีการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบ suspended layer ที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายแบบพกพาความถี่กว้างภายในอาคาร โครงสร้างสายอากาศดังกล่าวจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 สายอากาศดังกล่าวทำงานที่ย่านความถี่ 1900 -2700 MHz หรือมีช่วงกว้างความถี่ประมาณ 37 % และมีอัตราขยายอยู่ระหว่าง 2.5 -6.1 dBi



รูปที่ 3.3 โครงสร้างแบบ suspended layer นำเสนอโดย Secmen และ Hizal ในปี 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในปี 2010 K. Boonying และคณะ [29] ได้นำเสนอสายอากาศแบบแบนสำหรับ ไดเวอร์ซิตีทางด้านโพลาไรซ์ โดยมีการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบ suspended layer ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 โดยที่ suspended layer สายอากาศดังกล่าวจะถูก ออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz และมีช่วงกว้างความถี่ประมาณ 2.3 – 2.5 GHz และสายอากาศอัตรายาย 8.5 – 8.65 dBi



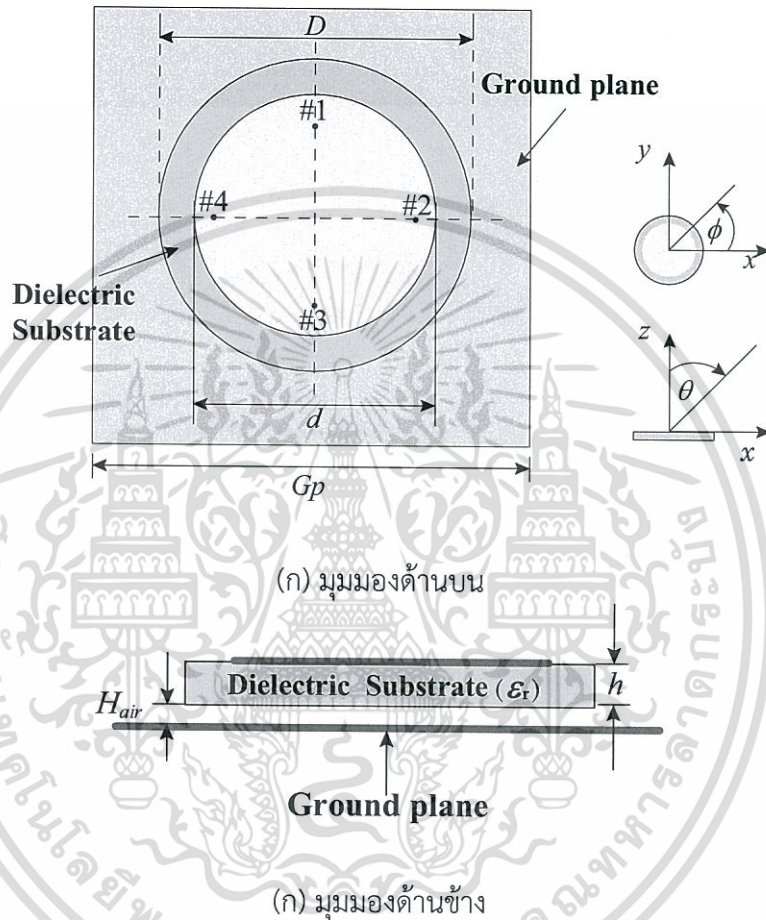
รูปที่ 3.4 โครงสร้างแบบ suspended layer นำเสนอโดย K. Boonying ในปี 2010

นอกจากนี้ในงานวิจัยที่มีมาก่อน [30] - [34] ยังแสดงให้เห็นอีกว่าโครงสร้างแบบ suspended layer นั้นช่วยขยายช่วงกว้างความถี่และเพิ่มอัตรายายของสายอากาศให้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริบโครงสร้างพื้นฐานในบทยที่ผ่านมา หัวข้อถัดไปจะนำเทคนิคโครงสร้างแบบ suspended layer ไปประยุกต์ใช้สายอากาศไมโครสตริบวงกลมที่มีการกระตุ้นแบบสี่จุดป้อนปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศ โดยเฉพาะค่าประสิทธิภาพรวมและอัตรายายของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น

3.2 สายอากาศไมโครสตริบวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนโครงสร้างแบบ suspended layer

จากงานที่มีมาก่อนในหัวข้อที่ผ่าน พบว่า โครงสร้างแบบ suspended layer นั้นช่วยทำให้สายอากาศมีสมรรถนะที่ดีขึ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอสายอากาศไมโครสตริบวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อน และดัดแปลงให้มีโครงสร้างแบบ suspended layer เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริบให้ดีขึ้น เมื่อนำโครงสร้างแบบ suspended layer มาประยุกต์กับสายอากาศไมโครสตริบวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนในบทยที่ 2 จะมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.5 จากรูปพบว่า สายอากาศไมโครสตริบวงกลมถูกแยกแผ่นระนาบกราวนต้ออกจากชั้นวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดช่องว่างอากาศหรือ suspended layer ขึ้น โดยกำหนดให้ suspended layer มีความสูงเท่ากับ H_{air} และระนาบกราวด์ที่ถูกแยกออกมานั้นจะมีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดกว้างเท่ากับ G_p ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ ยังคงเหมือนกับโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนแบบดั้งเดิมในบทที่ 2 โดยที่ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุฐานรองที่มีรูปร่างเป็นวงกลม d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำ h คือ ค่าความหนาของวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ ϵ_r และ α คือมุมระหว่างจุดป้อนที่อยู่ติดกัน



รูปที่ 3.5 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer

เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer พารามิเตอร์ตั้งต้นของสายอากาศได้ถูกกำหนด จากนั้นจะทำการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO โดยจะกำหนดให้ความถี่ที่นำไปใช้งานคือ 2.45 GHz สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ตั้งต้นของสายอากาศ จะพิจารณาขนาดรวมของสายอากาศให้มีขนาดเล็กกะทัดรัด สันฐานต่ำที่สุดเท่าที่ทำได้ ประกอบกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปในบทที่ 2 จะนำมาใช้เป็นแนวทางในเลือกพารามิเตอร์ตั้งต้น ซึ่งพารามิเตอร์ตั้งต้นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer สามารถกำหนดได้ดังตารางที่ 3.1 โดยเลือกใช้วัสดุเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานรองชนิด FR-4 เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาถูก นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และจากการศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ของสายอากาศในบทที่ 2 พบว่าสายอากาศมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อใช้วัสดุฐานรองชนิด FR-4 ส่วนการกระตุ้นสายอากาศนั้นจะกระตุ้นสายอากาศด้วยโหมด TM_{11} ซึ่งจะให้คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางเดียวสำหรับโหมด TM_{11} นั้นมุมระหว่างจุดป้อนที่อยู่ติดกันหรือ α มีค่าเท่ากับ 90° และด้วยเทคนิคการกระตุ้นสี่จุดป้อนนั้นช่วยให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาริซวงกลม

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ตั้งต้นของสายอากาศ

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ
เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำวงกลม (d)	0.456λ	55.84 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุฐานรอง (D)	0.684λ ($1.5d$)	83.76 mm
ความหนาวัสดุฐานรอง (h)	0.012λ	1.50 mm
ระยะห่างจุดป้อนจากกึ่งกลางของแผ่นตัวนำ (P)	0.205λ ($0.9p$)	25.13 mm
ความกว้างแผ่นระนาบกราวด์ (Gp)	1.026λ ($1.5D$)	125.63 mm
ความสูง Suspended layer (H_{air})	0.012λ	1.50 mm

ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz

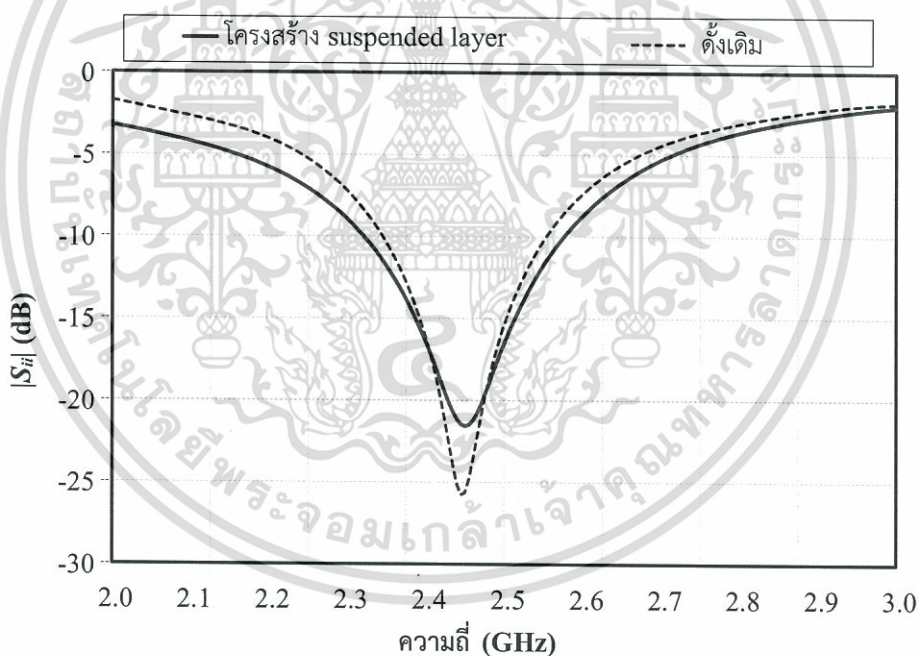
คุณสมบัติ	โครงสร้าง suspended layer	แบบดั้งเดิม
เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำ (มิลลิเมตร)	55.84 (0.456λ)	35.14 (0.287λ)
มิติสายอากาศที่มีขนาดมากที่สุด (มิลลิเมตร)	125.63	52.71
ช่วงกว้างความถี่ (%)	10.41	8.61
ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (dBi)	9.488	6.141
ประสิทธิภาพรวม (dB)	-3.297	-5.407
อัตราขยาย (dBic)	6.191	0.734
ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (องศา)	63.4	95.5
ความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกน (องศา)	120	176
ชนิดโพลาริซวงกลม	เลือกได้ว่าให้หมุนขวาหรือหมุนซ้าย	

เมื่อจำลองสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนและมีโครงสร้างแบบ suspended layer โดยใช้พารามิเตอร์ตั้งต้นดังที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.1 ที่ความถี่ 2.45 GHz จะได้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศจากการจำลองดังรูปที่ 3.6 ถึง 3.10 ซึ่งประกอบด้วยค่า S-parameter ของจุดป้อนแต่ละจุดหรือ $|S_{ii}|$ ของสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อัตราส่วนแกน และรูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม โดยจะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิมในบทที่ 2 เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นข้อได้เปรียบของการประยุกต์ใช้โครงสร้าง suspended layer กับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อน โดยผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมทั้งสองโครงสร้างจะสรุปไว้ในตารางที่ 3.2

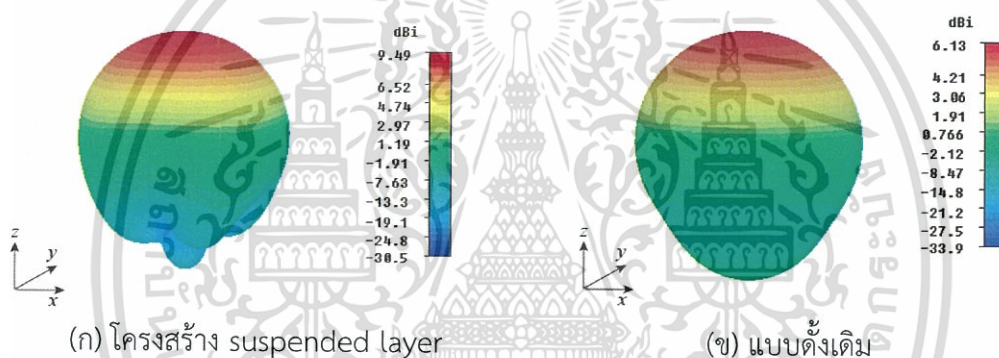
เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำของสายอากาศจากตารางที่ 2.3 พบว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำใหญ่กว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิม เนื่องจากแผ่นระนาบกราวด์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิมถูกแยกออกจากชั้นวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกทำให้เกิดช่องว่างอากาศขึ้นซึ่งมีลักษณะเหมือนเป็นวัสดุฐานรองหลายชั้น [35], [36] เพื่อที่จะทำให้สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer นั้นมีเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่พิจารณาจึงจำเป็นต้องเพิ่มขนาดของแผ่นตัวนำให้ใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิม และมีมิติที่มีขนาดมากที่สุดของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer นั้นก็คือขนาดระนาบกราวด์ที่ถูกแยกออกและมีความกว้างเท่ากับ G_p จึงทำให้สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer มีขนาดรวมใหญ่กว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบดั้งเดิม



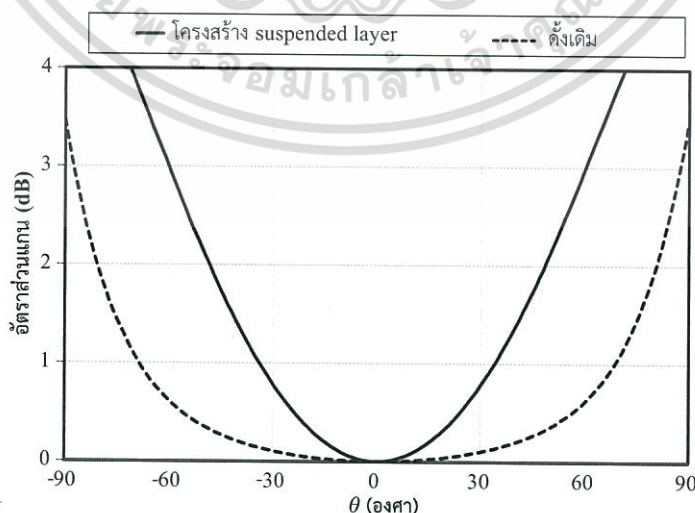
รูปที่ 3.6 $|S_{ii}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz

จากค่า $|S_{ii}|$ ในรูปที่ 3.6 พบว่า ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer นั้นมากกว่าช่วงความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมดั้งเดิม โดยที่ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer มีค่าเท่ากับ 10.41% (2.32 ถึง 2.575 GHz) จากความถี่ที่ใช้งาน (2.45 GHz) ส่วนสายอากาศไมโครสตริปวงกลมดั้งเดิมมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 8.61% (2.344 ถึง 2.555 GHz)

เมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมในรูปที่ 3.7 พบว่า ลำคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เริ่มมีลักษณะที่ไม่สมมาตรในแนวแกนตั้งโดยเฉพาะลำคลื่นด้านหลังเมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมดั้งเดิม เนื่องจากมีลำคลื่นย่อยเกิดขึ้นในด้านหลังของลำคลื่น ส่งผลให้ลำคลื่นหลักแคบลง โดยที่ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมดั้งเดิม จึงทำให้สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer นั้นมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีกว่าดังแสดงในตารางที่ 3.2 นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพรวมของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer นั้นมีค่าที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิม การที่สายอากาศมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงและมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นจึงทำให้อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer ดีขึ้นด้วย โดยที่อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer มีค่าเท่ากับ 6.191 dBi ส่วนสายอากาศไมโครสตริปวงกลมดั้งเดิมมีอัตราขยายเท่ากับ 0.734 dBi



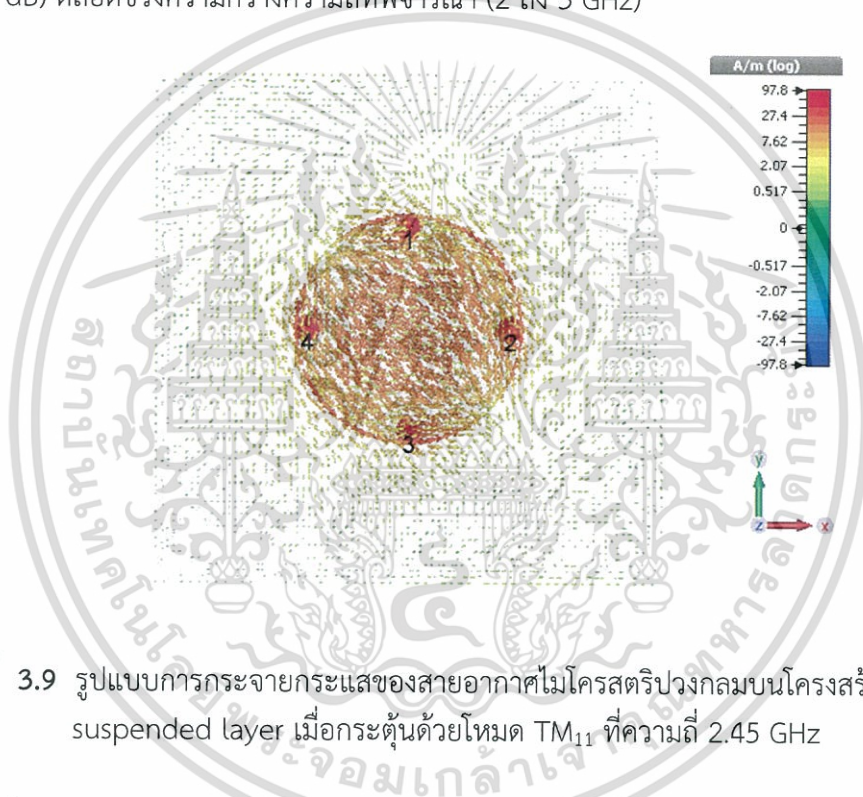
รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 3.8 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนแกนของสายอากาศจากรูปที่ 3.8 พบว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนคงมีโพลาริซวงกลมไม่ว่าจะถูกดัดแปลงให้มีโครงสร้างแบบ suspended layer หรือแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นเพราะว่าสายอากาศทั้งสองโครงสร้างนั้นมีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อน ด้วยเทคนิคดังกล่าวจะช่วยทำให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาริซวงกลมได้ โดยที่อัตราส่วนแกนของสายอากาศทั้งสองโครงสร้างมีมุมลาคัสที่มีขนาดสูงสุด ($\theta = 0^\circ$) มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 dB ซึ่งโพลาริซวงกลมที่ได้จะมีความสมมาตรทั้งสองแนวแกน ความกว้างลาคัสของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมนั้นจะเท่ากับ 120° และ 176° เมื่อโครงสร้างของสายอากาศเป็น suspended layer และแบบดั้งเดิม ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาช่วงกว้างความถี่ที่สายอากาศมีโพลาริซวงกลมจะพบว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมทั้งสองโครงสร้างจะมีโพลาริซวงกลม (อัตราส่วนแกนค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 dB) ตลอดช่วงความถี่ที่พิจารณา (2 ถึง 3 GHz)

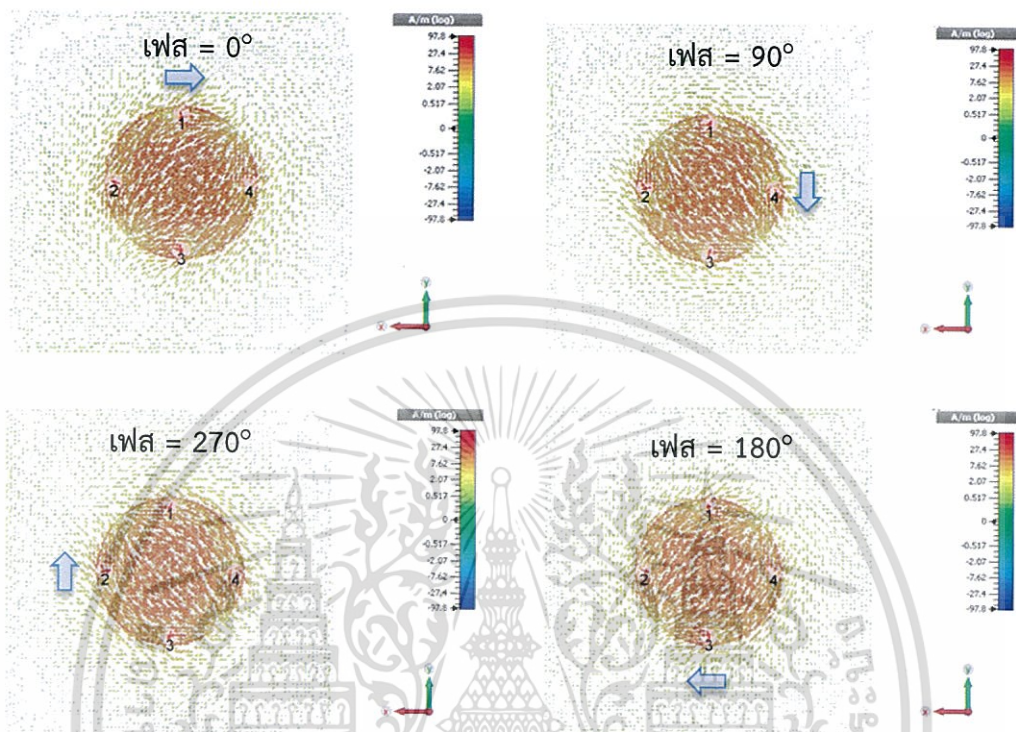


รูปที่ 3.9 รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมบนโครงสร้างแบบ suspended layer เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} ที่ความถี่ 2.45 GHz

เมื่อพิจารณาการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer ได้จากการจำลองในรูปที่ 3.9 พบว่าลักษณะของการกระจายกระแสจะเป็นไปตามลักษณะของโหมดที่กระตุ้นคือ โหมด TM_{11} เหมือนรูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิม ซึ่งลักษณะการกระจายกระแสมีความสม่ำเสมอทั่วแผ่นตัวนำและเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นมากที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ด้วยเหตุนี้แผ่นตัวนำจึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของสายอากาศไมโครสตริป จากอัตราส่วนแกนทำให้รู้สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer ก็ยังคงให้โพลาริซวงกลมแม้ว่าจะมีความกว้างลาคัสที่น้อยกว่าแบบดั้งเดิม ส่วนทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมเมื่อพิจารณาจากรูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศจากมุมมองด้านหลังของสายอากาศในรูปที่ 3.10 พบว่า ทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer ยังคงหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนขวา ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นจุดป้อนทั้งสี่ด้วยการจัดเฟส 0° 90° 180° 270° ถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการสลับชนิดการโพลาริเซชันวงกลมของสายอากาศจากหมุนขวาให้เป็นหมุนซ้าย ก็สามารถทำได้ โดยการกลับเฟสที่นำมากระตุ้นจุดป้อนทั้งสิ้น 0° 90° 180° 270° เป็น 0° 270° 180° 90° เหมือนกับการกระตุ้นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิมตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2



รูปที่ 3.10 รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมบนโครงสร้างแบบ suspended layer เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} จากมุมมองด้านหลัง ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz

หลังจากได้ทำการจำลองสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer ด้วยพารามิเตอร์ตั้งต้นในตารางที่ 3.1 สรุปได้ว่าโครงสร้างแบบ suspended layer นั้นสามารถช่วยปรับปรุงให้คุณสมบัติของสายอากาศมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยเฉพาะค่าสภาพเจาะจงทิศทางและประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ เนื่องจากโครงสร้างแบบ suspended layer นั้นทำให้ขนาดของแผ่นตัวนำใหญ่ขึ้นเพื่อให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่พิจารณา เมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิม รวมถึงขนาดระนาบกราวด์ที่ถูกแยกออกจึงทำให้ขนาดสายอากาศรวมมีขนาดใหญ่กว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริเซชันวงกลมของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended มีค่าน้อยกว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบดั้งเดิมแต่ยังให้มีโพลาริเซชันวงกลมครอบคลุมความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งและตลอดย่านความถี่ที่พิจารณา ลำดับถัดไปจะทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ของสายอากาศเพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการปรับปรุงสายอากาศให้มีขนาดกะทัดรัดและมีสมรรถนะสูงต่อไป

3.3 การศึกษาพารามิเตอร์สายอากาศ

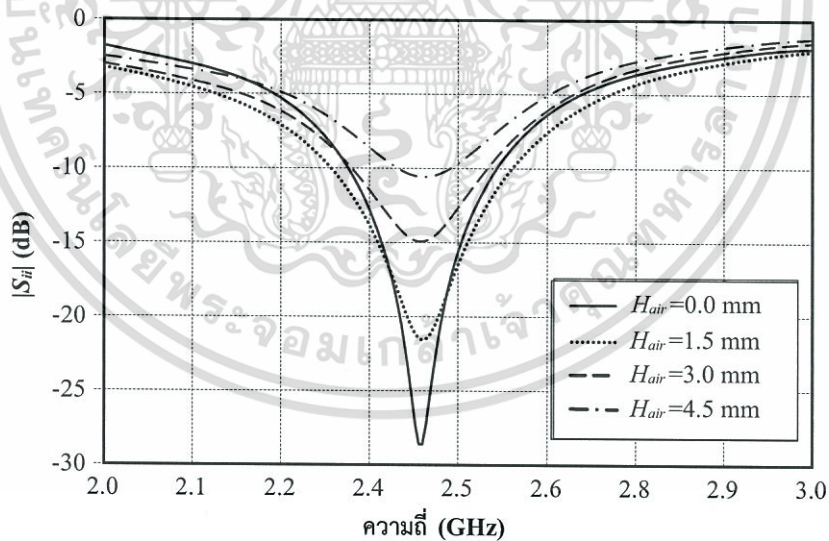
ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์สายอากาศ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาปรับปรุงสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ให้โพลาริซวงกลมที่มีสมรรถนะสูงและมีขนาดกระทัดรัดเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานต่อไป

สำหรับพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษามีดังต่อไปนี้

- ความสูง suspended layer
- ขนาดแผ่นระนาบกราวนด์
- ขนาดแผ่นตัวนำวงกลม

3.3.1 ความสูง Suspended layer

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการศึกษาผลกระทบของความสูง suspended layer โดยทั่วไปความสูง suspended layer นั้นควรมีค่าไม่เกิน $0.1\lambda_0$ ในการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ของสายอากาศดังกล่าวจะกำหนดให้สายอากาศนำมาใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz ดังนั้นความสูงของ suspended layer จึงไม่ควรเกิน 12.25 มิลลิเมตร สำหรับในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของความสูง suspended layer โดยจะเริ่มจากกรณีที่ระนาบกราวนด์ติดกับวัสดุฐานรอง แล้วเพิ่มความสูงเป็น 1.50 มิลลิเมตร 3.00 มิลลิเมตร และ 4.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer เมื่อกำหนดให้ความสูง suspended layer มีค่าต่าง ๆ จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 ถึง 3.14 และสรุปไว้ในตารางที่ 3.3



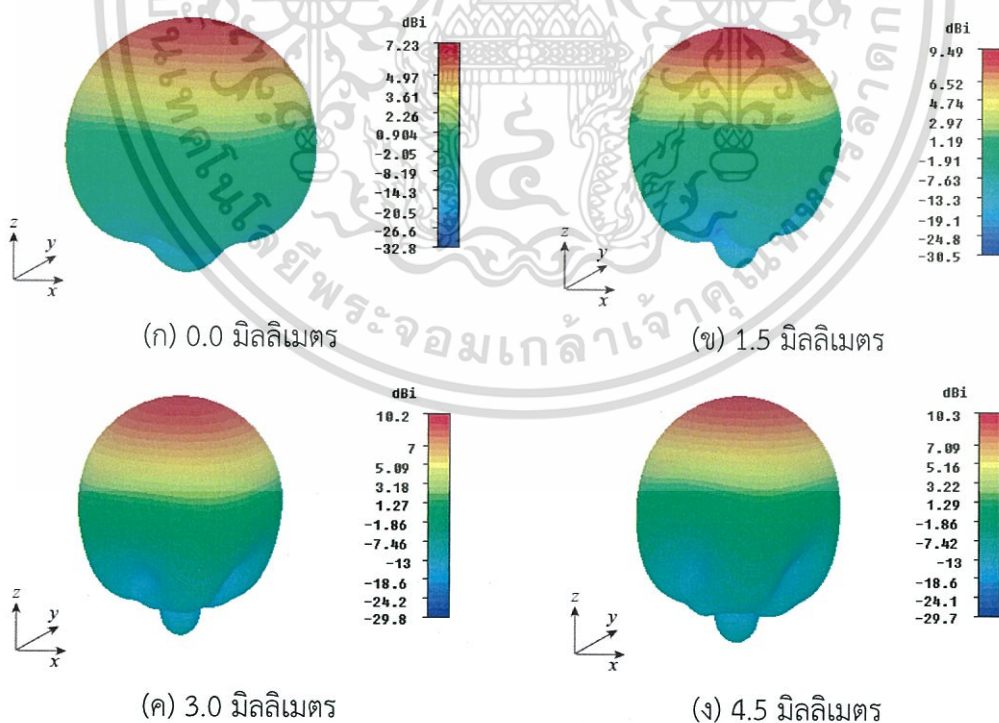
รูปที่ 3.11 $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อศึกษาผลกระทบของความสูง suspended layer ที่ความถี่ 2.45 GHz

เมื่อสังเกต $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer เมื่อกำหนดให้ความสูงของ suspended layer มีค่าต่าง ๆ ในรูปที่ 3.11 พบว่าในกรณีที่ระนาบกราวนด์ติดกับวัสดุฐานรอง สายอากาศจะมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 8.57 % (2.345 ถึง 2.555 GHz) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความถี่ที่ใช้งาน (2.45 GHz) และเมื่อ suspended layer เริ่มมีช่องว่างอากาศและสูงขึ้น พบว่า ความสูงของ suspended layer ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศลดลง โดยที่ ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศนั้นจะอยู่ที่ประมาณ 10.41 % (2.320 ถึง 2.575 GHz) 7.75 % (2.35 ถึง 2.54 GHz) และ 3.06 % (2.415 ถึง 2.490 GHz) จากความถี่ที่ใช้งาน (2.45 GHz) สำหรับ suspended layer สูง 1.50 มิลลิเมตร 3.00 มิลลิเมตร และ 4.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ

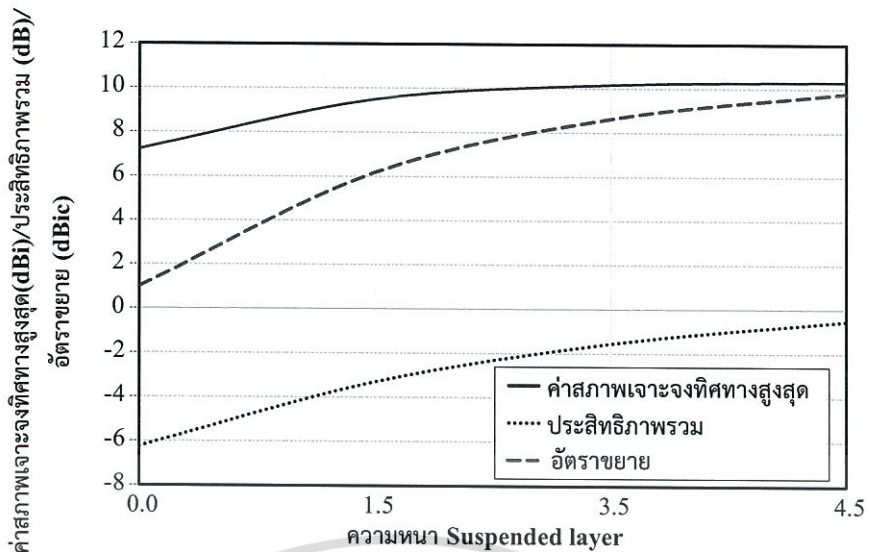
ตารางที่ 3.3 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer เมื่อศึกษาผลกระทบของความสูง suspended layer ที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz

ความสูง Suspended layer (มิลลิเมตร)	ความกว้าง ลำคลื่นที่ กำลังลดลง ครึ่งหนึ่ง (องศา)	ค่าสภาพ เจาะจง ทิศทางสูงสุด (dB)	ประสิทธิภาพ รวม (dB)	อัตราขยาย (dBic)	ชนิด โพลาไรซ์ วงกลม	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง แผ่นตัวนำ (λ)
0.0	82.0	7.230	-6.234	0.996	หมุนขวา	0.289
1.5	63.4	9.488	-3.297	6.191	หมุนขวา	0.456
3.0	57.5	10.17	-1.545	8.630	หมุนขวา	0.492
4.5	55.4	10.31	-0.525	9.788	หมุนขวา	0.495



รูปที่ 3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ ไมโครสตริปวงกลมเมื่อศึกษาผลกระทบของความสูง suspended layer ที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

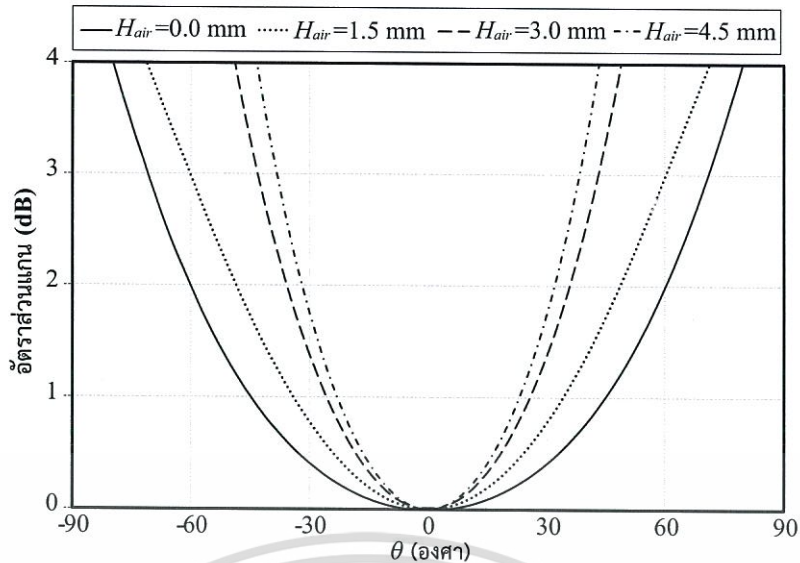


รูปที่ 3.13 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อศึกษาผลกระทบของความสูง suspended layer ที่ความถี่ 2.45 GHz

จากเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer จากตารางที่ 3.3 พบว่าเมื่อระนาบกราวด์ติดกับวัสดุฐานรอง สายอากาศจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำใกล้เคียงกับในกรณีของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิมแต่จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงกว่า และเมื่อ suspended layer เริ่มมีช่องว่างอากาศและสูงเพิ่มขึ้น จะพบว่า แผ่นตัวนำวงกลมนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้นไปตามความสูงของ suspended layer และมีแนวโน้มคู่เข้าค่าใดค่าหนึ่ง และเมื่อพิจารณาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในรูปที่ 3.12 พบว่า ลำคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เริ่มมีลักษณะที่ไม่สมมาตรในแนวแกนตั้งโดยเฉพาะลำคลื่นด้านหลังเมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิม โดยที่ลำคลื่นจะแคบมากขึ้นเมื่อ suspended layer สูงขึ้นจึงทำให้ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูง suspended layer เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อความสูง suspended layer เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราขยายของสายอากาศที่มีความสูง suspended layer มากกว่านั้นมีค่าที่ต่ำกว่าดังแสดงในรูปที่ 3.13

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนแกนของสายอากาศจากรูปที่ 3.14 พบว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer นั้นมีความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมลดลงเมื่อ suspended layer สูงขึ้น ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมนั้นจะเท่ากับ 142° 120° 86° และ 76° เมื่อความสูง suspended layer เท่ากับ 0.0 มิลลิเมตร 1.50 มิลลิเมตร 3.00 มิลลิเมตร และ 4.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเนื่องจากกระตุ้นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมด้วยโหมด TM_{11} จะทำให้ทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมของสายอากาศในกรณีนี้จะเป็นโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer ที่ความถี่ 2.45 GHz

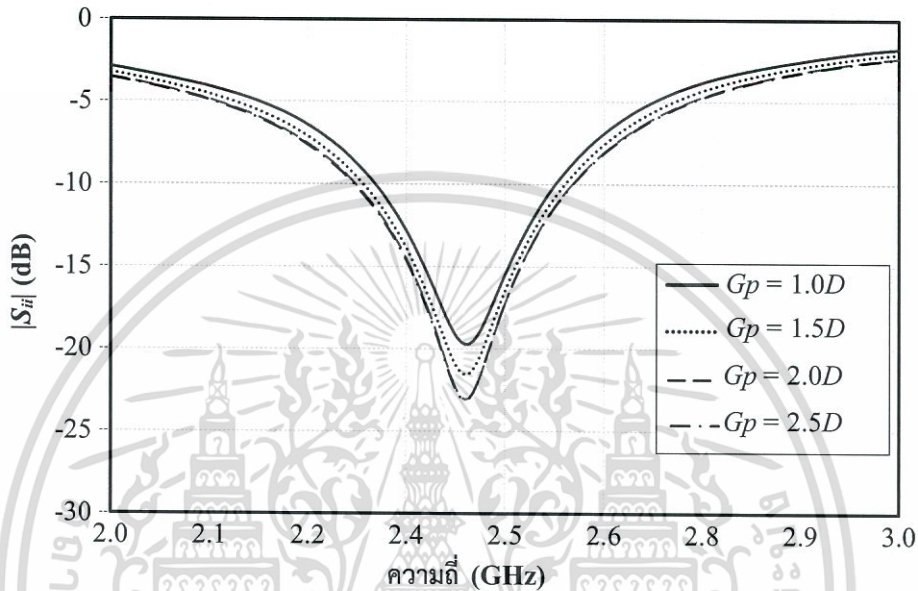
จากการศึกษาผลกระทบของความสูงของ suspended layer สรุปได้ว่า ความสูงของของ suspended layer จะส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และช่วงกว้างความถี่ รวมถึงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีสมรรถนะสูงขึ้นเมื่อ suspended layer สูงเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มคู่เข้าค่าใดค่าหนึ่ง ถึงแม้ว่า suspended layer ที่มีความสูงมากกว่าจะให้คุณสมบัติและสมรรถนะที่ดีกว่า แต่สายอากาศจะมีขนาดใหญ่และหนากว่า ทำให้การนำไปสร้างใช้งานจริงค่อนข้างที่จะยุ่งยาก

3.3.2 ขนาดแผ่นระนาบกราวนด์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการศึกษาขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์ที่ถูกแยกออกจากวัสดุฐานรองซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดขนาดรวมของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมหลังจากตัดแปลงให้มีโครงสร้างแบบ Suspended layer เนื่องจากขนาดของสายอากาศเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อการนำมาประยุกต์ใช้งานจริง ดังนั้นขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์จึงควรจะมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และจะต้องไม่ทำให้สายอากาศสูญเสียคุณสมบัติตามความต้องการของระบบไป สำหรับการศึกษาผลกระทบของแผ่นระนาบกราวนด์ จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ G_p เริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุฐานรอง ($G_p = 1D$) จากนั้นจะเพิ่มค่าพารามิเตอร์ G_p ขึ้นไปเพื่อหาขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์ที่เหมาะสมต่อไป ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีขนาดแผ่นระนาบกราวนด์เมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาต่าง ๆ จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 ถึง 3.18 และสรุปไว้ในตารางที่ 3.4

จากค่า $|S_{11}|$ ในรูปที่ 3.15 สังเกตได้ว่า การเปลี่ยนแปลงค่าขนาดแผ่นระนาบกราวนด์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง Suspended layer จะส่งผลกระทบต่อเล็กน้อยกับช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศ โดยที่ช่วงกว้างความถี่จะมีค่าที่ประมาณ 9.35 % (2.335 ถึง 2.564) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GHz) 10.41 % (2.320 ถึง 2.575 GHz) 11.22 % (2.31 ถึง 2.585 GHz) และ 11.22 % (2.31 ถึง 2.585 GHz) จากความถี่ที่ใช้งาน (2.45 GHz) เมื่อพารามิเตอร์ G_p เท่ากับ 1.0D 1.5D 2.0d และ 2.5d ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าช่วงกว้างความถี่จะลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งเมื่อแผ่นระนาบกราวด์มีขนาดใหญ่ขึ้น และจากผลการจำลองในตารางที่ 3.4 เมื่อพิจารณาขนาดแผ่นตัวนำของสายอากาศ จะพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำมีเท่ากับ 0.456 λ ทั้งหมด ซึ่งกล่าวได้ว่าแผ่นระนาบกราวด์ที่ถูกแยกจากวัสดุฐานรอง จะไม่มีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ

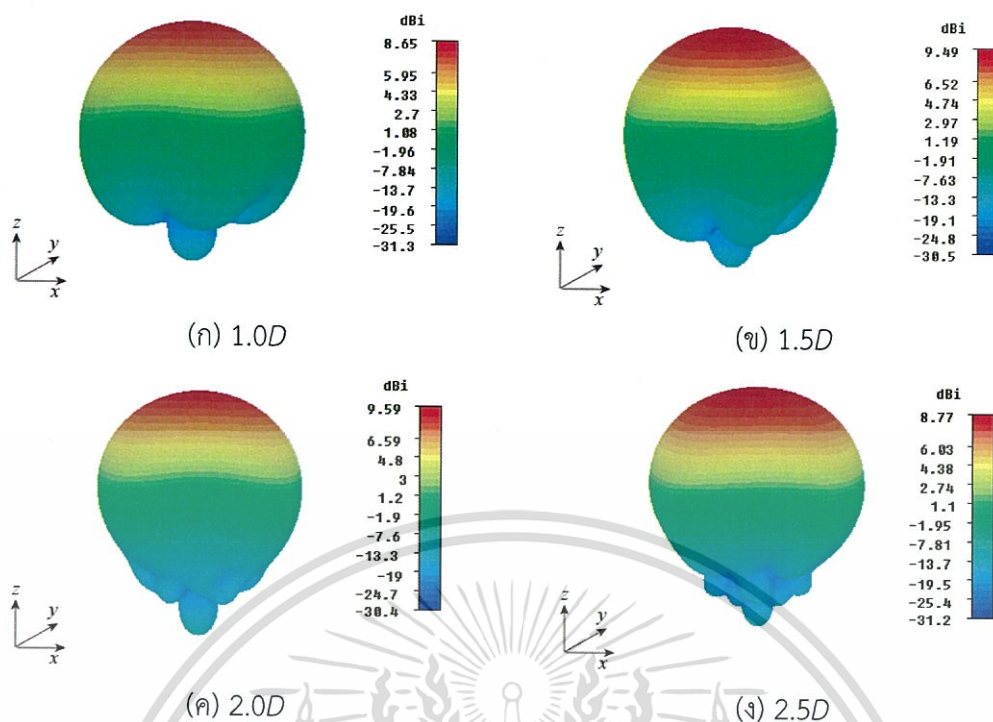


รูปที่ 3.15 $|S_{ii}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อศึกษาผลกระทบของขนาดแผ่นระนาบกราวด์ ที่ความถี่ 2.45 GHz

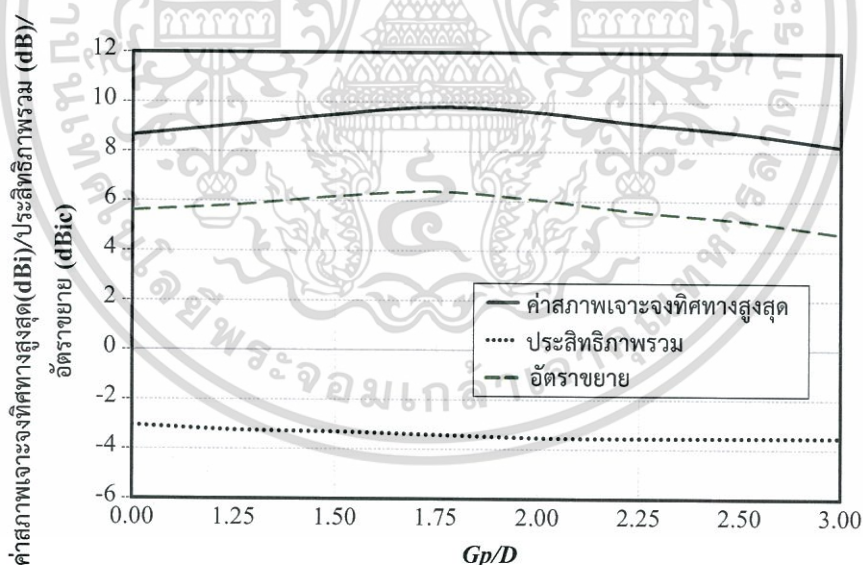
ตารางที่ 3.4 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer ศึกษาขนาดของแผ่นระนาบกราวด์ที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz

G_p/D	ความกว้าง ลำคลื่นที่ กำลังลดลง ครึ่งหนึ่ง (องศา)	ค่าสภาพ เจาะจง ทิศทางสูงสุด (dB)	ประสิทธิภาพ รวม (dB)	อัตราขยาย (dBic)	ชนิด โพลาไรซ์ วงกลม	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง แผ่นตัวนำ (λ)
0.00	69.9	8.654	-3.035	5.619	หมุนขวา	0.456
1.25	65.6	9.067	-3.228	5.839	หมุนขวา	0.456
1.50	63.4	9.488	-3.297	6.191	หมุนขวา	0.456
1.75	61.6	9.800	-3.411	6.389	หมุนขวา	0.456
2.00	65.8	9.593	-3.526	6.066	หมุนขวา	0.456
2.25	73.8	9.133	-3.545	5.588	หมุนขวา	0.456
2.50	77.7	8.765	-3.525	5.240	หมุนขวา	0.456
3.00	83.6	8.216	-3.512	4.704	หมุนขวา	0.456

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



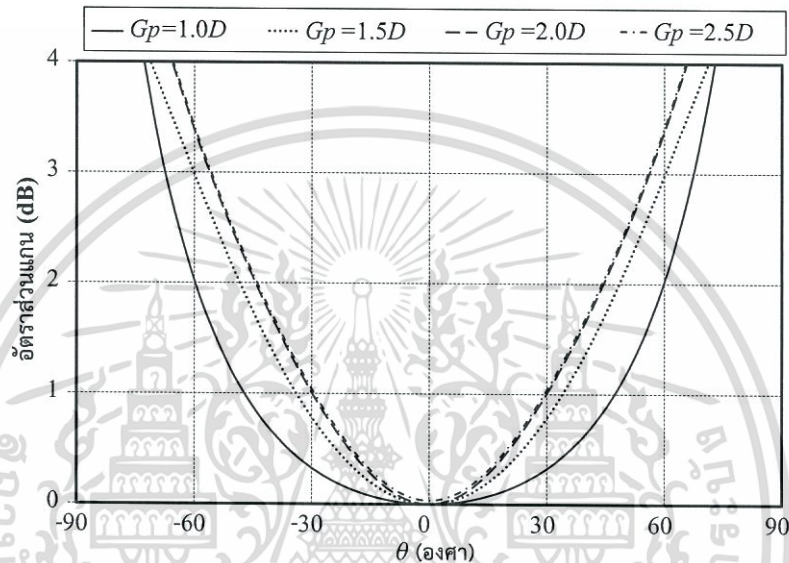
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ ไมโครสตรึงวงกลม เมื่อศึกษาผลกระทบของขนาดแผ่นระนาบกราวด์ที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 3.17 คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตรึงวงกลม เมื่อศึกษาผลกระทบของขนาดแผ่นระนาบกราวด์ ที่ความถี่ 2.45 GHz

และเมื่อพิจารณาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในรูปที่ 3.16 พบว่า เมื่อศึกษาผลกระทบของความสูงแผ่นระนาบกราวด์ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ไมโครสตรึงวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer จะเริ่มไม่สมมาตรในแนวแกนตั้งโดยเฉพาะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำคลื่นด้านหลังเมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิม และมีลำคลื่นย่อยเกิดมากขึ้นเมื่อขนาดแผ่นระนาบกราวนด์ใหญ่ขึ้นซึ่งเห็นได้ชัดในรูปที่ 3.16 (ง) ในขณะที่ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงเมื่อแผ่นระนาบกราวนด์มีขนาดไม่เกิน $\lambda_c / 4$ ถ้าระยะดังกล่าว ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะเริ่มลดลงเมื่อความสูง ขนาดแผ่นระนาบกราวนด์ใหญ่เกิน $\lambda_c / 4$ ส่วนประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่มีค่าที่ใกล้เคียงกัน และอัตราขยายของสายอากาศมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าสภาพเจาะจงทิศทางแต่ระดับลดต่ำลงมาดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.18 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม เมื่อศึกษาผลกระทบของขนาดแผ่นระนาบกราวนด์ ที่ความถี่ 2.45 GHz

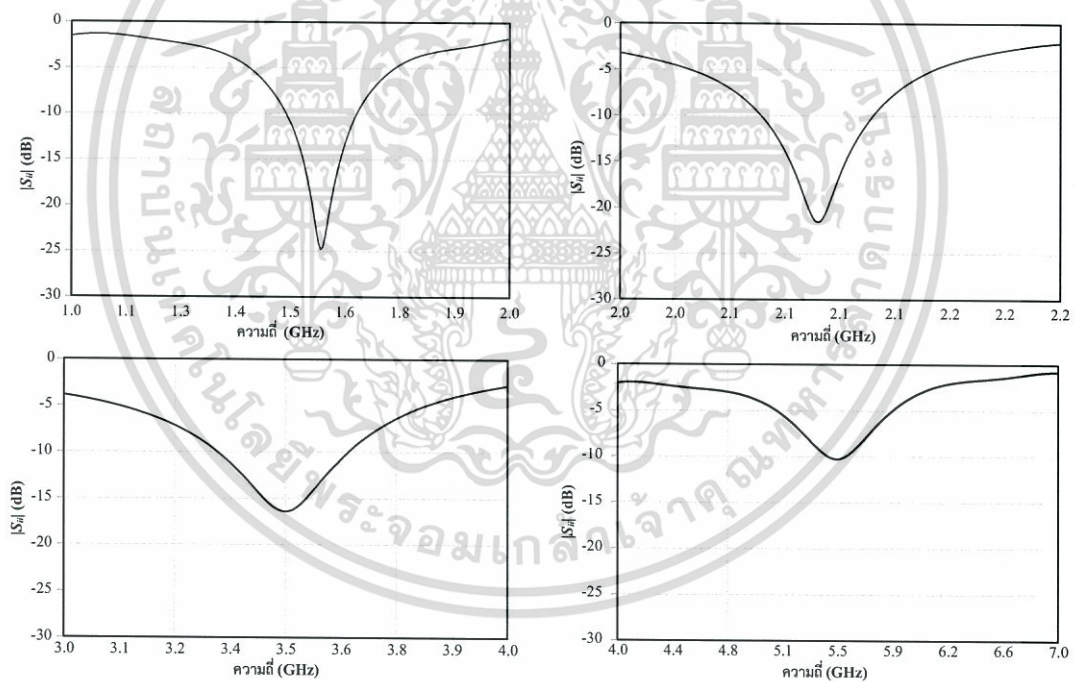
เมื่อพิจารณาอัตราส่วนแกนของสายอากาศจากรูปที่ 3.18 พบว่า เมื่อศึกษาผลกระทบของขนาดแผ่นระนาบกราวนด์ สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer นั้น มีความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมลดลงเมื่อขนาดแผ่นระนาบกราวนด์ใหญ่ขึ้น โดยที่ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมนั้นจะเท่ากับ 136° 120° 112° และ 112° เมื่อพารามิเตอร์ G_p เท่ากับ 1.00D 1.5D 2.0d และ 2.5d ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าความกว้างความถี่นั้นลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งเมื่อแผ่นระนาบกราวนด์มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมของสายอากาศในกรณีนี้จะเป็นโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนขวาเนื่องจากกระตุ้นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมด้วยโหมด TM_{11}

จากการศึกษาผลกระทบของขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์ที่ถูกแยกออกจากวัสดุฐานรองสรุปได้ว่า การเพิ่มขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์จะทำให้สายอากาศมีช่วงกว้างความถี่ที่กว้างขึ้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์จึงไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดของแผ่นตัวนำวงกลม ในขณะที่เดียวกันช่วงกว้างความถี่และความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลาริซวงกลมจะรู้ค่าใดค่าหนึ่งเมื่อแผ่นระนาบกราวด์มีขนาดใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตาม ขนาดแผ่นระนาบกราวด์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดลำคลื่นย่อยที่บริเวณด้านหลังของสายอากาศ ดังนั้นสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานจึงควรเลือกขนาดของแผ่นระนาบกราวด์ที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยที่สายอากาศยังคงมีคุณสมบัติตามความต้องการของระบบ

3.3.3 ขนาดของแผ่นตัวนำวงกลม

จากศึกษาพารามิเตอร์ในบทที่ 2 พบว่าขนาดของรัศมีของแผ่นตัวนำวงกลมนั้นมีค่าสอดคล้องกับความยาวคลื่นในกรณีที่พิจารณา การปรับเปลี่ยนขนาดของรัศมีแผ่นตัวนำจึงส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อความถี่ใช้งานของสายอากาศ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของรัศมีของแผ่นตัวนำวงกลมของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer โดยจะพิจารณาขนาดของแผ่นตัวนำวงกลมให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ประกอบด้วยความถี่ 1.575 GHz (GPS) 2.45 GHz (Wireless LAN) 3.5 GHz (WiMax) และ 5.5 GHz (Wireless LAN) ซึ่งแต่ละความถี่จะให้ขนาดรัศมีของแผ่นตัวนำวงกลมที่แตกต่างกัน ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 ถึง 3.21 และสรุปไว้ในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.19 $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ

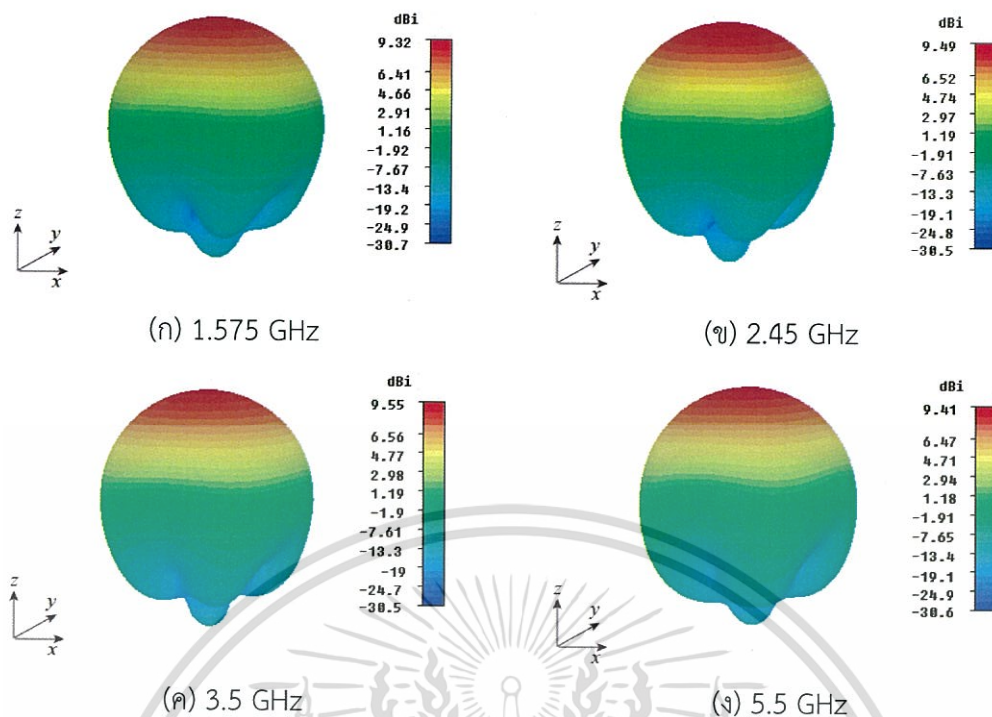
ในรูปที่ 3.19 จะแสดงค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ พบว่า ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศนั้นจะอยู่ที่ประมาณ 10.16 % (1.49 ถึง 1.65 GHz) 10.41 % (2.320 ถึง 2.575 GHz) 8.43 % (3.345 ถึง 3.64 GHz) และ 1.91 % (5.44 ถึง 5.545 GHz) จากความถี่ที่พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

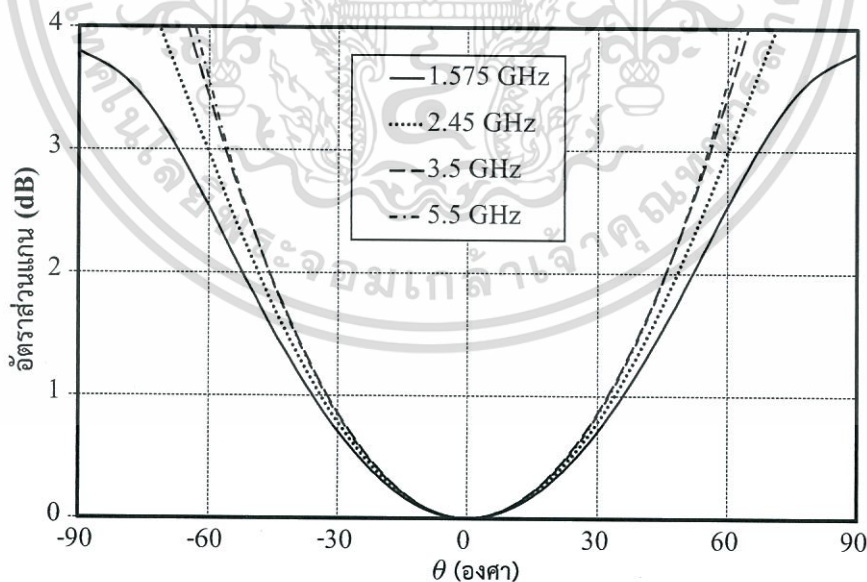
เมื่อสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 1.575 GHz 2.45 GHz 3.5 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า เมื่อสายอากาศเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำ ช่วงกว้างความถี่มีค่าดีขึ้น เมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิม ส่วนที่ความถี่สูง สายอากาศมีช่วงกว้างความถี่ลดลงและแคบมากเนื่องจากพารามิเตอร์ตั้งต้นในส่วนของความสูงของ suspended layer ไม่ได้กำหนดให้เป็นไปตามสัดส่วนของความยาวคลื่นจึงทำให้ความสูงของ suspended layer มีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นที่พิจารณา และจากการศึกษาผลกระทบในหัวข้อที่ผ่านมาที่ว่า ช่วงกว้างความถี่จะแคบลงเมื่อความสูง suspended layer มีค่ามากขึ้น ดังนั้นถ้านำไปสายอากาศที่มีโครงสร้าง suspended layer ใช้งานที่ความถี่สูง ควรจะปรับความสูงของ suspended layer ให้เหมาะสมกับความถี่ที่พิจารณา ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำในทางไฟฟ้ามีค่าเท่าใกล้เคียงกันไม่ว่าจะเลือกให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ใด และเมื่อพิจารณาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศพบว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศเมื่อเรโซแนนซ์ที่ความถี่สูง (สายอากาศมีขนาดเล็ก) มีค่าที่ดีกว่าสายอากาศเมื่อเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำ (สายอากาศมีขนาดใหญ่) การที่ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่ดีขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราขยายของสายอากาศดีขึ้นด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูปที่ 3.20 จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีลักษณะใกล้เคียงกัน ในขณะที่ระดับลำคลื่นด้านหลังมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย รวมไปถึงความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง ไม่ว่าจะเลือกให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ใด

ตารางที่ 3.5 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ

ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (องศา)	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (dB)	ประสิทธิภาพรวม (dB)	อัตราขยาย (dBic)	ชนิดโพลาไรซ์วงกลม	เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำ (λ)	ความยาวคลื่น (mm)
1.575	64.8	9.320	-4.679	4.640	หมุนขวา	0.455	190.5
2.45	63.4	9.488	-3.297	6.191	หมุนขวา	0.456	122.45
3.5	62.5	9.549	-1.926	7.623	หมุนขวา	0.449	85.71
5.5	62.3	9.413	-0.5769	8.836	หมุนขวา	0.420	54.54



รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 3.21 อัตราส่วนแอมในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เมื่อเลือกรัศมีของแผ่นตัวนำให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนแกนของสายอากาศจากรูปที่ 3.21 พบว่า สายอากาศไมโครสตริป วงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer นั้นมีความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็น โพลาริซวงกลมลดลงเมื่อสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เรโซแนนซ์ ที่ความถี่สูงขึ้น โดยที่ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมนั้นจะเท่ากับ 134° 120° 112° และ 112° เมื่อสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 1.575 GHz 2.45 GHz 3.5 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ ส่วนทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมของสายอากาศในกรณีนี้จะเป็นโพลาริซหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนขวา เนื่องจากกระตุ่นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมด้วยโหมด TM_{11}

จากการศึกษาผลกระทบของรัศมีของแผ่นตัวนำวงกลม ซึ่งเป็นส่วนที่แพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป สรุปได้ว่าการนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer ไปประยุกต์ใช้งานที่ความถี่ต่าง ๆ สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดของรัศมีของแผ่นตัวนำให้ สอดคล้องกับความยาวคลื่นของความถี่ที่ต้องการ โดยที่คุณสมบัติหรือสมรรถนะที่ความถี่นั้นจะไม่ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดย การเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น suspended layer ให้เหมาะสมกับความถี่ที่พิจารณา

3.4. สรุป

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงการปรับปรุงคุณสมบัติสายอากาศโดยใช้โครงสร้างแบบ suspended layer โดยทำการจำลองสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบ suspended layer เพื่อศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์และนำไปเป็นข้อมูลในการออกแบบสายอากาศ ให้สมรรถนะสูงสุด

หลังจากได้ทำการจำลองสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer สรุปได้ว่า โครงสร้างแบบ suspended layer นั้นสามารถช่วยปรับปรุงให้คุณสมบัติของสายอากาศนั้นมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยเฉพาะค่าสภาพเจาะจงทิศทางและประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ เนื่องจากโครงสร้างแบบ suspended layer นั้นทำให้ขนาดของแผ่นตัวนำใหญ่ขึ้น เพื่อให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่พิจารณา เมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิม รวมถึงขนาดระนาบกราวนด์ที่ถูกแยกออกจึงทำให้ขนาดสายอากาศรวมมีขนาดใหญ่กว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended มีค่าน้อยกว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบดั้งเดิมแต่ยังให้มีโพลาริซวงกลมครอบคลุมความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งและตลอดย่านความถี่ที่พิจารณา

จากการศึกษาผลกระทบของความสูงของ suspended layer สรุปได้ว่า ความสูงของ suspended layer จะส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และช่วงกว้างความถี่ รวมถึงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีสมรรถนะสูงขึ้นเมื่อ suspended layer มีความสูงเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่ง ถึงแม้ว่า suspended layer ที่มีความสูงมากกว่าจะให้คุณสมบัติและ

สมรรถนะที่ดีกว่า แต่สายอากาศจะมีขนาดใหญ่และหนากว่า ทำให้การนำไปสร้างใช้งานจริงค่อนข้างที่จะยุ่งยาก

จากการศึกษาผลกระทบของขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์ที่ถูกแยกออกจากวัสดุฐานรองสรุปได้ว่า ขนาดแผ่นระนาบกราวนด์จะไม่ส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ทำให้แผ่นตัวนำมีขนาดคงที่ แม้ว่าจะเพิ่มขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์ช่วงกว้างความถี่ขึ้นก็ตาม ในขณะที่ช่วงกว้างความถี่และความกว้างลำคลื่นที่ของสายอากาศที่เป็นโพลาริซวงกลมนั้นลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งเมื่อแผ่นระนาบกราวนด์มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนผลกระทบต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อขนาดแผ่นระนาบกราวนด์ใหญ่ขึ้นทำให้เกิดลำคลื่นย่อยมากขึ้น สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานจริงควรจะต้องเลือกขนาดแผ่นระนาบกราวนด์ที่ควรมีขนาดเล็กเท่าที่จะเป็นไปได้และมีคุณสมบัติตามความต้องการของระบบ

จากการศึกษาผลกระทบของรัศมีของแผ่นตัวนำวงกลม สรุปได้ว่าการนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้าง suspended layer ไปประยุกต์ใช้งานที่ความถี่ต่าง ๆ สามารถทำได้ โดยการเปลี่ยนขนาดของรัศมีของแผ่นตัวนำให้สอดคล้องกับความยาวคลื่นของความถี่ที่ต้องการ โดยที่คุณสมบัติหรือสมรรถนะที่ความถี่นั้นจะไม่แตกต่างกันมาก ยกเว้นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศเมื่อเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพต่ำ ส่งผลให้ค่าอัตราขยายของสายอากาศต่ำไปด้วย ส่วนการนำไปสายอากาศใช้งานที่ความถี่สูงควรจะต้องปรับความสูงของ suspended layer ให้เหมาะสมกับความถี่ที่พิจารณาด้วยเพื่อให้สายอากาศมีช่วงกว้างความถี่และคุณสมบัติที่ดีขึ้น

ถึงแม้ว่าการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบ suspended layer กับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่กระตุ้นด้วยสี่จุดป้อน จะทำให้คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปดีขึ้นโดยเฉพาะช่วงกว้างความถี่และอัตราขยายของสายอากาศ แต่เมื่อพิจารณาขนาดรวมของสายอากาศแล้วพบว่าสายอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อประยุกต์โครงสร้างแบบ suspended layer ซึ่งการนำมาประยุกต์ใช้งานจริงควรเลือกขนาดแผ่นระนาบกราวนด์ที่ควรมีขนาดเล็กเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นในบทต่อไปนำเสนอเทคนิคที่ช่วยทำให้สายอากาศมีขนาดกะทัดรัดและให้สมรรถนะสูงตรงกับความต้องการของระบบ

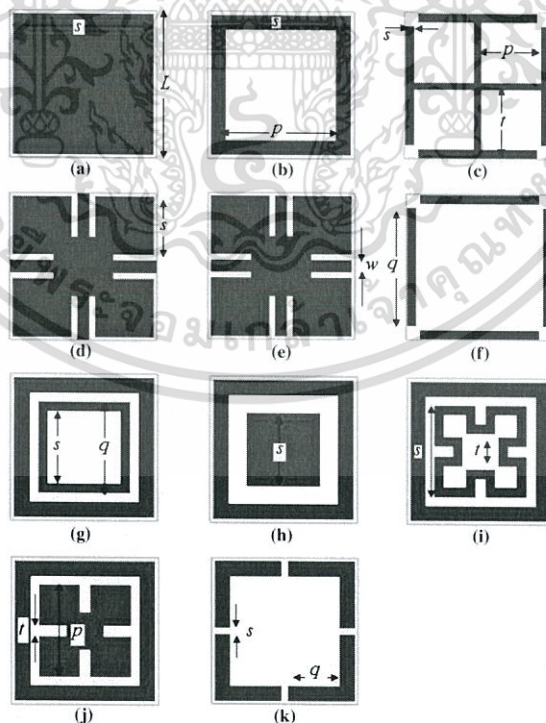
บทที่ 4

การปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้ระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม

จากการศึกษาสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ suspended layer ในบทที่ผ่านมา ด้วยโครงสร้างดังกล่าวช่วยให้สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่กระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นโดยเฉพาะช่วงกว้างความถี่และอัตราขยาย แต่สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งการนำมาประยุกต์ใช้งานจริงควรเลือกขนาดแผ่นระนาบกราวด์ที่ควรมีขนาดเล็กเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้ระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม โดยจะทำการออกแบบระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมเพื่อนำมาใช้ในงานวิจัย เซลล์หนึ่งหน่วยที่มีแผ่นตัวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม และแปดเหลี่ยมจะถูกศึกษาค้นคว้าเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศให้ดีขึ้นและเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ต่อไป

4.1 งานวิจัยที่มีมาก่อน

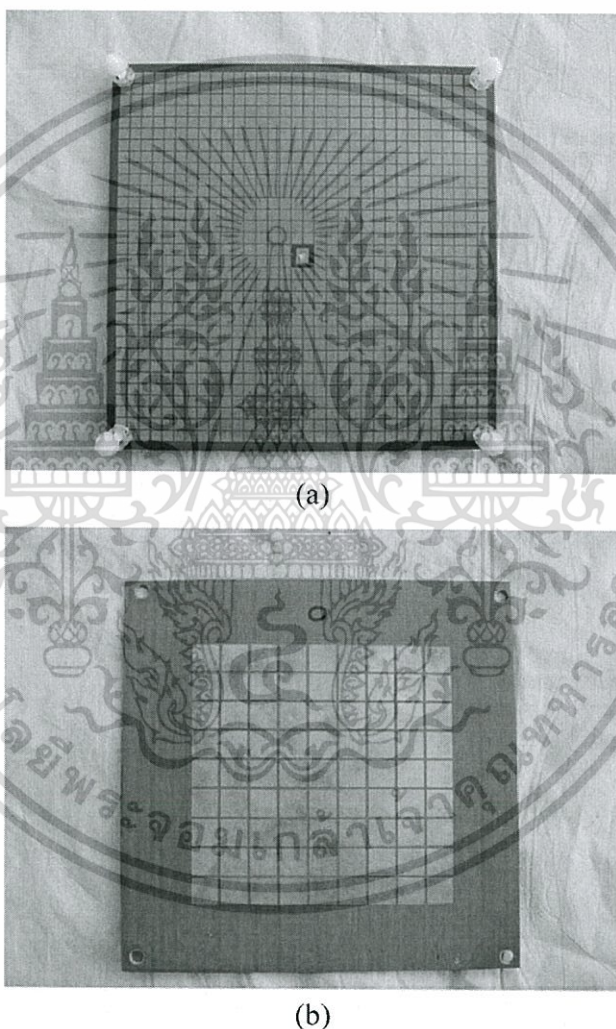
จากศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อน ได้มีการนำเสนอโครงสร้างแบบตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปร่างต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น รูปสี่เหลี่ยม [37], [38] รูปสี่เหลี่ยมดัดแปลง [39] – [41] รูปก้นหอย [42], [43] และรูปไม้กางเขน [44] มาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งโครงสร้างแบบระนาบแม่เหล็กเทียมที่มีเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปร่างต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างแบบระนาบแม่เหล็กเทียมที่มีเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปร่างต่าง ๆ [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

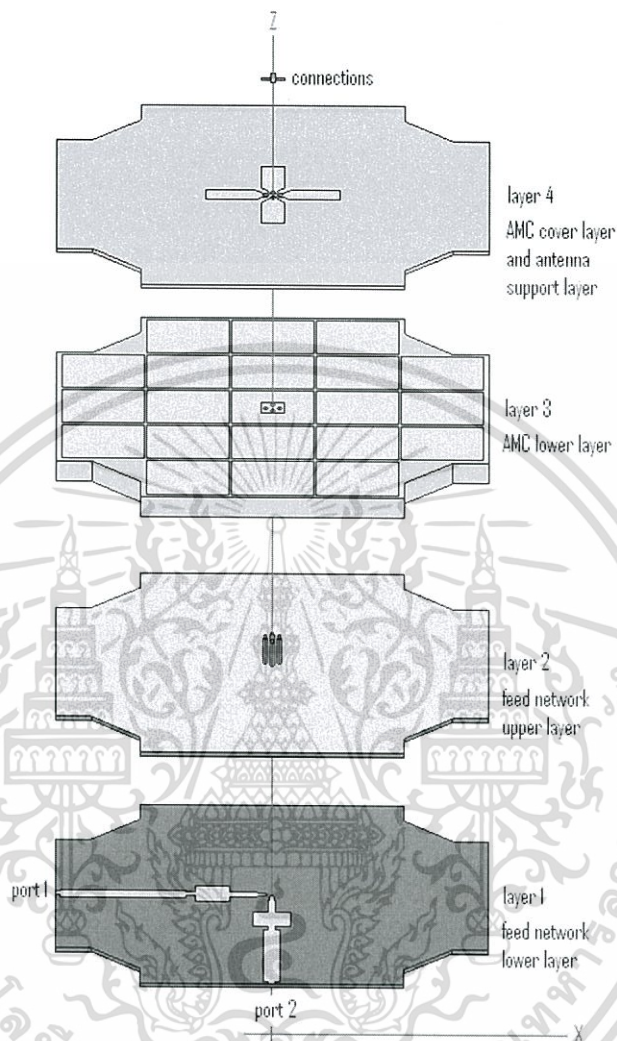
มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบตัวนำแม่เหล็กเทียม ในปี 2005 Feresidis และคณะ [38] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบตัวนำแม่เหล็กเทียมกับสายอากาศแบบแผ่นระนาบสัญญาณต่ำที่มีอัตราขยายสูง ซึ่งมีโครงสร้างของสายอากาศดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมถูกออกแบบให้ใช้งานที่ความถี่ 14 GHz (คุณลักษณะการสะท้อนเฟสเหมือนกัน) โดยที่ขนาดเซลล์หนึ่งหน่วยเท่ากับ $L = 4.1$ มิลลิเมตร $D = 4.5$ มิลลิเมตร วัสดุฐานรองหนา 1.13 มิลลิเมตร มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.2 สำหรับระนาบพื้นผิวแบบตัวนำแม่เหล็กเทียมนั้นจะนำมาแทนระนาบกราวด์เพื่อทำให้สายอากาศระนาบที่มีอัตราขยายสูงและช่วยให้สายอากาศแผ่นระนาบมีขนาดเล็กลง ซึ่งอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 19 dBi



รูปที่ 4.2 โครงสร้างสายอากาศของ Feresidis ที่นำเสนอในปี 2005

ในปี 2008 Baracco และคณะ [45] ได้นำเสนอสายอากาศย่านความถี่กว้างที่มีสัญญาณต่ำและใช้ประยุกต์โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมสำหรับ GPS และ GALILEO ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 โดยที่สายอากาศมีวัสดุไดอิเล็กตริก 4 ชั้น สองชั้นล่างสุดเป็นโครงข่ายจุดป้อนสัญญาณแบบเส้นสตริป ขณะที่สองชั้นบนจะเป็นระนาบตัวนำแม่เหล็กและไดโพล โดยที่ชั้นที่ 1 และ 2 จะมีค่า $\epsilon_r = 2.2$ ส่วนชั้นที่ 3 และ 4 มีค่า $\epsilon_r = 3.5$ โดยที่ความหนาของสายอากาศโดยรวมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

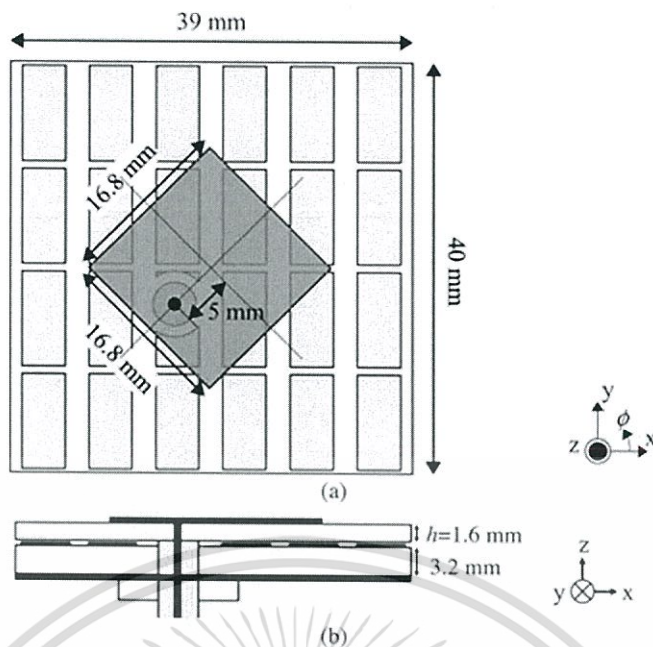
เท่ากับ 12.43 มิลลิเมตร และขนาดสายอากาศรวมเท่ากับ 151 มิลลิเมตร x 151 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบพบว่า สายอากาศมีอัตราขยายระหว่าง 5 ถึง 8 dBi นอกจากนี้ระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมยังช่วยให้สายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นลำคลื่นด้านหลังต่ำอีกด้วย



รูปที่ 4.3 โครงสร้างสายอากาศของ Baracco ที่นำเสนอในปี 2008

และในปี 2011 Nakamura และ Fukusako [4] ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปโพลาริซวงกลมโดยใช้โครงสร้างระนาบแม่เหล็กเทียมที่มีเซลล์หนึ่งหน่วยรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.4 ในงานวิจัยได้นำโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวางบนโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กที่มีเซลล์หนึ่งหน่วยรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ออกแบบให้ใช้งานที่ความถี่ประมาณ 6 GHz โดยที่สายอากาศมีอัตราขยายสูงสุด 6.60 dBic ที่ความถี่ 5.5 GHz และมีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 48.6% ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมช่วยให้สายอากาศมีช่วงกว้างความถี่ที่สูงขึ้นและอัตราขยายของสายอากาศที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปวางบนระนาบกราวด์ปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 โครงสร้างสายอากาศของ Nakamura ที่นำเสนอในปี 2011

นอกจากนี้ในงานวิจัยที่มีมาก่อน [46] – [49] ได้ศึกษาการนำโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมไปประยุกต์ใช้งานในระบบต่าง ๆ ก็พบว่าโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมนั้นสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติสมรรถนะของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นในบทนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม กับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นแบบสี่จุดป้อน โดยจะนำระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมมาแทนระนาบกราวด์ในโครงสร้าง suspended layer ที่ได้ นำเสนอไปในบทที่ผ่านมา

4.2 การออกแบบระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

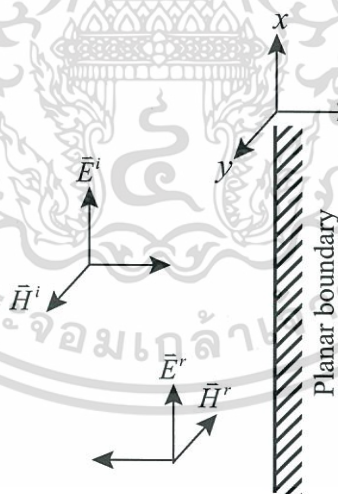
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการออกแบบโครงสร้างระนาบแม่เหล็กเทียมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปวงกลม โดยที่รูปร่างแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยในโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมจะถูกออกแบบให้มีรูปร่างต่าง ๆ และนำมาเปรียบเทียบเพื่อหารูปร่างที่เหมาะสมและช่วยปรับปรุงคุณสมบัติและสมรรถนะของสายอากาศสูงสุด ความต้องการของสายอากาศในตารางที่ 4.1 จะถูกนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ โดยจะกำหนดให้สายอากาศสามารถนำไปใช้งานที่ย่านความถี่ 2.45 GHz ส่วนขนาดของสายอากาศจะต้องกะทัดรัด และเหมาะสมกับไปใช้ได้หลายการประยุกต์ใช้ ซึ่งต้องมีขนาดรวมมากที่สุดไม่เกิน 100 มิลลิเมตร \times 100 มิลลิเมตร \times 10 มิลลิเมตร และใช้วัสดุฐานรองชนิด FR-4 ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และจากการศึกษาผลกระทบของวัสดุฐานรองของสายอากาศไมโครสตริปในบทที่ 2 พบว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโพลาริซวงกลมมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อใช้วัสดุฐานรองชนิด FR-4 ส่วนคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้นจะกำหนดให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวและมีโพลาริซวงกลมและอัตราขยายของสายอากาศมากกว่า 5 dBic

ตารางที่ 4.1 ความต้องการของระบบ

ย่านความถี่	2.45 GHz (Wireless LAN)
ขนาดสายอากาศ (มากที่สุด)	100 มิลลิเมตร × 100 มิลลิเมตร × 10 มิลลิเมตร
วัสดุฐานรอง	FR-4
ประเภทการแพร่กระจายคลื่น	แบบทิศทางเดียว - ลำคลื่นแคบ - ลำคลื่นที่สมมาตร - ลำคลื่นด้านหลังต่ำ
การโพลาไรซ์	โพลาไรซ์วงกลม สามารถเลือกได้ หมุนขวาหรือหมุนซ้าย
อัตราขยาย	มากกว่า 5 dBic

4.2.1. ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์และตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์

เนื่องจากตัวนำแม่เหล็กเทียมนั้นถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้มีคุณสมบัติเหมือนตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ (Perfect Magnetic Conductor หรือ PMC) เพื่อจะให้เข้าใจคุณลักษณะของตัวนำแม่เหล็กเทียมอย่างลึกซึ้ง ดังนั้นควรจะทำการศึกษาคูสมบัติของตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ก่อน ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่จะทำการศึกษาก็คือ คุณลักษณะการสะท้อน



รูปที่ 4.5 การตกกระทบของคลื่นแบบตั้งฉากกับระนาบขอบเขต

ในการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น TEM (Transverse electromagnetic) ที่มาตกกระทบระนาบขอบเขต (Planar boundary) โดยจะกำหนดให้มีคลื่น TEM มาตกกระทบและเกิดคลื่นสะท้อนดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะสมมติให้สนามไฟฟ้าที่มาตกกระทบมีขนาดเท่ากับ E_0 ในมี

โพลาริซในแนวแกน x ดังนั้นจะสามารถเขียนส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่มาตกระทบและเกิดจากการสะท้อนได้ดังนี้

$$\vec{E}^i = \hat{a}_x E_0 e^{-j\beta z} \quad (4.1)$$

$$\vec{E}^r = \hat{a}_x E_r e^{j\beta z} \quad (4.2)$$

โดยที่ E_0 และ E_r เป็นขนาดของสนามไฟฟ้าที่มาตกระทบและเกิดจากการสะท้อนตามลำดับ ส่วน β เป็นค่าคงที่เฟส และเมื่อใช้กฎมือขวาหรือสมการแมกซ์เวลล์ $\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$ จะทำให้สามารถหาส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กได้ดังนี้

$$\vec{H}^i = \hat{a}_y \frac{E_0}{\eta} e^{-j\beta z} \quad (4.3)$$

$$\vec{H}^r = -\hat{a}_y \frac{E_r}{\eta} e^{j\beta z} \quad (4.4)$$

โดยที่ $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ และจะสามารถหาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กรวมได้เป็น

$$\vec{E} = \vec{E}^i + \vec{E}^r = \hat{a}_x (E_0 e^{-j\beta z} + E_r e^{j\beta z}) \quad (4.5)$$

$$\vec{H} = \vec{H}^i + \vec{H}^r = \hat{a}_y \left(\frac{E_0}{\eta} e^{-j\beta z} + \frac{E_r}{\eta} e^{j\beta z} \right) \quad (4.6)$$

สำหรับในกรณีของระนาบขอบเขตเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect Electric Conductor หรือ PEC) โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ของสนามไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสของตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งจะทำให้สมการที่ 4.5 เขียนได้เป็น

$$E_0 + E_r = 0 \quad (4.7)$$

หรือ

$$E_0 = -E_r \quad (4.8)$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) เมื่อมีคลื่นมาตกระทบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์จากสมการที่ 4.8 ได้ซึ่งพบว่า $\Gamma = -1$

สำหรับในกรณีของระนาบขอบเขตเป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กที่ผิวสัมผัสของตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งจะทำให้สมการที่ 4.6 เขียนได้เป็น

$$\frac{E_0}{\eta} - \frac{E_r}{\eta} = 0 \quad (4.9)$$

หรือ

$$E_0 = E_r \quad (4.10)$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) เมื่อมีคลื่นมาตกกระทบตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์จากสมการที่ 4.10 ได้ซึ่งพบว่า $\Gamma = +1$

จากการวิเคราะห์ข้างต้นจึงสรุปได้ว่า ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์จะมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนหรือ $\Gamma = -1$ ขณะที่ตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนหรือ $\Gamma = +1$ ซึ่งหมายความว่าเฟสของคลื่นสะท้อนเดียวกับเฟสของคลื่นตกกระทบเมื่อมีคลื่นมาตกกระทบตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ ถ้าพิจารณาในทางทฤษฎีสายส่ง จะพบว่า พื้นผิวการสะท้อนแบบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์นั้นสามารถแทนด้วยวงจรปิด (Short circuit) ส่วนตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์สามารถแทนด้วยวงจรเปิด (Open circuit)

พื้นผิวดำนำแม่เหล็กสมบูรณ์มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ อย่างแรกคือ กระแสเงา (Image current) ของตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์จะมีเฟสเดียวกันกับกระแสเดิม (Original current) ด้วยเหตุนี้จะสามารถนำตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ใช้ประโยชน์เป็นตัวสะท้อนของสายอากาศและจะสามารถวางองค์ประกอบที่แพร่กระจายคลื่นให้ใกล้ ๆ กับตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ได้ซึ่งจะทำให้ได้สายอากาศที่มีสัญญาณต่ำ คุณสมบัติอีกอย่างของตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ คือ การมีอิมพีแดนซ์พื้นผิวสูงซึ่งสามารถช่วยให้คลื่นพื้นผิวหายไปได้ สัญญาณรบกวนจากคลื่นพื้นผิวในทิศการแพร่กระจายของลำคลื่นหลักและผลกระทบของคลื่นเลี้ยวเบนจากขอบต่าง ๆ นั้นจะลดลง

แต่อย่างไรก็ตาม โดยตามธรรมชาติแล้วพื้นผิวการสะท้อนแบบตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์นั้นไม่มีอยู่จริงทางกายภาพ แต่จะมีพื้นผิวแบบหนึ่งที่สามารถสร้างขึ้นมาใช้แทนตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ โดยจะมีคุณสมบัติของการเลื่อนเฟสไป 180° เมื่อเทียบกับพื้นผิวแบบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ที่เวลาเดียวกัน และจะสะท้อนคลื่นตกกระทบกลับไปหมดอย่างสมบูรณ์ได้เหมือนกับตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ โดยจะเรียกพื้นผิวแบบนี้ว่า ตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์เทียม (Artificial PMC) วิธีหนึ่งที่น่ามาใช้ในการสร้างตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์เทียมนั้นก็คือ การใช้โครงสร้างแบบ Periodic

4.2.2. ตัวนำแม่เหล็กเทียม

ตัวนำแม่เหล็กเทียมเป็นอภิวัด (Metamaterial) ชนิดหนึ่ง que แสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบใหม่ โดยที่คุณสมบัติของโครงสร้างมีลักษณะเฉพาะเกี่ยวข้องกับเฟสการสะท้อน ตัวนำแม่เหล็กเทียมนี้จะมีเฟสการสะท้อนเท่ากับ 0° เช่นเดียวกับตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ ส่วนคุณสมบัติอื่นของตัวนำแม่เหล็กเทียมคือ การมีอิมพีแดนซ์พื้นผิวสูงซึ่งสามารถช่วยให้คลื่นพื้นผิวหายไปได้เมื่อนำระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมมาใช้เป็นตัวสะท้อนของสายอากาศ ส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นและลดระดับลำคลื่นด้านหลังเมื่อเทียบกับตัวสะท้อนโลหะโดยทั่วไป [49]

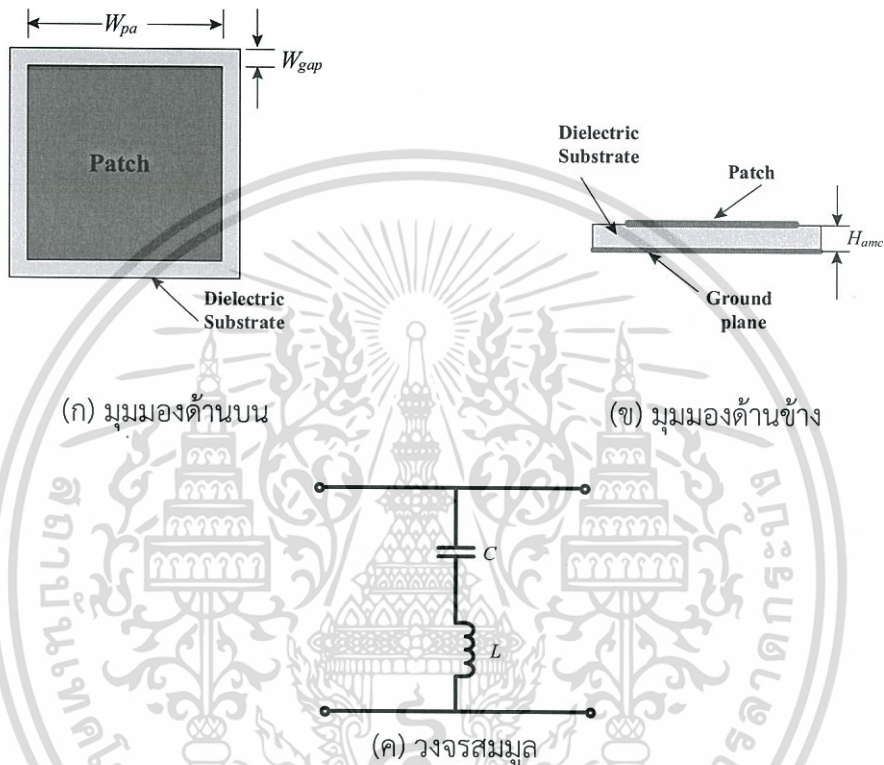
ในทางปฏิบัติเฟสการสะท้อนของระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมจะมีค่าอยู่ระหว่าง 180° ถึง -180° แปรผันตามความถี่และมีเพียงความถี่เดียวที่มีค่าเท่ากับ 0° ซึ่งเป็นค่าเฟสการสะท้อนของความถี่เรโซแนนซ์ ช่วงกว้างความถี่ที่นำมาใช้พิจารณาเฟสการสะท้อนของตัวนำแม่เหล็กเทียมโดยทั่วไปจะนิยามที่ช่วงความถี่มีเฟสการสะท้อนเท่ากับ 90° ถึง -90° จากความถี่กลางที่มีเฟสการสะท้อนเท่ากับ 0° เนื่องจากค่าเฟสเหล่านี้ไม่น่าจะเกิดจากการแทรกสอดระหว่างคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อน [40]

ธรรมชาติการเรโซแนนซ์ของตัวนำแม่เหล็กเทียมจะขึ้นอยู่กับความถี่ โดยทั่วไปจะมีย่านความถี่แคบมาก ความถี่เรโซแนนซ์ของตัวแม่เหล็กเทียมจะถูกกำหนดโดยรูปร่างและขนาดของแผ่นตัวนำ ที่ออกแบบร่วมกับความหนาและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง เมื่อเซลล์หนึ่งหน่วยของระนาบตัวแม่เหล็กเทียมมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นที่พิจารณามาก ตัวนำแม่เหล็กเทียมจะสามารถถูกจำลองแบบเป็นโครงข่าย LC ที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ซึ่งอิมพีแดนซ์พื้นผิวของตัวนำแม่เหล็กเทียมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ช่วงกว้างความถี่ที่มีการสะท้อนเฟสเดียวกันตามสัดส่วนกับ $\sqrt{L/C}$ [50], [51]

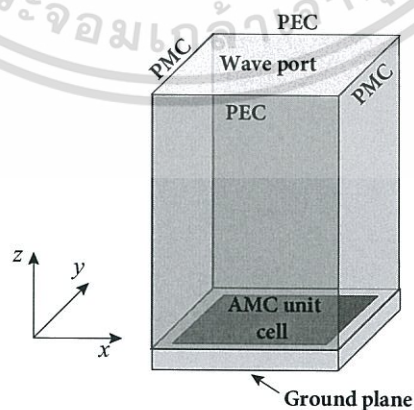
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการออกแบบโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีรูปร่างแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยต่าง ๆ ให้สามารถทำงานที่ความถี่ตามตารางที่ 4.1 โดยจะเริ่มต้นเซลล์หนึ่งหน่วยที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในรูปที่ 4.6 จะแสดงโครงสร้างของเซลล์หนึ่งหน่วยที่มีรูปร่างแผ่นตัวนำเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยที่ W_{pa} และ W_{gap} คือความกว้างแผ่นตัวนำและขอบตามลำดับ และเซลล์หนึ่งหน่วยจะถูกออกแบบให้ใช้วัสดุฐานรองที่มีความหนาเท่ากับ H_{amc} และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.3 (วัสดุฐานรองชนิด FR-4) วงจรสมมูลของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้แสดงไว้ในรูป 4.6 (ค) โดยที่องค์ประกอบการนำไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยตัวเหนี่ยวนำ L และความจุไฟฟ้าภายในองค์ประกอบจะถูกแทนด้วยตัวเก็บประจุ C [38] ส่วนรูปที่ 4.7 จะแสดงแบบจำลองของเซลล์หนึ่งหน่วยที่นำไปจำลองด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ซึ่งถูกประยุกต์มาจาก [37] เพื่อใช้ในการหาช่วงกว้างความถี่ของตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีเฟสการสะท้อนอยู่ในช่วง 90° ถึง -90° เนื่องจากความสมมาตรทั้งทางด้านทางรูปร่างและไฟฟ้าของแต่ละองค์ประกอบเดี่ยวซึ่งผนังด้านข้างสามารถถูกแทนด้วยเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมจึงทำให้หาผลลัพธ์ของแบบจำลองของโครงสร้างที่มีองค์ประกอบจำนวนอนันต์ด้วยเพียงองค์ประกอบเดี่ยว โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขขอบขอบจะสร้างผลกระทบขององค์ประกอบอื่น ๆ ทั้งหมดขึ้นมา สมมติให้สนามไฟฟ้าตกกระทบมีโพลาไรเซชันในทิศ y ดังนั้นขอบเขตที่ $y = y_{\min}$ และ $y = y_{\max}$ จะกำหนดให้เป็น PEC ซึ่งทำให้เวกเตอร์สนามไฟฟ้าตั้งฉากขอบเขตนี้ ในขณะที่ x_{\min} และ x_{\max} จะกำหนดให้เป็น PMC ซึ่งทำให้เวกเตอร์สนามแม่เหล็กตั้งฉากขอบเขตนี้ ส่วน z_{\min} จะกำหนดให้เป็น PEC เนื่องจากเป็นระนาบกราวนด์ โดยที่คลื่นตกกระทบเดินทางมาจากทิศ $z = +\infty$ ส่วนคลื่นสะท้อนจะเกิดขึ้นในทิศ $+z$



รูปที่ 4.6 เซลล์หนึ่งหน่วยของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียม



รูปที่ 4.7 แบบจำลองของเซลล์หนึ่งหน่วยของตัวนำแม่เหล็กเทียม

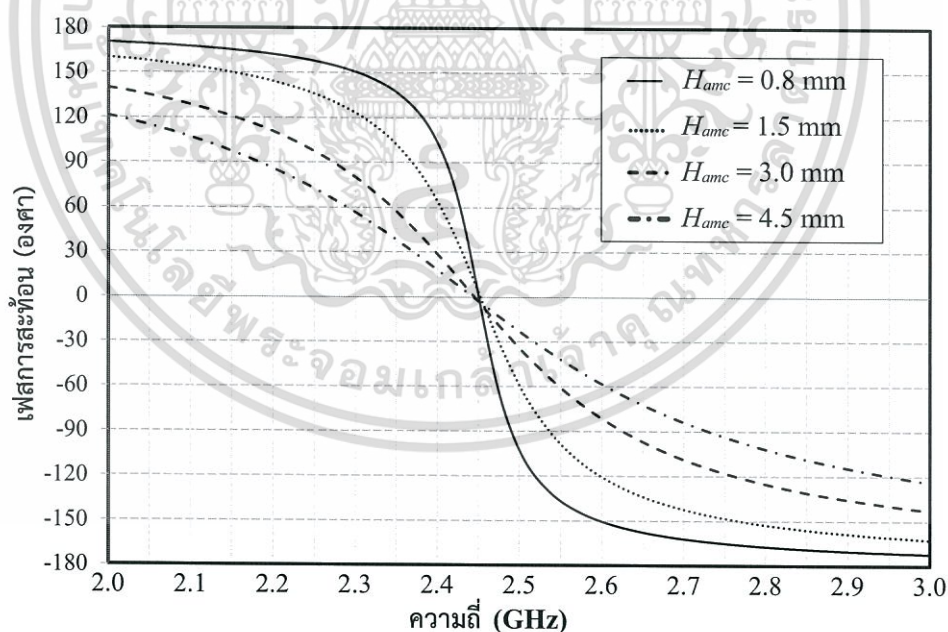
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3. ช่วงกว้างความถี่เฟสการสะท้อนของตัวนำแม่เหล็กเทียม

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอช่วงกว้างความถี่เฟสการสะท้อนที่นำมาใช้ในการออกแบบตัวนำแม่เหล็กเทียม ผลกระทบของความหนาวัสดุฐานรองของตัวนำแม่เหล็กเทียม (H_{amc}) ต่อเฟสการสะท้อนจะแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อกำหนดให้ $W_{gap} = 1.25$ มิลลิเมตร และ $H_{air} = 1.5$ มิลลิเมตร พบว่าตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีวัสดุฐานรองหนาจะให้ช่วงกว้างความถี่เฟสการสะท้อนมากกว่าตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีวัสดุฐานรองบาง ช่วงกว้างความถี่ที่นำมาใช้ประโยชน์ของตัวนำแม่เหล็กเทียม เท่ากับ 3.22% 6.86% 14.45% และ 22.37% เมื่อความหนาวัสดุฐานรองของตัวนำแม่เหล็กเทียมเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร 3.0 มิลลิเมตร และ 4.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความกว้างแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยจากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อวัสดุฐานรองหนาขึ้น ความกว้างของแผ่นตัวนำจะมีขนาดลดลง

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของตัวนำแม่เหล็กเทียมเมื่อศึกษาผลกระทบของ H_{amc}

W_{pa} (มิลลิเมตร)	27.27	24.96	20.49	16.43
H_{amc} (มิลลิเมตร)	0.75	1.50	3.00	4.50
W_{gap} (มิลลิเมตร)	1.25			
H_{air} (มิลลิเมตร)	1.5			

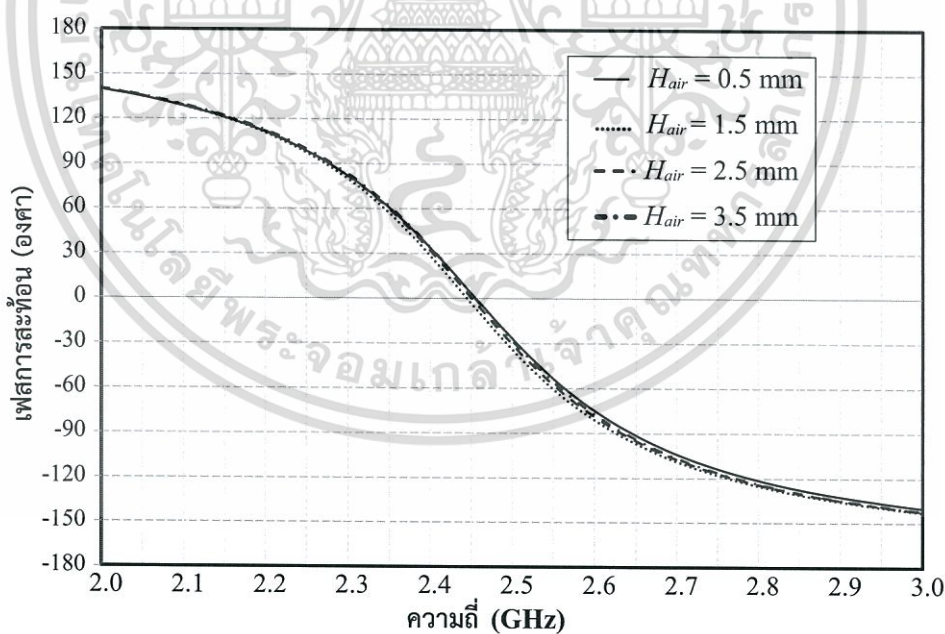


รูปที่ 4.8 คุณลักษณะเฟสการสะท้อนของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อศึกษาผลกระทบของ H_{amc}

จากนั้นได้ทำการศึกษาผลกระทบของช่องว่างอากาศระหว่างสายอากาศไมโครสตริปวงกลมกับตัวนำแม่เหล็กเทียม (H_{air}) ที่มีต่อเฟสการสะท้อน เมื่อกำหนดให้ $W_{gap} = 1.25$ มิลลิเมตร และ $H_{amc} = 3$ มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.9 พบว่า ระยะห่างของ Wave port กับตัวนำแม่เหล็กเทียมที่เปลี่ยนไปจะไม่มีผลกระทบต่อเฟสการสะท้อน โดยที่ช่วงกว้างความถี่ที่นำมาใช้ประโยชน์ของตัวนำแม่เหล็กเทียมมีค่าประมาณ 14.45% ทุกระยะห่างของ Wave port กับตัวนำแม่เหล็กเทียม และเมื่อพิจารณาความกว้างแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยจากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อระยะห่างของ Wave port กับตัวนำแม่เหล็กเทียมมากขึ้น ความกว้างของแผ่นตัวนำจะมีขนาดมากขึ้นด้วยและมีแนวโน้มลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่ง สำหรับในกรณีนี้ W_{pa} จะเริ่มลู่เข้าค่า 21.5 มิลลิเมตรตั้งแต่ H_{air} เท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของตัวนำแม่เหล็กเทียมเมื่อศึกษาผลกระทบของ H_{air}

W_{pa} (มิลลิเมตร)	17.20	20.49	21.1	21.35
H_{air} (มิลลิเมตร)	0.5	1.5	2.5	3.5
W_{gap} (มิลลิเมตร)	1.25			
H_{amc} (มิลลิเมตร)	3			

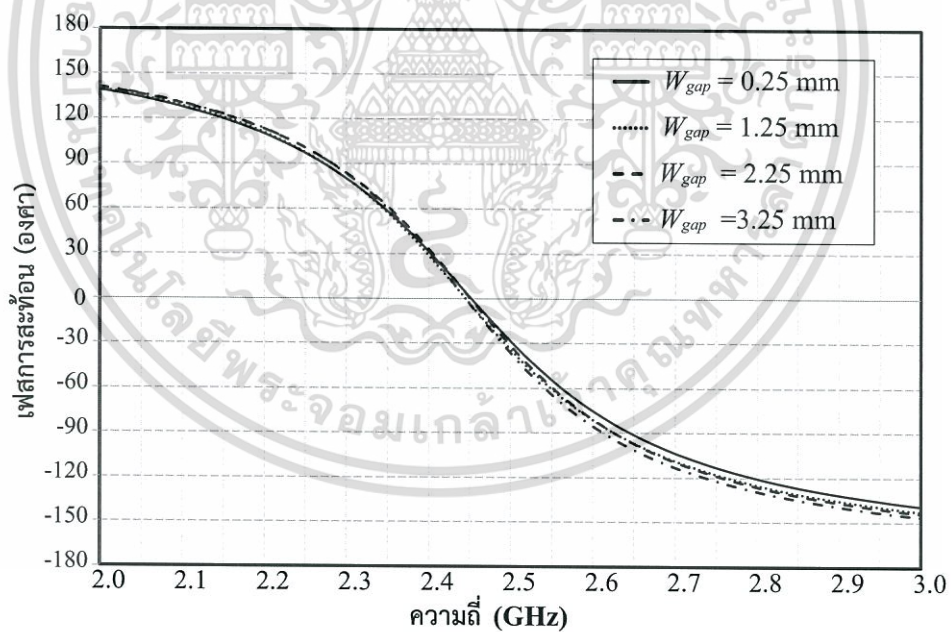


รูปที่ 4.9 คุณลักษณะเฟสการสะท้อนของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อศึกษาผลกระทบของ H_{air}

และเมื่อทำการศึกษาผลกระทบความกว้างของขอบตัวนำแม่เหล็กเทียม (W_{gap}) ที่มีต่อเฟสการสะท้อน เมื่อกำหนดให้ $H_{air} = 1.5$ มิลลิเมตร และ $H_{amc} = 3$ มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.10 พบว่าความกว้างของขอบตัวนำแม่เหล็กเทียมจะไม่มีผลกระทบต่อเฟสการสะท้อน โดยที่ช่วงกว้างความถี่ที่นำมาใช้ประโยชน์ของตัวนำแม่เหล็กเทียมมีค่าประมาณ 14.45% ทุกความกว้างของขอบตัวนำแม่เหล็กเทียมที่ทำการศึกษา และเมื่อพิจารณาความกว้างแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยจากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อความกว้างของขอบตัวนำแม่เหล็กเทียมเพิ่มขึ้น จะทำให้แผ่นตัวนำมีขนาดมากขึ้นไปด้วยและมีแนวโน้มลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งเช่นกันเดียวกับกรณีของการศึกษาผลกระทบของระยะห่างของ Wave port กับตัวนำแม่เหล็กเทียม สำหรับในกรณีนี้ W_{pa} จะเริ่มลู่เข้าค่า 23 มิลลิเมตรตั้งแต่ W_{gap} เท่ากับ 2.25 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของตัวนำแม่เหล็กเทียมเมื่อศึกษาผลกระทบของ W_{gap}

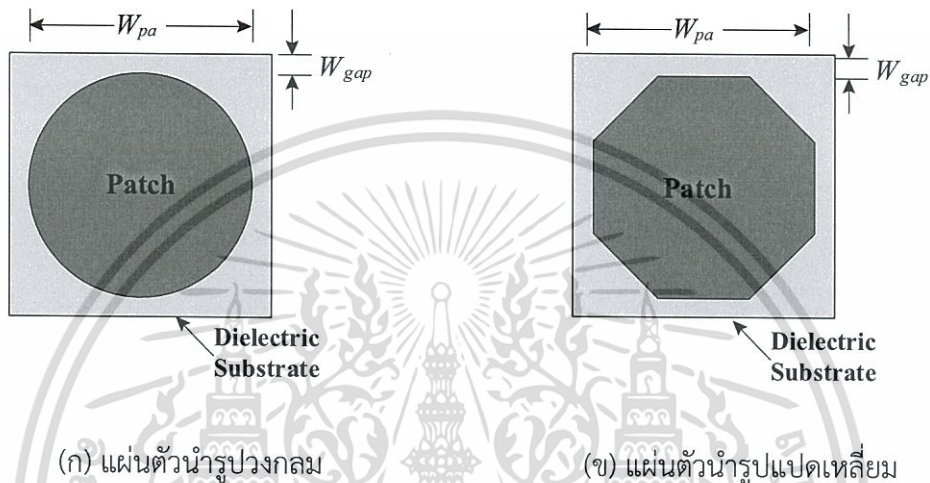
W_{pa} (มิลลิเมตร)	14.95	20.49	22.00	22.83
W_{gap} (มิลลิเมตร)	0.25	1.25	2.25	3.25
H_{amc} (มิลลิเมตร)	3			
H_{air} (มิลลิเมตร)	1.5			



รูปที่ 4.10 คุณลักษณะเฟสการสะท้อนของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อศึกษาผลกระทบของ W_{gap}

4.2.4. การออกแบบตัวนำแม่เหล็กเทียม

ขั้นตอนต่อไปจะทำการออกแบบแผ่นตัวนำของตัวนำแม่เหล็กเทียมให้มีรูปร่างแบบอื่น โดยที่ในรูปที่ 4.11 จะแสดงรูปแบบของแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยในรูปแบบอื่นซึ่งประกอบด้วย เซลล์หนึ่งหน่วยที่มีแผ่นตัวนำรูปวงกลมดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) โดยที่แผ่นตัวนำรูปวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ W_{pa} และเซลล์หนึ่งหน่วยที่มีแผ่นตัวนำรูปแปดเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ข) โดยที่แผ่นตัวนำรูปแปดเหลี่ยมจะเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ W_{pa}

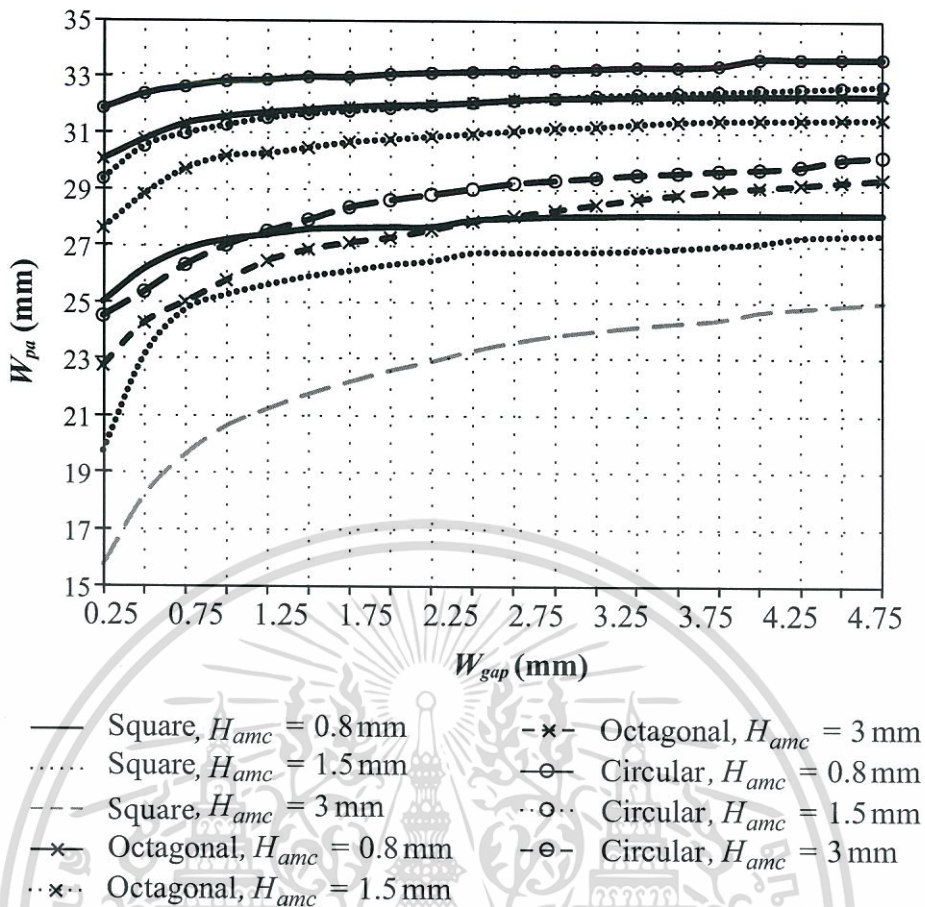


(ก) แผ่นตัวนำรูปวงกลม

(ข) แผ่นตัวนำรูปแปดเหลี่ยม

รูปที่ 4.11 เซลล์หนึ่งหน่วยของตัวนำแม่เหล็กเทียม

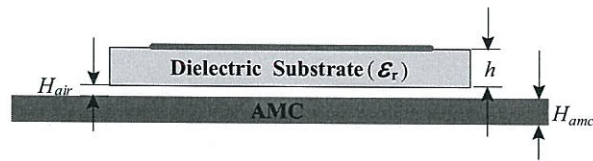
จากนั้นจะทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ ประกอบด้วยขนาดของแผ่นตัวนำ W_{pa} และความกว้างขอบของเซลล์หนึ่งหน่วย W_{gap} ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของ W_{pa} กับ W_{gap} เมื่อแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยมีรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม และแปดเหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าเส้นโค้งของ W_{pa} มีแนวโน้มที่ลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่งเมื่อ W_{gap} เพิ่มขึ้น เมื่อตัวนำแม่เหล็กใช้วัสดุฐานรองที่หนาเท่ากัน พบว่าแผ่นตัวนำของตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะมีขนาดเล็กกว่าแผ่นตัวนำรูปร่างอื่น ในขณะที่ขนาดของแผ่นตัวนำรูปวงกลมจะมีขนาดใหญ่ที่สุด นอกจากนี้เมื่อตัวนำแม่เหล็กเทียมมีวัสดุฐานรองหนาขึ้น จะทำให้แผ่นตัวนำมีขนาดเล็กลง จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.12 มาใช้ประโยชน์ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการประยุกต์ใช้โครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมในหัวข้อถัดไป



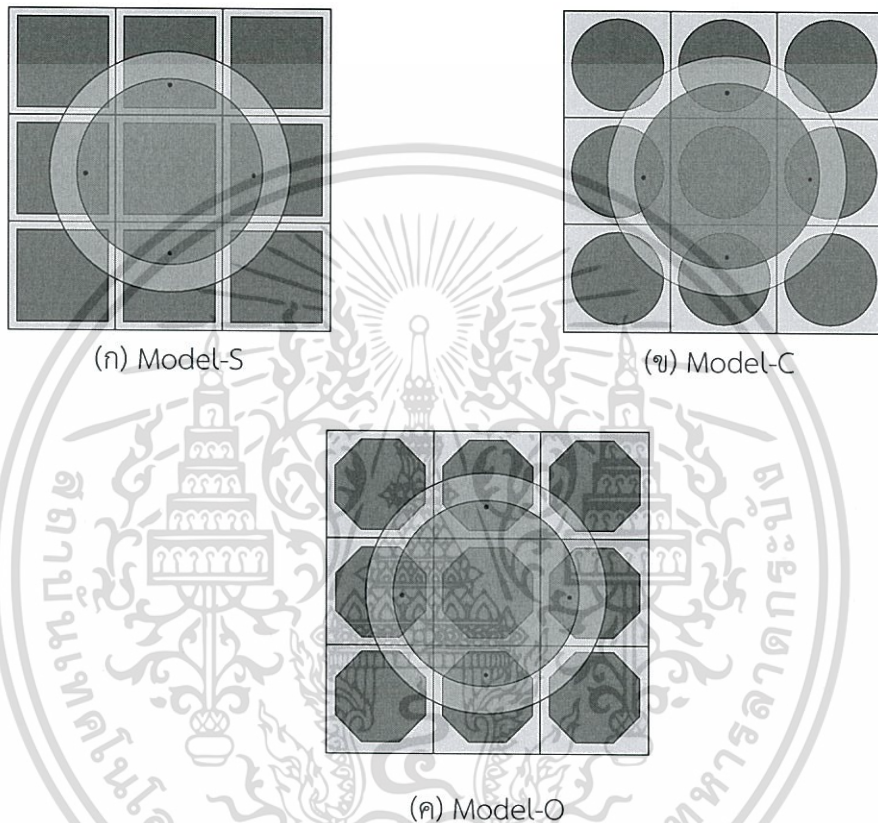
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของ W_{pa} กับ W_{gap} เมื่อแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วย มีรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม และแปดเหลี่ยม

4.3 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม

ในหัวข้อนี้ โครงสร้างตัวแม่เหล็กเทียมที่มีแผ่นตัวนำสามารถออกแบบและนำไปประยุกต์ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติและสมรรถนะของสายอากาศ โดยจะอาศัยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาพารามิเตอร์ในบทที่ผ่านมาในการเลือกพารามิเตอร์ของสายอากาศเบื้องต้น และใช้ประโยชน์จากข้อมูลจากรูปที่ 4.12 ในเลือกความหนาของวัสดุฐานรองและความกว้างขอบของโครงสร้างตัวแม่เหล็กเทียม ดังนั้นโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมทั้งสามรูปแบบจะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 4.13 โดยที่ H_{anc} เท่ากับ 3 มิลลิเมตร W_{gap} เท่ากับ 1.25 มิลลิเมตร H_{air} เท่ากับ 3 มิลลิเมตร และ h เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร สำหรับวัสดุฐานรองจะเป็นชนิด FR-4 ทั้งหมด



รูปที่ 4.13 โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมเมื่อถูกนำไปประยุกต์ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปวงกลม

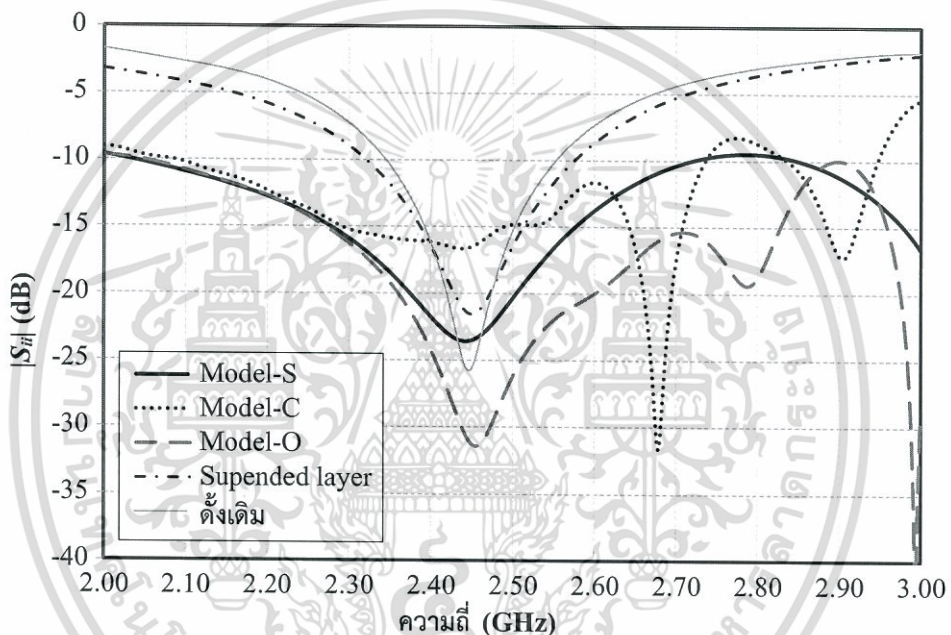


รูปที่ 4.14 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมทั้งสามรูปแบบ

ส่วนในรูปที่ 4.14 จะแสดงมุมมองด้านบนของโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมทั้งสามรูปแบบ โดยที่ model-S model-C และ model-O คือ โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีแผ่นตัวนำของโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม และแปดเหลี่ยม ตามลำดับ เนื่องจากต้องการให้ขนาดรวมของสายอากาศมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมจึงใช้เซลล์หนึ่งหน่วย 3×3 เซลล์ ซึ่งเป็นจำนวนเซลล์หนึ่งหน่วยที่มีพื้นที่ครอบคลุมสายอากาศไมโครสตริปวงกลมและทำให้ขนาดสายอากาศรวมสอดคล้องกับความต้องการของสายอากาศ

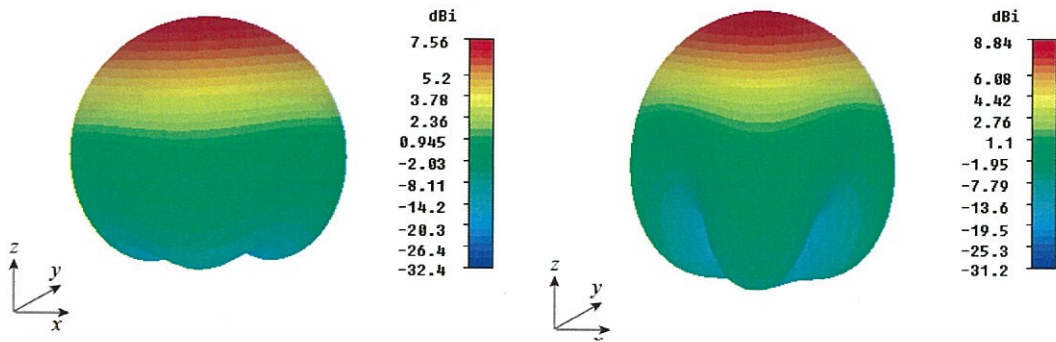
โดยทั่วไปช่วงความกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิมเป็นไปตามตามสัดส่วนกับ $1/\sqrt{\epsilon_r}$ [8] ซึ่งจะมีช่วงกว้างความถี่แคบ แต่ช่วงกว้างความถี่ของโครงสร้างระนาบแม่เหล็กเทียมเป็นไปตามสัดส่วนตามสัดส่วนกับ $\sqrt{L/C}$ [50], [51] ถ้าค่าความจุลดลงก็จะทำให้ช่วงกว้างความถี่ของโครงสร้างระนาบแม่เหล็กเทียมเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความจุจะขึ้นอยู่กับช่องว่างเซลล์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งหน่วยของตัวนำแม่เหล็กเทียมที่นำต่อเรียงกันเป็นระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม ส่วนค่าความเหนี่ยวนำนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุฐานรอง วัสดุฐานรองที่หนากว่าจะให้ช่วงกว้างความถี่ที่กว้างกว่า ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมหาได้จากรูปที่ 4.15 ซึ่งได้แสดงค่า $|S_{ii}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ ที่ความถี่ 2.45 GHz พบว่าการประยุกต์ใช้โครงสร้างระนาบแม่เหล็กเทียมกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมนั้นช่วยขยายช่วงกว้างความถี่ให้มากขึ้น สำหรับช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมมีการประยุกต์ใช้โครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม จะมีค่าเท่ากับ 27.80% (2.030 ถึง 2.711 GHz) 26.65% (2.083 ถึง 2.736 GHz) และ 36.65% (2.046 ถึง 2.895 GHz) จากความถี่ที่ใช้งาน (2.45 GHz) มีโครงสร้าง model-S model-C และ model-O เมื่อเทียบกับโครงสร้าง suspended layer และแบบดั้งเดิมที่มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 10.41% (2.32 ถึง 2.575 GHz) และ 8.61 % (2.344 ถึง 2.555 GHz) ตามลำดับ



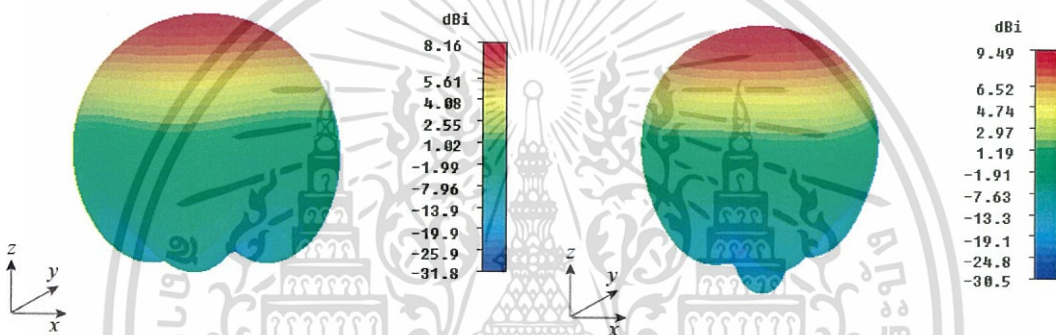
รูปที่ 4.15 $|S_{ii}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz

เมื่อพิจารณาคูณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่วางบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม สำหรับรูปที่ 4.16 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ ที่ความถี่ 2.45 GHz พบว่าการประยุกต์ใช้โครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมสามารถช่วยลดระดับลำคลื่นด้านหลังซึ่งเห็นได้อย่างชัดในรูปที่ 4.17 นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบดั้งเดิม แต่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางนั้นจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้าง suspended layer เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมด้วยกัน พบว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของ model-C จะมีค่ามากที่สุด ส่งผลให้ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครั้งหนึ่งมีค่าน้อยที่สุด ส่วนค่าสภาพเจาะจงทิศทางของ model-S จะมีค่าน้อยที่สุดและมีความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครั้งหนึ่งมีค่ามากที่สุด



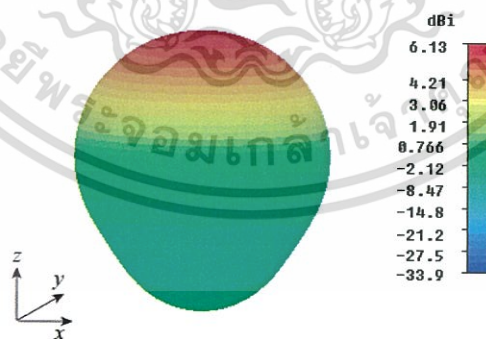
(ก) model-S

(ข) model-C



(ค) model-O

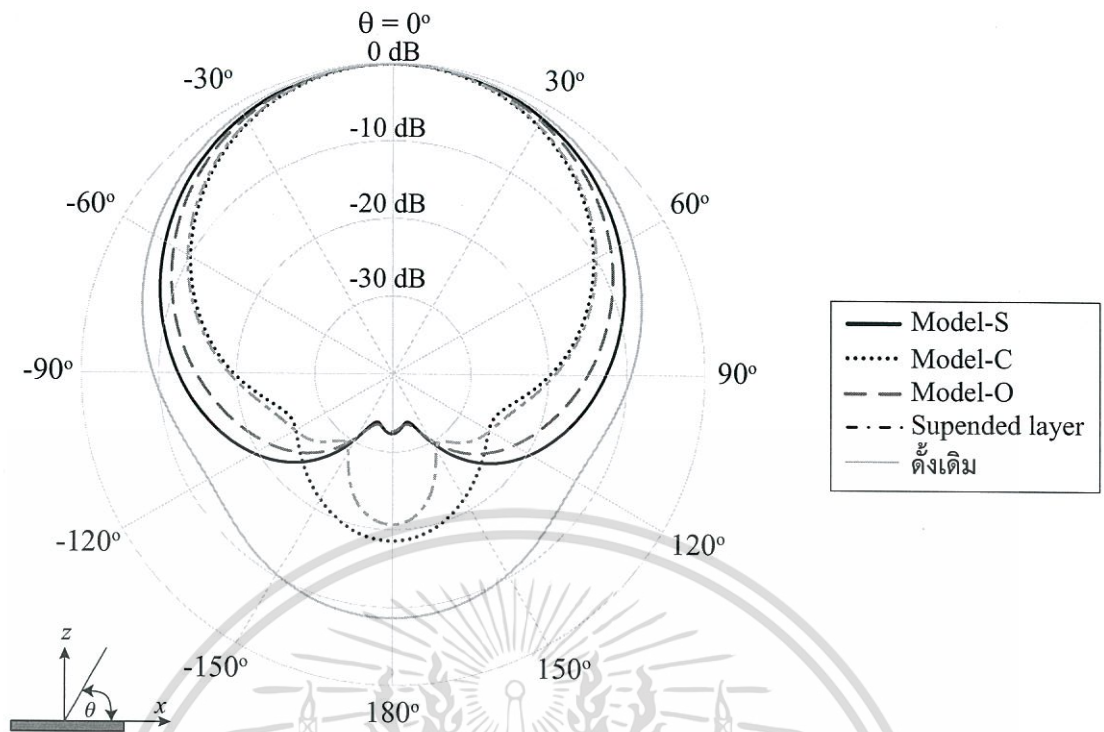
(ง) โครงสร้าง suspended layer



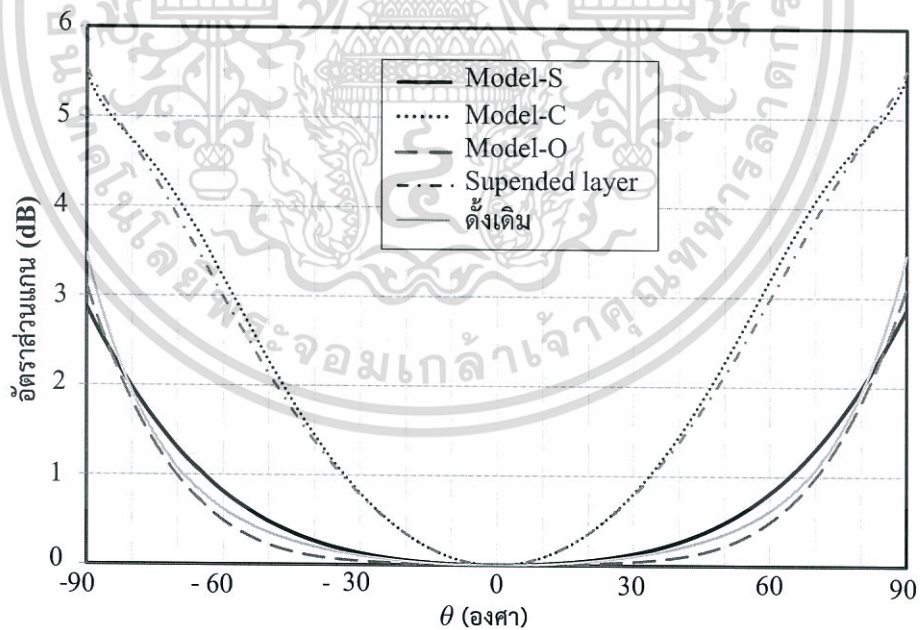
(จ) โครงสร้างแบบดั้งเดิม

รูปที่ 4.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



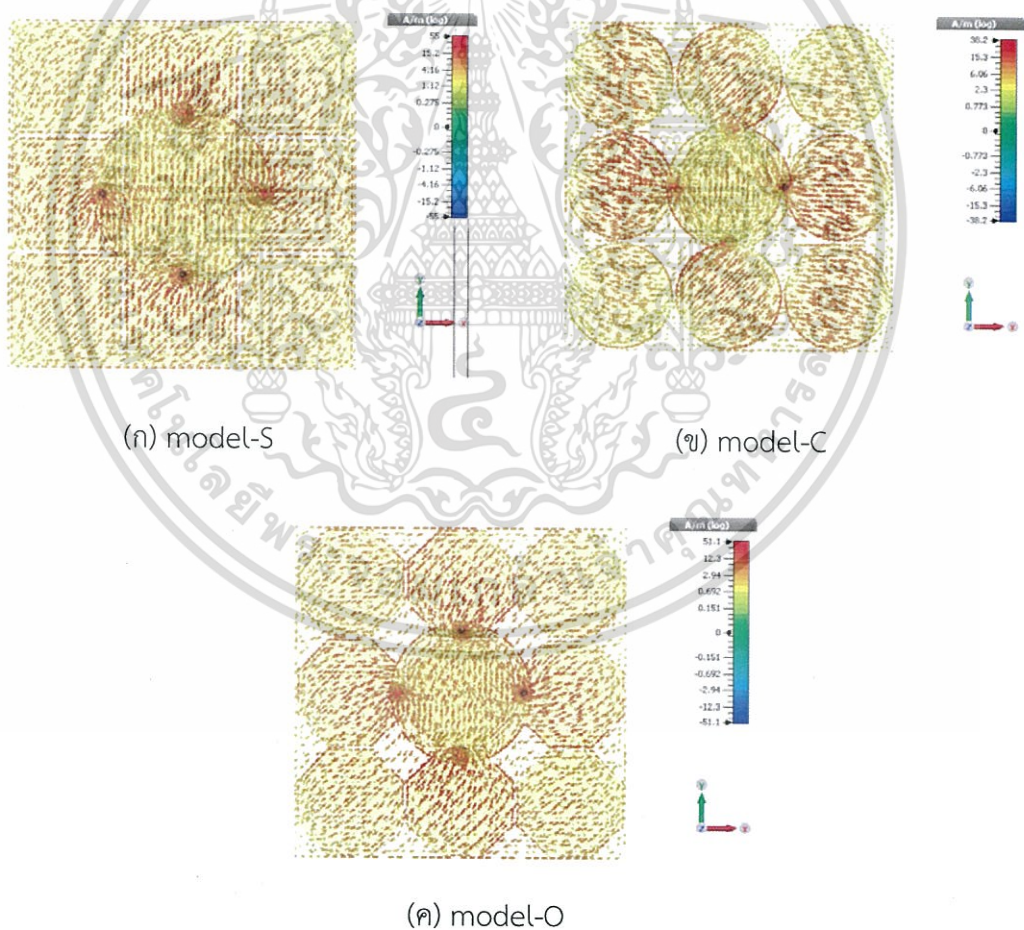
รูปที่ 4.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนอร์แมลไลซ์ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 4.18 อัตราส่วนแกนในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

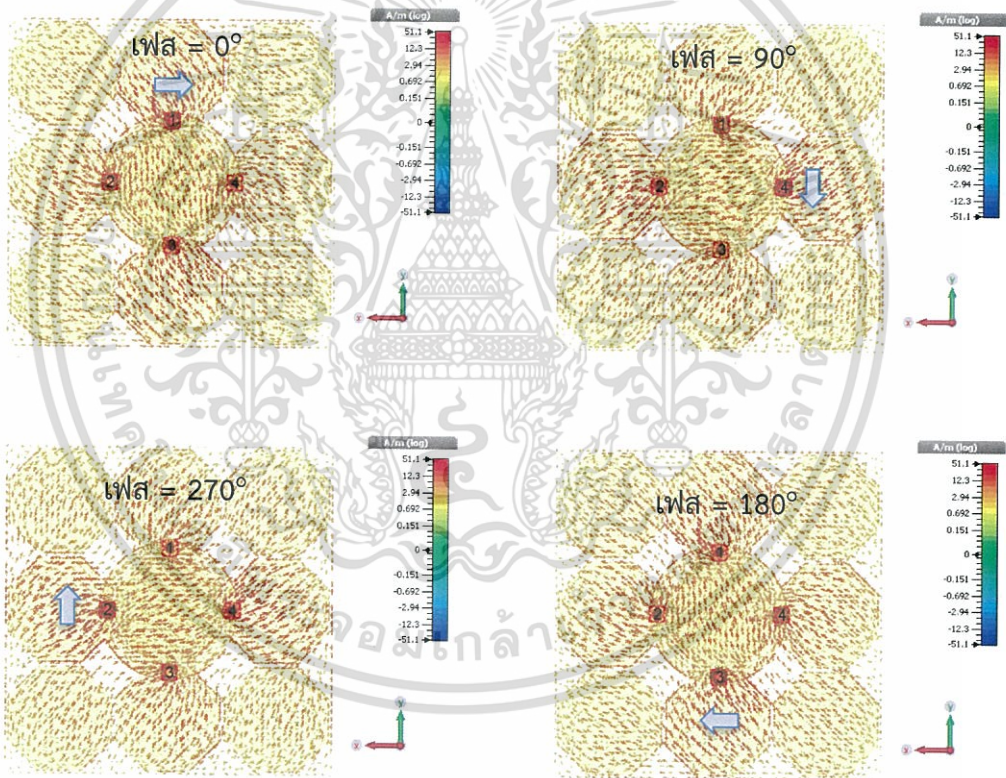
เมื่อพิจารณาอัตราส่วนแกนของสายอากาศในรูปที่ 4.18 พบว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนยังคงให้โพลาริเซชันวงกลม ไม่ว่าจะสายอากาศไมโครสตริปจะมีการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบใดก็ตาม ซึ่งเป็นสิ่งที่ยืนยันว่าเทคนิคการกระตุ้นด้วยหลายจุดป้อนช่วยสร้างโพลาริเซชันวงกลมที่มีสมรรถนะสูงได้จริง โดยที่อัตราส่วนแกนของสายอากาศทุกโครงสร้างมีมุมลาคัสที่มีขนาดสูงสุด ($\theta = 0^\circ$) มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 dB ซึ่งโพลาริเซชันวงกลมที่ได้จะมีสมมาตรทั้งสองแนวแกน ความกว้างลาคัสของสายอากาศที่เป็นโพลาริเซชันวงกลมของ model-S และ model-O จะมีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างแบบดั้งเดิมซึ่งมีมากกว่า 180° และเท่ากับ 178° สำหรับ model-S และ model-O ตามลำดับ ส่วนความกว้างลาคัสของสายอากาศที่เป็นโพลาริเซชันวงกลมของ model-C มีค่าเท่ากับ 116° ซึ่งใกล้เคียงกับโครงสร้าง suspended layer นอกจากนี้เมื่อพิจารณาช่วงความถี่ที่สายอากาศมีโพลาริเซชันวงกลม จะพบว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมทุกโครงสร้างยังคงมีโพลาริเซชันวงกลม (อัตราส่วนแกนค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 dB) ตลอดช่วงความถี่ที่พิจารณา (2 ถึง 3 GHz)



รูปที่ 4.19 รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมบนโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} ที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาการกระจายกระแสที่ได้จากการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมแบบต่าง ๆ ในรูปที่ 4.19 พบว่า กระแสมีลักษณะการกระจายสม่ำเสมอทั่วแผ่นตัวนำของทั้งสายอากาศไมโครสตริปและระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม ซึ่งแตกต่างจากการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปแบบดั้งเดิมและ suspended layer ที่หนาแน่นเฉพาะบริเวณแผ่นตัวนำของสายอากาศ จากอัตราส่วนแกนทำให้รู้สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมก็ยังคงมีโพลาริซวงกลม ส่วนทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมเมื่อพิจารณาจากรูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศจากมุมมองด้านหลังของสายอากาศในรูปที่ 4.20 พบว่า ทิศทางการหมุนของโพลาริซวงกลมของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม ยังคงหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนขวา ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นจุดป้อนทั้งสี่ด้วยการจัดเฟส 0° 90° 180° 270° ถ้าต้องการสลับชนิดการโพลาริซวงกลมของสายอากาศจากหมุนขวาให้เป็นหมุนซ้าย ก็สามารถทำได้โดยการกลับเฟสที่นำมากระตุ้นจุดป้อนทั้งสี่ 0° 90° 180° 270° เป็น 0° 270° 180° 90° เหมือนกับการกระตุ้นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมแบบดั้งเดิมตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2



รูปที่ 4.20 รูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมบนโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม model-C เมื่อกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} ที่ความถี่ 2.45 GHz

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการประยุกต์ใช้โครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมเมื่อใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz สรุปไว้ในตารางที่ 4.5 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การประยุกต์ใช้โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมสามารถช่วยทำให้คุณสมบัติของสายอากาศดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเฉพาะช่วงกว้างความถี่และอัตราขยาย รวมถึงประสิทธิภาพรวมของสายอากาศที่มีค่าดีขึ้นมาก เมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบดั้งเดิมและ suspended layer และยังมีขนาดรวมของสายอากาศที่กะทัดรัดกว่าสายอากาศที่มีโครงสร้าง suspended layer โดยที่ขนาดของแผ่นตัวนำของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่ประยุกต์ใช้โครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมมีขนาดใกล้เคียงกับสายอากาศที่มีโครงสร้างแบบดั้งเดิมและเล็กกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้าง suspended layer เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมด้วยกัน พบว่า สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ model-S มีขนาดรวมของสายอากาศเล็กที่สุดและอัตราขยายของสายอากาศมีต่ำที่สุด ในขณะที่ model-C จะให้อัตราขยายของสายอากาศมากที่สุด ส่วนสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ model-O นั้นมีช่วงกว้างความถี่มากที่สุดและมีสมรรถนะใกล้เคียงกับ model-C มีขนาดรวมของสายอากาศเล็กกว่า เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่า เนื่องจากมีขนาดกะทัดรัดและให้คุณสมบัติและสมรรถนะของสายอากาศโพลาริซวงกลมที่สูง ดังนั้นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ model-O จะถูกเลือกเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบสำหรับการยืนยันผลการจำลองในบทต่อไป

ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz

คุณสมบัติ	model-S	model-C	model-O	โครงสร้าง suspended layer	แบบ ดั้งเดิม
เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่น ตัวนำ (มิลลิเมตร)	33.43 (0.273λ)	34.90 (0.285λ)	33.67 (0.275λ)	55.84 (0.456λ)	35.14 (0.287λ)
มิติสายอากาศที่มีขนาด มากที่สุด (มิลลิเมตร)	65.10	92.50	79.71	125.63	52.71
ช่วงกว้างความถี่ (%)	27.80	26.65	36.65	10.41	8.61
ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (dBi)	7.563	8.839	8.163	9.488	6.141
ประสิทธิภาพรวม (dB)	-1.347	-0.942	-1.075	-3.297	-5.407
อัตราขยาย (dBic)	6.216	7.897	7.087	6.191	0.734
ความกว้างลำคลื่นที่กำลัง ลดลงครึ่งหนึ่ง (องศา)	79.8	61.8	72.2	63.4	95.5
ความกว้างลำคลื่น อัตราส่วนแกน (องศา)	>180	116	176	120	176
ชนิดโพลาริซวงกลม	เลือกได้จะให้หมุนขวาหรือหมุนซ้าย				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สรุป

บทที่ 4 ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อน โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กที่มีแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม และแปดเหลี่ยมได้ถูกออกแบบและนำไปประยุกต์กับสายอากาศไมโครสตริปวงกลมเพื่อเพิ่มสมรรถนะของสายอากาศให้ดีขึ้น

ในการออกแบบตัวนำแม่เหล็กเทียม พบว่า ตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีวัสดุฐานรองหนาจะให้ช่วงกว้างความถี่เฟสการสะท้อนมากกว่าตัวแม่เหล็กเทียมที่มีวัสดุฐานรองบาง และความกว้างของแผ่นตัวนำมีขนาดลดลงเมื่อวัสดุฐานรองมีความหนาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความกว้างของขอบตัวนำแม่เหล็กเทียมเพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดของแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยใหญ่ขึ้นไป และมีแนวโน้มลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่ง เช่นกันเกี่ยวกับกรณีของการศึกษาผลกระทบของช่องว่างอากาศระหว่างสายอากาศไมโครสตริปวงกลมกับตัวนำแม่เหล็กเทียมที่ขนาดของแผ่นตัวนำเซลล์หนึ่งหน่วยมีขนาดใหญ่และลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งเมื่อช่องว่างอากาศเพิ่มมากขึ้น

จากนั้นโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมจึงใช้เซลล์หนึ่งหน่วย 3×3 เซลล์ถูกมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปวงกลม ผลจากการจำลองทำให้เห็นว่า โครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมสามารถช่วยให้สมรรถนะของสายอากาศสูงขึ้น โดยเฉพาะช่วงกว้างความถี่และอัตราขยาย และมีขนาดกะทัดรัดเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบดั้งเดิมและ suspended layer เมื่อการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมด้วยกัน พบว่า สายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ model-S มีขนาดรวมของสายอากาศเล็กที่สุดและอัตราขยายของสายอากาศมีต่ำที่สุด ในขณะที่ model-C จะให้อัตราขยายของสายอากาศมากที่สุด ส่วนสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ model-O นั้นมีช่วงกว้างความถี่มากที่สุดและมีสมรรถนะใกล้เคียงกับ model-C มีขนาดรวมของสายอากาศเล็กกว่า เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่า เนื่องจากมีขนาดกะทัดรัดและให้คุณสมบัติและสมรรถนะของสายอากาศโพลาไรซ์วงกลมที่สูง ดังนั้นสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ model-O จะถูกเลือกเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบสำหรับการยืนยันผลการจำลองในบทต่อไป

บทที่ 5

การสร้างและการทดสอบ

ในบทนี้จะนำเสนอการสร้างสายอากาศต้นแบบ และการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่กระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนที่มีการประยุกต์ใช้โครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม โดยนำพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ได้จากการศึกษาและออกแบบ มาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ และนำไปทดสอบเพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองของสายอากาศที่ได้ทำการศึกษาจากบทที่ 4 คุณลักษณะของสายอากาศที่พิจารณา คือ ช่วงกว้างความถี่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยาย และอัตราส่วนแกน

5.1 สายอากาศต้นแบบ

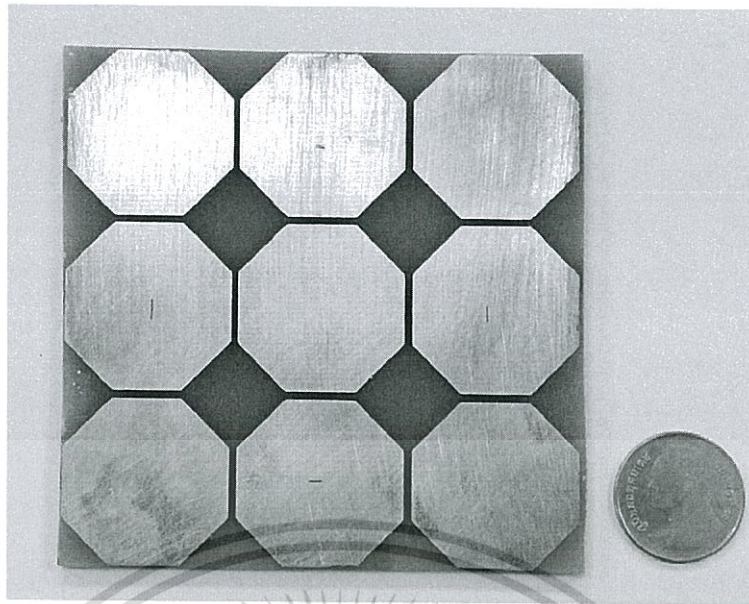
ในหัวข้อนี้ นำเสนอสายอากาศต้นแบบของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่กระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีแผ่นตัวนำเป็นรูปแปดเหลี่ยมหรือ model-O ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมต้นแบบ โดยที่ $d = 33.67$ มิลลิเมตร $D = 50.51$ มิลลิเมตร และ $h = 1.5$ มิลลิเมตร โดยกำหนดให้สายอากาศสามารถนำไปใช้งานที่ย่านความถี่ 2.45 GHz ซึ่งมีความยาวคลื่นเท่ากับ 122.45 มิลลิเมตร โดยเลือกใช้วัสดุฐานรองชนิด FR-4 ส่วนการกระตุ้นสายอากาศนั้นเป็นการกระตุ้นด้วยโหมด TM_{11} ซึ่งให้คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางเดียว สำหรับโหมด TM_{11} นั้นมุมระหว่างจุดป้อนที่อยู่ติดกันหรือ α มีค่าเท่ากับ 90° และด้วยเทคนิคการกระตุ้นสี่จุดป้อนนั้นช่วยให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาไรซ์วงกลม โดยมีการจัดเฟสให้แต่ละจุดป้อนเท่ากับ $0^\circ 90^\circ 180^\circ 270^\circ$ เพื่อให้ได้ทิศทางการหมุนของโพลาไรซ์หมุนตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนขวา ซึ่งแต่ละจุดป้อนมีระยะห่างจุดป้อนจากกึ่งกลางของแผ่นตัวนำเท่ากับ $0.45d$

สำหรับโครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม model-O ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วยเซลล์หนึ่งหน่วยจำนวน 3×3 เซลล์ ทำให้ระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมมีขนาดรวมเท่ากับ 79.71 มิลลิเมตร $\times 79.71$ มิลลิเมตร $\times 3$ มิลลิเมตร โดยที่มี $W_{gap} = 1.25$ มิลลิเมตร และวางสายอากาศไมโครสตริปวงกลมห่างจากระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์สายอากาศไมโครสตริปวงกลมต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ
เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำวงกลม (d)	0.275λ	33.67 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุฐานรอง (D)	0.413λ	50.51 mm
ความหนาวัสดุฐานรอง (h)	0.012λ	1.50 mm
ระยะห่างจุดป้อนจากกึ่งกลางของแผ่นตัวนำ (P)	0.124λ	15.15 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

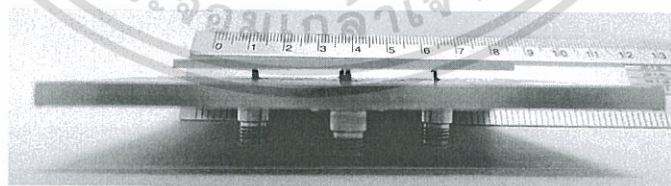


รูปที่ 5.1 ระบายตัวนำแม่เหล็กเทียมขนาด 3×3 เซลล์หนึ่งหน่วย
ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ



(ก) มุมมองด้านบน

(ข) มุมมองด้านล่าง



(ค) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 5.2 สายอากาศต้นแบบ

ในรูปที่ 5.2 แสดงภาพถ่ายของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อน เหนือระบายตัวนำแม่เหล็กเทียมต้นแบบ สายอากาศถูกกระตุ้นด้วยวิธีโพรบโคแอกเซียลโดยใช้คอนเนคเตอร์แบบ SMA จำนวน 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

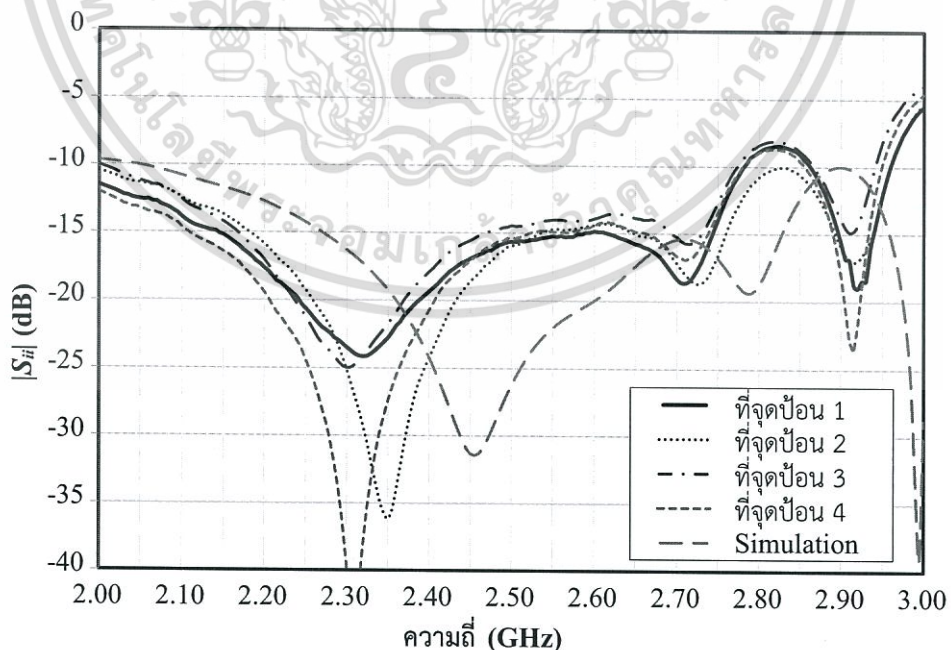
5.2 ผลการทดสอบ

ลำดับถัดไปจะนำสายอากาศต้นแบบไปทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งได้แก่ ช่วงกว้างความถี่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยาย และอัตราส่วนแกน เพื่อเป็นการยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีโครงสร้างแบบ model-O โดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การวัด

สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดสอบสายอากาศต้นแบบมีดังต่อไปนี้

- เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) รุ่น HP-8720C
- สายนำสัญญาณอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม
- สายอากาศไดโพลมาตรฐาน

ในการหาช่วงกว้างความถี่นั้นสามารถพิจารณาได้จากคุณลักษณะของ $|S_{11}|$ สำหรับการทดสอบหาค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบ สามารถทำได้โดยนำสายอากาศต้นแบบต่อเข้ากับสายนำสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยก่อนที่จะทำการทดสอบนั้น จะต้องทำปรับเทียบให้กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายก่อน คุณลักษณะของ $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมต้นแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 พบว่าค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบแต่ละจุดป้อนมีแนวโน้มของเส้นกราฟที่เหมือนกับผลที่ได้จากการจำลอง เมื่อพิจารณาที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz พบว่า ค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบแต่ละจุดป้อนมีค่าต่ำกว่า -10 dB คลอบคลุมย่านความถี่ของการประยุกต์ใช้ที่พิจารณาและมีช่วงกว้างความถี่ใกล้เคียงค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการจำลอง แม้ว่าความถี่กลางของช่วงกว้างความถี่เลื่อนลงไปประมาณที่ 2.3 GHz น่าจะเป็นเพราะว่าจุดป้อนแต่ละจุดของสายอากาศต้นแบบนั้นมีลักษณะที่ไม่เหมือนกันทั้งหมด รวมถึงผลของคอนเนคเตอร์และสายโคแอกเซียลที่ไม่ได้ทำการจำลองไปด้วย



รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบ

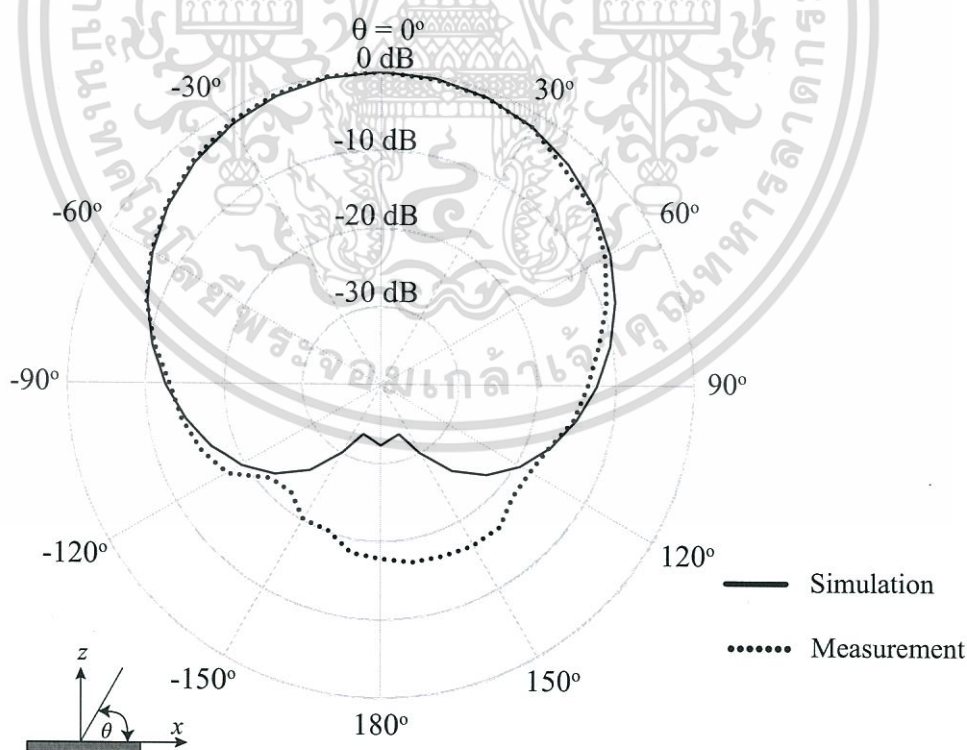
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจะทำการทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ทดสอบได้จะเป็นของสายอากาศรับ และใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานเป็นสายอากาศส่ง เนื่องจากสายอากาศไดโพลมาตรฐานมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและโพลาริซเซชันเชิงเส้น จึงเหมาะสมกว่าที่จะใช้เป็นสายอากาศคู่เหมือนในการทดสอบเนื่องจากยังไม่ทราบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและโพลาริซเซชัน และการติดตั้งสายอากาศส่งและรับสำหรับทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นต้องวางให้ห่างที่ระยะของสนามระยะไกล (R) สามารถคำนวณได้จาก

$$R \geq \frac{2(D^2)}{\lambda} \quad (5.1)$$

เมื่อ D คือ มิติของสายอากาศที่ยาวที่สุด (เมตร)

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมต้นแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 พบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากทดสอบเป็นแบบทิศทางเดียว โดยที่ลำคลื่นหลักมีความสอดคล้องดีกับผลที่ได้จากการจำลอง แต่จะพบความไม่สมมาตรและมีความผิดเพี้ยนในลำคลื่นด้านหลัง ซึ่งเป็นเพราะว่ามีคอนเนคเตอร์แบบ SMA และสายโคแอกเซียลอยู่ข้างหลังของสายอากาศรวมถึงตัวแบ่งกำลัง (Power divider) ซึ่งติดตั้งอยู่ทางด้านหลังของสายอากาศในขณะทำการทดสอบ อาจจะมีคลื่นบางส่วนแพร่กระจายออกในทางด้านหลัง



รูปที่ 5.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ จะใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานมาเป็นสายอากาศส่ง โดยสายอากาศไดโพลมาตรฐานนี้มีอัตราขยายเท่ากับ 2 dBi และใช้สายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศรับ เพื่อทดสอบหาอัตราขยาย ซึ่งอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบสามารถคำนวณได้จาก

$$(G_{0t})_{dB} + (G_{0r})_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \quad (5.2)$$

เมื่อ $(G_{0t})_{dB}$ คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง (dBi)

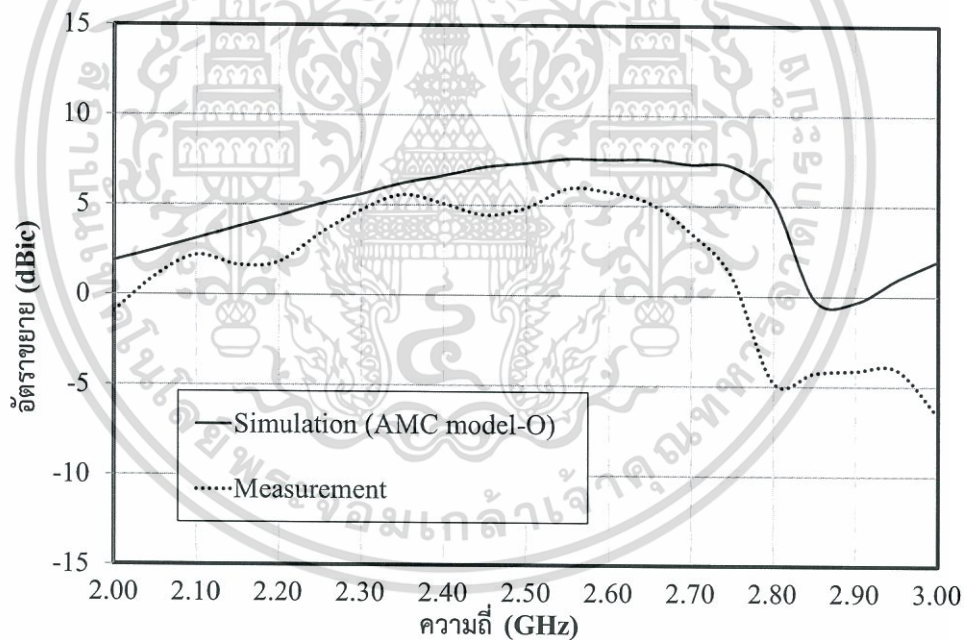
$(G_{0r})_{dB}$ คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ (dBi)

R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ (เมตร)

λ คือ ความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน

P_t คือ กำลังของภาคส่ง (W)

P_r คือ กำลังของภาครับ (W)



รูปที่ 5.5 อัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมต้นแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 พบว่า อัตราขยายที่ได้จากการจำลองและการทดสอบนั้นมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันในช่วงความถี่ 2 ถึง 3 GHz โดยที่อัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 4.45 dBic และเมื่อพิจารณาในช่วงกว้างความถี่ 2.3 ถึง 2.6 GHz ซึ่งเป็นช่วงกว้างความถี่ที่นำมาใช้ประโยชน์ของตัวนำแม่เหล็กเทียม พบว่า ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 5.19 dBic ส่วนผลที่ได้จากการจำลองจะมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

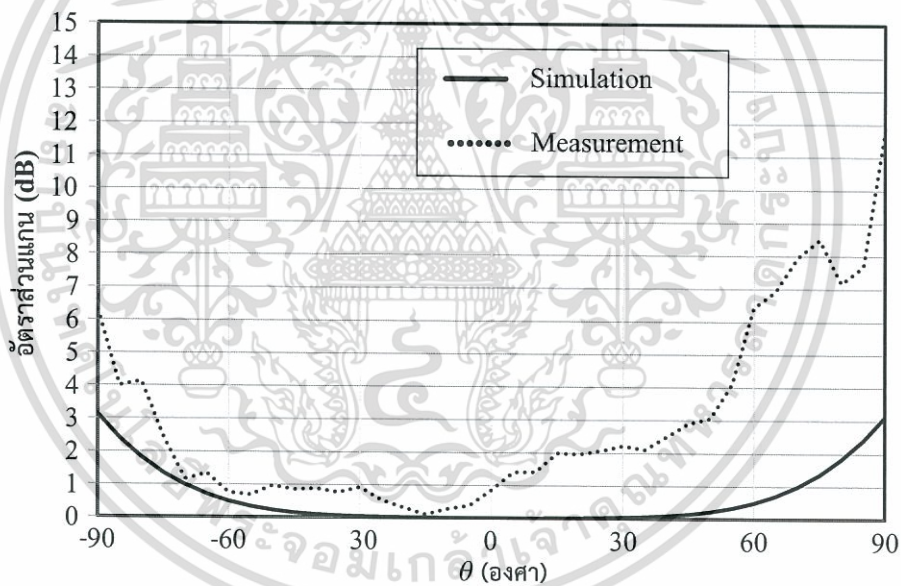
ค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสายอากาศเท่ากับ 6.87 dBic ความแตกต่างของผลการทดสอบกับจำลองนั้น น่าจะเกิดจากความผิดพลาดในการสร้างสายอากาศต้นแบบรวมถึงสภาวะแวดล้อมในการทดสอบ และมีช่วงกว้างความถี่ยอมรับได้ อัตราขยายสูงนี้เกิดจากการประยุกต์ใช้โครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีค่าอิมพีแดนซ์พื้นผิวสูงส่งผลให้คลื่นพื้นผิวถูกกำจัดไป

ในการทดสอบอัตราส่วนแกนจะใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานมาเป็นสายอากาศส่ง ซึ่งไดโพลมาตรฐานนั้นจะมีโพลาไรซ์เชิงเส้นทิศทางเดียว โดยจะทำการทดสอบในกรณีที่สายอากาศไดโพลวางตัวในแนวตั้งและแนวนอนตาม สำหรับรับส่งสัญญาณที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอนตามลำดับ เพื่อนำไปคำนวณอัตราส่วนแกนจากสมการที่ 5.3

$$\text{Axial Ratio (dB)} = 20 \log \left[\frac{|E_{ver}| + |E_{hor}|}{|E_{ver}| - |E_{hor}|} \right] \quad (5.3)$$

โดยที่ $|E_{ver}|$ คือขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์แนวตั้ง

$|E_{hor}|$ คือขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์แนวนอน

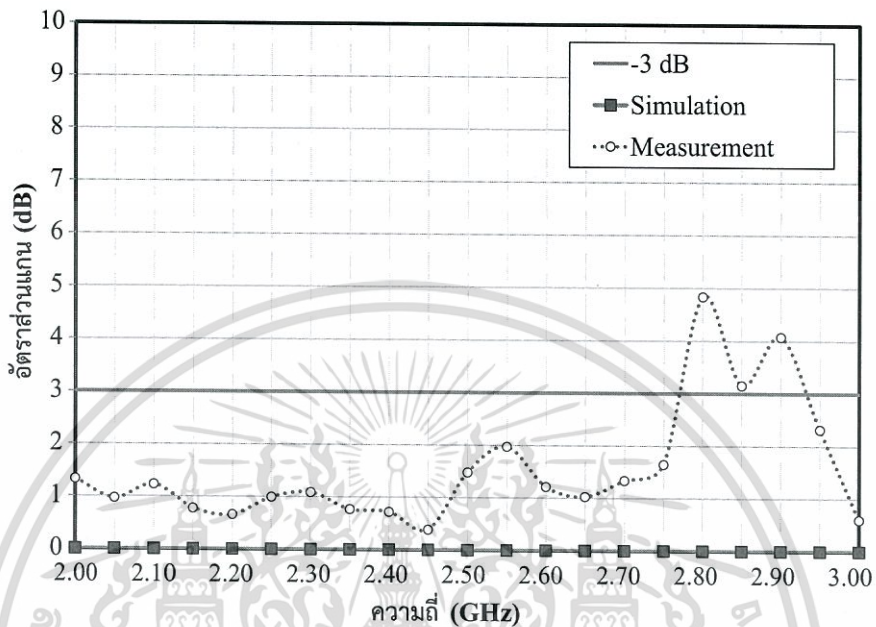


รูปที่ 5.6 อัตราส่วนแกนของในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศต้นแบบ

สำหรับรูปที่ 5.6 จะแสดงอัตราส่วนแกนของในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมต้นแบบ พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองยืนยันว่าสายอากาศต้นแบบมีโพลาไรซ์วงกลม แม้ว่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาไรซ์วงกลมที่ได้จากการทดสอบจะน้อยกว่าและมีความไม่สมมาตร ซึ่งเป็นผลมาจากมีคอนเนคเตอร์แบบ SMA และสายโคแอกเซียลอยู่ข้างหลังของสายอากาศในขณะทำการทดสอบซึ่งอาจจะทำให้เฟสของสัญญาณที่รับได้มีความคลาดเคลื่อนไป นอกจากนี้อัตราส่วนแกนในรูปที่ 5.7 ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่นั้นพบว่า ส่วนใหญ่อัตราส่วนแกนมีค่าน้อยกว่า 3 dB ในย่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ 2-3 GHz โดยเฉพาะในช่วงกว้างความถี่ 2.3 ถึง 2.6 GHz ซึ่งเป็นช่วงกว้างความถี่ที่นำมาใช้ประโยชน์ของตัวนำแม่เหล็กเทียม แต่มีขีดเพี้ยนตรงที่ความถี่สูงซึ่งเป็นช่วงกว้างความถี่ที่อยู่นอกจากช่วงกว้างความถี่ที่นำมาใช้ประโยชน์ของตัวนำแม่เหล็กเทียมและสายอากาศที่ย่านความถี่ดังกล่าวจะมีอัตราขยายที่ต่ำส่งผลให้อัตราส่วนแอมป์ซึ่งคำนวณจากสัญญาณที่รับได้มีสมรรถนะต่ำไปด้วย



รูปที่ 5.7 อัตราส่วนแอมป์ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศต้นแบบ

5.3 สรุป

ในบทที่ 5 ได้กล่าวถึง สายอากาศต้นแบบและการทดสอบ โดยนำพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ได้จากการศึกษาและออกแบบ มาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบและนำไปทดสอบเพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองของสายอากาศที่ได้ทำการศึกษา คุณสมบัติของสายอากาศที่พิจารณาคือ ช่วงกว้างความถี่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยาย และอัตราส่วนแอมป์ จากผลการทดสอบพบว่า ค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงผลที่ได้จากการจำลอง แม้ว่าความถี่กลางจะเลื่อนไปแต่ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศต้นแบบยังครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้ งาน ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากทดสอบนั้นมีใกล้เคียงกับผลที่ได้จากจำลองเฉพาะในส่วนลำคลื่นหลัก ในขณะที่อัตราขยายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 4.45 dBic และมีช่วงกว้างความถี่ที่ยอมรับได้ โดยมีค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 5.19 dBic ส่วนผลที่ได้จากจำลองจะมีค่าเฉลี่ยของอัตราขยายสายอากาศเท่ากับ 6.87 dBic ตลอดช่วงกว้างความถี่ 2.3 ถึง 2.6 GHz ซึ่งเป็นช่วงกว้างความถี่ที่นำมาใช้ประโยชน์ของตัวนำแม่เหล็กเทียม และผลจากทดสอบยืนยันได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมนั้นมีโพลาไรซ์วงกลมแม้ว่าความถี่ลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาไรซ์วงกลมที่ได้จากทดสอบจะน้อยกว่าและมีความไม่สมมาตรซึ่งเป็นผลมาจากมีคอนเนคเตอร์แบบ SMA และสายโคแอกเซียลอยู่ข้างหลังของสายอากาศในขณะที่ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียม โดยมีจุดประสงค์เพื่อแสดงการออกแบบสายอากาศโพลาริซวงกลมที่เหมาะสมกับการใช้งานในย่านความถี่ที่สนใจและมีขนาดเล็กกะทัดรัดเหมาะสมกับการนำไปติดตั้งใช้งาน ซึ่งสามารถทำได้โดยการกำหนดขนาดของแผ่นตัวนำวงกลมให้สอดคล้องกับความถี่ที่สนใจและนำเทคนิคโครงสร้างแบบ suspended layer มาใช้ร่วมกับโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมเพื่อเป็นการเพิ่มสมรรถนะให้กับสายอากาศโดยที่ไม่ทำให้สายอากาศมีขนาดที่ใหญ่จนเกินไป

ในบทที่ 6 จะถูกแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อหลัก โดยในหัวข้อแรกจะกล่าวถึงวิธีการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมและแสดงผลที่ได้จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองและการทดสอบ ส่วนหัวข้อที่สองนั้นจะกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนางานวิจัยที่ถูกนำเสนอในขั้นต่อไป

6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ซึ่งจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการสร้างสายอากาศที่มีโพลาริซแบบวงกลม การใช้โครงสร้างพื้นผิวตัวสะท้อนรูปแบบต่าง ๆ เพื่อเพิ่มสมรรถนะให้กับสายอากาศ ขั้นตอนในการออกแบบและจำลองคุณลักษณะสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างสายอากาศต้นแบบ และการนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองเพื่อยืนยันคุณลักษณะของสายอากาศว่าเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

การออกแบบสายอากาศเริ่มจากการนำสายอากาศไมโครสตริปวงกลมมาใช้เป็นโครงสร้างตั้งต้นเนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีความสมมาตร มีขนาดที่กะทัดรัด ง่ายต่อการสร้าง และราคาถูก เลือกใช้วิธีการกระตุ้นสายอากาศโดยใช้โพรบโคแอกเซียลเนื่องจากไม่ก่อให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นรบกวนจากคลื่นพื้นผิว ตามด้วยการนำเสนอเทคนิคการกระตุ้นหลายจุดป้อนเพื่อปรับปรุงโพลาริซของสายอากาศให้มีลักษณะเป็นโพลาริซวงกลม โดยเลือกใช้สัญญาณกระตุ้นโหมดพื้นฐาน (TM_{11}) เพื่อให้สายอากาศไมโครสตริปมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว

เมื่อศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมจะพบว่า ความหนาของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกส่งผลกระทบต่อความหนาความถี่เรโซแนนซ์ ช่วงกว้างความถี่ และประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ โดยถึงแม้ว่าการเพิ่มความหนาของวัสดุฐานรองนั้นจะเป็นการพัฒนาคุณสมบัติและสมรรถนะให้กับสายอากาศ แต่ความหนาที่เพิ่มขึ้นของสายอากาศจะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดความยุ่งยากต่อขั้นตอนการผลิตและการนำไปใช้งาน ขนาดของวัสดุฐานรองและแผ่นระนาบกราวด์ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยระนาบกราวและวัสดุฐานรองของสายอากาศนั้นจะต้องมีขนาดที่ไม่เล็กจนเกินไป ตำแหน่งของจุดบ่อนที่เหมาะสมนั้นควรจะอยู่บริเวณใกล้ขอบของแผ่นตัวนำวงกลมเพื่อให้มีคุณลักษณะทางการแพร่กระจายคลื่นที่ดี และมีช่วงกว้างความถี่ที่กว้างขึ้น โดยถึงแม้ว่าเทคนิคการกระตุ้นด้วยสี่จุดบ่อนจะช่วยให้สายอากาศไมโครสตริปมีโพลาริซวงกลมที่มีสมรรถนะสูงและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดี แต่ประสิทธิภาพรวมที่ต่ำของสายอากาศส่งผลให้อัตราขยายของสายอากาศนั้นมีค่าต่ำลงไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับแต่งสายอากาศให้มีประสิทธิภาพรวมที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีสมรรถนะสูงที่สุด

การใช้โครงสร้างแบบ suspended layer มาช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีกระตุ้นด้วยสี่จุดบ่อนนั้นทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและประสิทธิภาพรวมของสายอากาศนั้นมีแนวโน้มที่ดีขึ้นกว่าเดิม โดยค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้าง suspended layer ที่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศมีอยู่สองชนิดได้แก่ ความสูงของ suspended layer ซึ่งส่งผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ ช่วงกว้างความถี่ รวมไปถึงประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ และขนาดของแผ่นระนาบกราวด์ซึ่งส่งผลกระทบต่อช่วงกว้างความถี่และความกว้างลำคลื่นที่เป็นโพลาริซวงกลม อย่างไรก็ตามการเพิ่มโครงสร้าง suspended layer ทำให้สายอากาศมีขนาดโดยรวมที่ใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ความกว้างลำคลื่นที่เป็นโพลาริซวงกลมของสายอากาศมีค่าลดลงถึงแม้ว่าจะยังครอบคลุมความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งตลอดย่านความถี่ที่พิจารณาก็ตาม

เทคนิคการใช้โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมถูกนำเสนอเพื่อเป็นการลดขนาดของสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีกระตุ้นด้วยสี่จุดบ่อนที่ใหญ่ขึ้นจากการใช้โครงสร้างแบบ suspended layer โดยนำโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม และแปดเหลี่ยมมาประยุกต์ใช้ร่วมกับสายอากาศไมโครสตริป

จากการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวนำแม่เหล็กเทียมพบว่า ความหนาของตัวนำแม่เหล็กเทียมส่งผลกระทบต่อช่วงกว้างความถี่เฟสการสะท้อนโดยความหนาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ช่วงกว้างความถี่เฟสการสะท้อนมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามความหนาของตัวนำแม่เหล็กเทียมที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้ขนาดของเซลล์หนึ่งหน่วยใหญ่ขึ้นตามไปด้วย

ด้วยเหตุนี้จึงได้เลือกโครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมขนาด 3×3 เซลล์มาประยุกต์ใช้แทนแผ่นระนาบกราวด์ในโครงสร้างแบบ suspended layer ซึ่งจากผลการจำลอง พบว่า โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมนั้นส่งผลกระทบต่อช่วงกว้างความถี่ อัตราขยาย และขนาดของสายอากาศ โดยเลือกใช้โครงสร้างตัวนำแม่เหล็กเทียมที่มีแผ่นตัวนำของเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปแปดเหลี่ยมเนื่องจากทำให้สายอากาศมีช่วงกว้างความถี่ที่มากที่สุดและมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ดีเทียบเคียงได้กับโครงสร้างของเซลล์หนึ่งหน่วยที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและวงกลม

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์สายอากาศไมโครสตริปวงกลมต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ
เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นตัวนำวงกลม (d)	0.275λ	33.67 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุฐานรอง (D)	0.413λ	50.51 mm
ความหนาวัสดุฐานรอง (h)	0.012λ	1.50 mm
ระยะห่างจุดป้อนจากกึ่งกลางของแผ่นตัวนำ (P)	0.124λ	15.15 mm

จากนั้นได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบ และนำไปการทดสอบเพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองของสายอากาศที่ได้ทำการศึกษา โดยที่พารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบแสดงไว้ในตารางที่ 6.1 ในการสร้างสายอากาศต้นแบบได้เลือกใช้วัสดุฐานรองชนิด FR-4 กระตุ้นสายอากาศด้วยโหมด TM_{11} และมีการจัดเฟสเท่ากับ 0° 90° 180° 270° เพื่อให้ได้ทิศทางการหมุนของโพลาไรซ์หมุนตามเข็มนาฬิกาหรือหมุนขวา ขณะที่โครงสร้างระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมเซลล์หนึ่งหน่วยรูปแปดเหลี่ยมจำนวน 3×3 เซลล์ ทำให้ระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมมีขนาดรวมเท่ากับ 79.71 มิลลิเมตร \times 79.71 มิลลิเมตร \times 3 มิลลิเมตร โดยมี $W_{gap} = 1.25$ มิลลิเมตร และวางสายอากาศไมโครสตริปวงกลมห่างจากระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร

คุณลักษณะของสายอากาศที่พิจารณาคือ ช่วงกว้างความถี่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตรายาย และอัตราส่วนแกน จากผลการทดสอบพบว่า ค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มใกล้เคียงผลที่ได้จากการจำลอง แม้ว่าความถี่กลางจะเลื่อนไป แต่ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศต้นแบบยังครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งาน ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากทดสอบนั้นมีใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองเฉพาะในส่วนลำคลื่นหลัก ในขณะที่อัตรายายของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 4.45 dBic และมีช่วงกว้างความถี่ที่ยอมรับได้ โดยมีค่าเฉลี่ยของอัตรายายสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 5.19 dBic ส่วนผลที่ได้จากจำลองจะมีค่าเฉลี่ยของอัตรายายสายอากาศเท่ากับ 6.87 dBic ตลอดช่วงกว้างความถี่ 2.3 ถึง 2.6 GHz ซึ่งเป็นช่วงกว้างความถี่ที่นำมาใช้ประโยชน์ของตัวนำแม่เหล็กเทียม และผลจากการทดสอบยืนยันได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปวงกลมที่มีการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนบนระนาบตัวนำแม่เหล็กเทียมนั้นมีโพลาไรซ์วงกลมแม้ว่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศที่เป็นโพลาไรซ์วงกลมที่ได้จากทดสอบจะน้อยกว่าและมีความไม่สมมาตรซึ่งเป็นผลมาจากมีคอนเนคเตอร์แบบ SMA และสายโคแอกเซียลอยู่ข้างหลังของสายอากาศ ในขณะที่ทำการทดสอบ

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

เนื่องจากสายอากาศที่ถูกนำเสนอใช้เทคนิคการกระตุ้นด้วยสี่จุดป้อนเพื่อทำให้เกิดโพลาริซวงกลม ดังนั้นการนำสายอากาศชนิดนี้ไปใช้งานจริงจำเป็นต้องอาศัยวงจรเลื่อนเฟสเพื่อป้อนสัญญาณที่มีความต่างเฟสในแต่ละจุดป้อนให้กับสายอากาศ แต่เนื่องจากสายอากาศที่ถูกนำเสนอในนั้นสามารถใช้งานในย่านความถี่ที่กว้างจึงทำให้วงจรเลื่อนเฟสที่จะถูกนำมาใช้ร่วมกับสายอากาศชนิดนี้ จำเป็นจะต้องมีเฟสการเลื่อนที่คงที่ตลอดย่านความถี่ใช้งานด้วย ดังนั้นการออกแบบวงจรเลื่อนเฟสที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศที่ถูกนำเสนอจึงเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่จะสามารถพัฒนาต่อไปได้ในอนาคต นอกจากนี้การปรับปรุงตัวนำแม่เหล็กเทียมให้มีช่วงกว้างความถี่ที่นำมาใช้ประโยชน์ที่กว้างมากขึ้นก็เป็นอีกหนึ่งแนวทางในการพัฒนาผลงานการวิจัยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต่อไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Huang, "Circularly polarized conical patterns from circular microstrip antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 32, no. 9, pp. 991–994, 1984.
- [2] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "A low profile single dipole antenna radiating circularly polarized waves," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 9, pp. 3083–3086, 2005.
- [3] D. Qu, L. Shafai, and A. Foroozesh, "Improving microstrip patch antenna performance using EBG substrates," *IEE Proceedings: Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 153, no. 6, pp. 558–563, 2006.
- [4] T. Nakamura and T. Fukusako, "Broadband design of circularly polarized microstrip patch antenna using artificial ground structure with rectangular unit cells," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 6, pp. 2103–2110, 2011.
- [5] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolus, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, pp. 2059–74, 1999.
- [6] CST MICROWAVE STUDIO, [Online]. Available: <http://www.cst.com>.
- [7] R. Bancroft, *Microstrip and Printed Antenna Design*, Noble Publishing, 2004.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 2005.
- [9] L. C. Shen, S. A. Long, M. R. Allerding, and M. D. Walton, "Resonant Frequency of a Circular Disc, Printed-Circuit Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-25, No. 4, pp. 595–596, July 1977.
- [10] A. G. Demeryd, "Analysis of the Microstrip Disk Antenna Element," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-27, No. 5, pp. 660–664, September 1979.
- [11] S. A. Long and M. D. Walton, "A Dual-Frequency Stacked Circular-Disc Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-27, No. 2, pp. 270–273, March 1979.
- [12] S. B. De Assis Fonseca and A. J. Giarola, "Microstrip Disk Antennas, Part I: Efficiency of Space Wave Launching," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-32, No. 6, pp. 561–567, June 1984.
- [13] S. B. De Assis Fonseca and A. J. Giarola, "Microstrip Disk Antennas, Part II: the Problem of Surface Wave Radiation by Dielectric Truncation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-32, No. 6, pp. 568–573, June 1984.
- [14] J. T. Aberle and F. Zavosh, "Analysis of Probe-Fed Circular Microstrip Patches Backed by Circular Cavities," *Electromagnetics*, Vol. 14, pp. 239–258, 1994.
- [15] F. Zavosh and J. T. Aberle, "Infinite Phased Arrays of Cavity-Backed Patches," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-42, No. 3, pp. 390–398, March 1994.

- [16] J. Dahele and K. Lee, "Effect of substrate thickness on the performance of a circular-disk microstrip antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 31, no. 2, pp. 358–360, 1983
- [17] A. Bhattacharyya and R. Garg, "Effect of substrate on the efficiency of an arbitrarily shaped microstrip patch antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 34, no. 10, pp. 1181–1188, 1986.
- [18] J. R. James and P. S. Hall, *Handbook of Microstrip Antennas Volume 2*, England: Peter Peregrinus Ltd., 1988.
- [19] M. Daginnus, R. Kronberger and A. Stephan, "Ground plane effects on the performance of SDARS antennas," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp.748 - 751 vol.4, 2002.
- [20] A. K. Bhattacharyya, "Effects of finite ground plane on the radiation characteristics of a circular patch antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 38, no.2, pp. 152-159, Feb 1990.
- [21] A.Kishk and L. Shafai, "The effect of various parameters of circular microstrip antennas on their radiation efficiency and the mode excitation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 34, no.8, pp. 969 - 976, Aug 1986.
- [22] V. Losada, R. R. Boix and M. Horno, "Resonant modes of circular microstrip patches in multilayered substrates," *IEEE Trans. Micro-wave Theory and Techniques*, vol. 47, no.4, pp. 488 - 498, Apr 1999.
- [23] Y. T. Lo and W. F. Richards, "Perturbation approach to design circularly polarized microstrip antenna," *Electronics Letters*, vol.17, pp. 383-385, 1981.
- [24] M. Haneishi and S. Yoshida, "A design method of circularly polarized rectangular microstrip antenna by one-point feed," *Electronics and Commum. In Japan*, vol. 64-B, pp. 46-54, 1981.
- [25] P. S. Hall, "Dual polarisation antenna arrays with sequentially rotated feeding," *IEE Proc*, vol. 139, pt H, no. 5, pp. 465-471, Oct.1992.
- [26] T. Chiba, Y. Suzuki, N. Miyano, S. Muira and S. Ohmori, "A phased array antenna using microstrip patch antennas," *12th European Microwave Conf.*, pp. 472-477, Sept. 1982.
- [27] Z.N. Chen and M. Y. W. Chia, "Broadband suspended plate antenna with probe-fed strip," *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings*, vol.148, no.1, pp.37-40, 2001
- [28] M. Secmen and A. Hizal, "A Dual-Polarized Wide-Band Patch Antenna for Indoor Mobile Communication Applications," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 100, pp. 189-200, 2010.

- [29] K. Boonying, T. Laohapensaeng, S. Kosulvit and C. Phongcharoenpanich, "A Flat Antenna for Polarization Diversity," *Joint International Information & Communication Technology Electronic and Electrical Engineering*, pp. 528-530, Dec 2010.
- [30] W. K. Toh and Z N. Chen, "On a Broadband Elevated Suspended-Plate Antenna with Consistent Gain," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol.50, no.2, pp.95-105, April 2008.
- [31] O. M. Haraz, A. Sebak, "Gain enhancement in ultra-wideband antennas backed by a suspended ground or covered with metamaterial superstrates," *25th IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE2012)*, pp.1-4, April 29 -May 2 2012 .
- [32] Z. N. Chen, M. Y. W. Chia and C. L. Lim, "A stacked suspended plate antenna," *Microwave and optical technology letters*, Vol.37, No. 5, June 2003.
- [33] Z. N. Chen, and M.Y.W. Chia, "Broad-band suspended probe-fed plate antenna with low cross-polarization levels," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.51, no.2, pp.345-347, Feb 2003.
- [34] Z. Chen and M.Y.W. Chia, "A novel center-slot-fed suspended plate antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.51, no.6, pp.1407-1410, June 2003
- [35] D. Guha and J. Y. Siddiqui, "Resonant frequency of circular microstrip antenna covered with dielectric superstrate," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no.7, pp. 1649 - 1652, Jul 2003.
- [36] T. Jayanthi, M. Sugadev, J. M. Ismaell and G. Jegan, "Design and simulation of microstrip M - patch antenna with double layer," *Proceedings of International Conference on Microwave 2008*, pp. 230 – 232, Nov 2008.
- [37] Y. Zhang, J. V. Hagen, M. Younis, C. Fischer, and W. Wiesbeck, "Planar artificial magnetic conductors and patch antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 10 I, pp. 2704–2712, 2003.
- [38] A. P. Feresidis, G. Goussetis, S. Wang, and J. C. Vardaxoglou, "Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 1 I, pp. 209–215, 2005.
- [39] J. R. Sohn, K. Y. Kim, and H. S. Tae, "Comparative study on various artificial magnetic conductors for low-profile antenna," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 61, pp. 27–37, 2006.
- [40] M. E. de Cos, Y. Alvarez, and F. Las-Heras, "A novel approach for RCS reduction using a combination of artificial magnetic conductors," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 107, pp. 147–159, 2010.

- [41] A. Foroozesh and L. Shafai, "Investigation into the application of artificial magnetic conductors to bandwidth broadening, gain enhancement and beamshaping of lowprofile and conventional monopole antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 1, pp. 4–20, 2011.
- [42] Y. Kim, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni, "Compact artificial magnetic conductor designs using planar square spiral geometries," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 77, pp. 43–54, 2007.
- [43] D. N. Elsheakh, H. A. Elsadek, E. A. Abdallah, M. F. Iskander, and H. Elhenawy, "Ultrawide bandwidth umbrella-shaped microstrip monopole antenna using spiral artificial magnetic conductor (SAMC)," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1255–1258, 2009.
- [44] M. Hosseini and M. Hakkak, "Characteristics estimation for jerusalem cross-based artificial magnetic conductors," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 58–61, 2008.
- [45] J. Baracco, L. Salghetti - Drioli, and P. de Maagt, "AMC low profile wideband reference antenna for GPS and GALILEO systems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 8, pp. 2540–2547, 2008.
- [46] D. Kim and J. Yeo, "Low-profile RFID tag antenna using compact AMC substrate for metallic objects," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 718–720, 2008.
- [47] M. E. de Cos, F. L. Heras, and M. Franco, "Design of planar artificial magnetic conductor ground plane using frequencyselective surfaces for frequencies below 1GHz," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 951–954, 2009.
- [48] E. Y. Kim, J. H. Yoon, Y. J. Yoon, and C. G. Kim, "Low profile dual-band reflector antenna with dual resonant AMC," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI '11)*, pp. 1800–1803, usaSpokane, Wash, USA, July 2011.
- [49] J. Ahn, C. Son, K. Chang, and Y. Yoon, "The miniaturization and electrical performance improvement of base station array antenna with artificial magnetic conductor," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting (APSURSI)*, pp. 1–4, June 2009.

- [50] D. Sievenpiper, Z. Lijun, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , vol.47, no.11, pp.2059,2074, Nov 1999
- [51] R. C. Hadarig, M.E. de Cos, and F. Las-Heras, "Novel Miniaturized Artificial Magnetic Conductor," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.12, no., pp.174-177, 2013



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสัญญาชัย เอียดปราบ
วัน เดือน ปีเกิด	5 พฤษภาคม 2524 ที่จังหวัดปัตตานี
ที่อยู่	685 ถนนหลวงแพ่ง แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
ประวัติการศึกษา	2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยบูรพา
	2548 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Sanchai Eardprab, Chuwong Phongcharoenpanich, Danai Torrungrueng, Nuttawit Surittikul and Wlasimiro Villarroel “A Circular Microstrip Antenna Radiating Circularly Polarized Conical Beam for SDARS Applications” *The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009)*, Bangkok Thailand, pp. 771 - 774, 20 - 23 October 2009.
- [2] Sanchai Eardprab and Chuwong Phongcharoenpanich, “Modal Characteristics of a Circular Microstrip Antenna on Circular Ground Plane for SDARS Applications” *1st International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS 2011)*, Bangkok Thailand, pp. 297 - 300, 26 - 29 January 2012.
- [3] Sanchai Eardprab, Chuwong Phongcharoenpanich and Danai Torrungrueng, “Improvement of a Circular Microstrip Antenna Excited by Four Feeds and Suspended with Artificial Magnetic Conductors,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, Article ID 310686, 10 pages, 2013. doi:10.1155/2013/310686.