

สายอากาศสองย่านความถี่แบบแพตช์วงกลมคู่
บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

DUAL-BAND DOUBLE CIRCULAR PATCH ANTENNA
ON MULTILAYER SUBSTRATE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2565
KMITL-2022-EN-M-029-084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DUAL-BAND DOUBLE CIRCULAR PATCH ANTENNA
ON MULTILAYER SUBSTRATE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2022
KMITL-2022-EN-M-029-084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศสองย่านความถี่แบบแพตช์วงกลมคู่
นักศึกษา	บนวัสดุฐานรองหลายชั้น
รหัสประจำตัว	เน็ตลักษณ์ พันธุ์จิ้น
ปริญญา	60601209
สาขาวิชา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
พ.ศ.	วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	2565
	ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล
	ศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพานิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz และช่วงความถี่ 5.0-5.3 GHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นสายอากาศแพตช์ประกอบด้วย แผ่นแพร่กระจายคลื่นวงกลม จำนวน 2 แผ่น วางซ้อนกันอยู่ด้านบนและด้านล่างของวัสดุฐานรองหลายชั้น เชื่อมถึงกันด้วยเส้นลวดและมีการป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบ จากผลการออกแบบและทดสอบพบว่า สายอากาศที่นำเสนอมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50Ω และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz และช่วงความถี่ 5.0-5.3 GHz มีอัตราการขยายเท่ากับ 1.90 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และเท่ากับ 2.36 dBi ที่ความถี่ 5.2 GHz ทั้งนี้สายอากาศสามารถใช้งานกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสองช่วงความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Thesis Title	Dual-Band Double Circular Patch Antenna on Multilayer Substrate
Student	Netilak Phanchin
Student ID.	60601209
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2022
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Pichaya Supannakoon Prof.Dr.Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This thesis presents a dual-band antenna for a wireless local area network (WLAN) system with the frequency of 2.4-2.5 GHz and 5-6 GHz. The proposed antenna is a patch antenna consisting of two circular radiation plates. They are stacked above and below the multilayer substrate, connected by wire, and fed by the coaxial probe. From simulated and measured results, the proposed antenna has an input impedance close to 50Ω and $|S_{11}|$ below -10 dB in a frequency of 2.4-2.5 GHz and 5.0-5.3 GHz, the gain is 1.9 dBi at 2.45 GHz and 2.36 dBi at 5.2 GHz, respectively. The antenna can be effectively used in both frequency bands of wireless local area networks.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล ซึ่งเป็นผู้ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ ให้ความช่วยเหลือช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ศุภกิต แก้วดวงตา และผศ.ดร.กิตติมา เลิศศักดิ์วิมาน ผู้ให้คำแนะนำในการออกแบบ สายอากาศ และแนวทางในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการทุกท่าน พี่อานนท์ สกลคณาพงษ์ พี่คณศ พุกกะพันธ์ พี่ปิยะพงษ์ แดงขำ พี่วราภรณ์ ไชยหงษา และน้องพิสิษฐ์ จันแปงเงิน ที่ให้คำแนะนำต่างๆ ช่วยเหลือในการทดสอบสายอากาศ รวมถึงชี้แนะการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยสนับสนุนอยู่เบื้องหลัง และคอยเป็น กำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ ข้าพเจ้า

เนติลักษณ์ พันธุ์จิ้น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 การใช้งานความถี่ในช่วง 2.45 GHz และช่วง 5 GHz สำหรับประเทศไทย	1
1.2 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	3
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN)	6
2.1.1 ประวัติของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	6
2.1.2 องค์ประกอบของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย	7
2.1.3 ประเภทของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	8
2.1.4 การเชื่อมต่อของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	10
2.1.5 Roaming.....	12
2.1.6 การประยุกต์ใช้งานระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย	12
2.1.7 มาตรฐานการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11	13
2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและโพลาริซซ์	16
2.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	16
2.2.2 โพลาริซซ์.....	17
2.3 สายอากาศไมโครสตริป	20
2.3.1 ลักษณะเบื้องต้นของสายอากาศไมโครสตริป	21
2.3.2 หลักการป้อนสัญญาณ.....	23
2.3.3 วิธีการวิเคราะห์.....	25
2.3.4 แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 งานวิจัยที่มีมาก่อน.....	31
2.5 สรุป	33
บทที่ 3 สายอากาศแพทช์วงกลมคู่และวัสดุฐานรองหลายชั้น	35
3.1 การออกแบบสายอากาศแพทช์วงกลม.....	35
3.2 การป้อนสัญญาณไปยังแพทช์วงกลมด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป	36
3.3 สายอากาศแพทช์วงกลมป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจร	38
3.4 การออกแบบสายอากาศแพทช์วงกลมคู่.....	42
3.5 สายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น.....	44
3.6 สรุปผลการออกแบบสายอากาศ.....	47
บทที่ 4 การศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ของสายอากาศ	49
4.1 การออกแบบสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น.....	49
4.2 การศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ของสายอากาศ	49
4.2.1 การเพิ่มวัสดุฐานรองชั้นเดียว.....	50
4.2.2 รัศมีของแผ่นวงกลมด้านหน้า	50
4.2.3 รัศมีของแผ่นวงกลมด้านหลัง.....	52
4.2.4 ระยะของแผ่นวงกลมด้านหลัง.....	53
4.2.5 ความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	54
4.2.6 ระยะของแผ่นวงกลมด้านหน้า	55
4.2.7 ระยะห่างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	57
4.2.8 ความยาวของระนาบกราวด์.....	58
4.2.9 ระยะของจุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นวงกลม	59
4.2.10 ระยะของจุดป้อนสัญญาณ	59
4.2.11 ระยะของจุดลัดวงจร.....	60
4.2.12 ระยะห่างของวัสดุฐานรอง.....	62
4.3 สรุป	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดสอบและผลการทดสอบ	65
5.1 สายอากาศต้นแบบ	65
5.2 การทดสอบสายอากาศต้นแบบ	66
5.2.1 การทดสอบ $ S_{11} $	67
5.2.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	68
5.2.3 การทดสอบอัตราขยาย	70
5.3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศที่นำเสนอ	
กับสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีมาก่อน.....	72
5.4 สรุป	73
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	75
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	75
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	77
เอกสารอ้างอิง	78
ประวัติผู้เขียน.....	80

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การใช้งานคลื่นความถี่ และกำลังส่งออกอากาศสมมูลแบบไอโซทรอปิก.....	3
2.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีมาก่อน	33
3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบ	47
4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ	63
5.1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศที่นำเสนอ	
กับสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีมาก่อน	73
6.1 ตารางสรุปผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 เครื่องตรวจคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Resonance Imaging: MRI) ซึ่งเป็นการใช้งานความถี่ในช่วง 2.45 GHz.....	2
2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	16
2.2 แสดงพหุคลื่นของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบเชิงขั้วและแบบเส้นตรง	17
2.3 ประเภทโพลาไรซ์ของสายอากาศ	18
2.4 แกนหลักและแกนรองของโพลาไรซ์	19
2.5 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป	22
2.6 รูปทรงต่างๆ ของแผ่นไมโครสตริป	23
2.7 หลักการป้อนสัญญาณให้สายอากาศไมโครสตริป	24
2.8 วงจรสมมูลของการป้อนสัญญาณแต่ละชนิด	25
2.9 สายนำสัญญาณไมโครสตริปและเส้นสนามไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล	27
2.10 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลต่อความถี่สำหรับวัสดุฐานรองชนิดต่างๆ	27
2.11 ความยาวและความยาวประสิทธิผลของแผ่นไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	28
2.12 โครงสร้างของแผ่นไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	30
2.13 รูปแบบของสนาม (โหมด) สำหรับไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	31
3.1 สายอากาศแพตช์วงกลม	35
3.2 การป้อนสัญญาณไปยังแพตช์วงกลมด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป	37
3.3 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	
ของสายอากาศแพตช์วงกลม 2.75 GHz	38
3.4 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพตช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปวงกลม และรูปสามเหลี่ยม	
ที่มีการลัดวงจร	39
3.5 สายอากาศแพตช์วงกลมป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจร	41
3.6 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพตช์วงกลม.....	
ป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจร 3 GHz.....	41
3.7 สายอากาศแพตช์วงกลมคู่ป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจร	42
3.8 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่..	
ป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจร 2.45 GHz	
และ 5.5 GHz ตามลำดับ	43

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 โครงสร้างและส่วนประกอบของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น.....	44
3.10 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ	45
4.1 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ	50
4.2 ผลของรัศมีของแผ่นวงกลมด้านหน้า (r_1) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ	51
4.3 ผลของรัศมีของแผ่นวงกลมด้านหลัง (r_2) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ.....	52
4.4 ระยะของแผ่นวงกลมด้านหลัง (l_d) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ	53
4.5 ความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (w_1) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ.....	55
4.6 ระยะของแผ่นวงกลมด้านหน้า (l_1) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ.....	56
4.7 ระยะห่างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (l_2) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ.....	57
4.8 ความยาวของระนาบกราวด์ (l_3) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ.....	58
4.9 ระยะของจุดป้อนสัญญาณ (l_c) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ.....	60
4.10 ระยะของจุดลัดวงจร (l_7) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ	60
4.11 ผลการจำลองค่า $ S_{11} $ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ	62
5.1 ต้นแบบสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น	65
5.2 อุปกรณ์ในการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ.....	66
5.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความถี่	67
5.4 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz.....	68
5.5 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz.....	69
5.6 ผลการจำลองอัตราการขยายของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น	70
5.7 ผลการทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น	71

บทที่ 1

บทนำ

การสื่อสารแบบไร้สายเป็นรูปแบบการให้บริการในระบบโทรคมนาคมที่เป็นการถ่ายโอนข้อมูลโดยไม่ใช้สาย ซึ่งข้อมูลนั้นจะถูกถ่ายโอนได้ทั้งในระยะทางสั้นและระยะทางไกล ระบบการสื่อสารไร้สายใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีข้อบังคับในการใช้ความถี่ที่แตกต่างกันออกไปตามการประยุกต์และกลุ่มประเทศที่ใช้งาน เช่น ระบบโทรศัพท์มือถือ สัญญาณไมโครเวฟ อินฟราเรด ระบบสื่อสารดาวเทียม บลูทูธ เป็นต้น ระบบการสื่อสารไร้สายอาศัยสายอากาศเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนรูปแบบสลับกันไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในภาคส่งและภาครับของการถ่ายโอนข้อมูล ดังนั้น สายอากาศจึงกลายเป็นส่วนสำคัญของอุปกรณ์ทุกชนิดที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.1 การใช้งานความถี่ในช่วง 2.45 GHz และช่วง 5 GHz สำหรับประเทศไทย

การใช้งานในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz สำหรับประเทศไทยนั้น เป็นช่วงความถี่สากลที่มีไว้เพื่อใช้ในจุดประสงค์ทางด้านอุตสาหกรรม ด้านวิทยาศาสตร์ และด้านการแพทย์ เช่น การใช้ความร้อนจากคลื่นความถี่ (เตาอบไมโครเวฟ หรือเครื่องอบอุปกรณ์ทางการแพทย์) เครื่องตรวจคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ใช้ตรวจดูอวัยวะภายในโดยไม่มีการใส่ส่วนของอุปกรณ์ใดๆ เข้าไปในร่างกาย เป็นต้นสำหรับความถี่ในช่วงดังกล่าวนี้เป็นช่วงความถี่ที่ได้รับการยกเว้นใบอนุญาต ทำให้ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องขอใบอนุญาตก่อนการใช้งาน แต่จะทำให้เกิดการรบกวนกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบสื่อสารได้ ซึ่งในระบบสื่อสารไร้สายก็มีการใช้งานอย่างหลากหลายมากยิ่งขึ้น มีรูปแบบการใช้พลังงานที่ต่ำลง และมีรูปแบบที่ใช้สื่อสารในระยะทางสั้นๆ โดยการใช้งานในช่วงความถี่นี้นั้นยังคงไม่ต้องขอใบอนุญาต เช่น อุปกรณ์บลูทูธ (Bluetooth) การสื่อสารสนามระยะใกล้ (Near Field Communication: NFC) เทคโนโลยีไร้สาย (WiFi) การใช้คลื่นไมโครเวฟในทางการแพทย์สำหรับการฆ่าเชื้อ หรือการรักษาโดยใช้ความร้อน การรักษาอาการปวดเมื่อยของกล้ามเนื้อหรือข้อ การรักษา และทำลายเซลล์มะเร็งในร่างกาย รวมถึงการใช้เป็นแหล่งให้ความร้อนในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เป็นต้น สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union: ITU) ได้กำหนดการใช้งานความถี่ในช่วง 2.4-2.5 GHz ว่าสามารถใช้งานตามความถี่ที่แตกต่างกันในแต่ละเขตภูมิภาค (Region) ทั้ง 3 เขต ทำให้นโยบายการใช้งานความถี่ในช่วงดังกล่าวของแต่ละประเทศไม่เหมือนกัน ตัวอย่างการใช้งานความถี่ในช่วง 2.45 GHz แสดงดังรูปที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 เครื่องตรวจคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Resonance Imaging: MRI)
ซึ่งเป็นการใช้งานความถี่ในช่วง 2.45 GHz [20]

โดยการเปรียบเทียบในเรื่องระยะทางสำหรับการรับส่งสัญญาณนั้น ความถี่ 2.4 GHz รับส่งสัญญาณได้ไกลกว่าความถี่ 5 GHz มาก แต่ด้านความเร็วจะมีความล่าช้ากว่า ในทางกลับกันความถี่ 5 GHz สามารถทำความเร็วได้ดีกว่า

ในประเทศไทยอนุญาตให้ใช้ความถี่นี้ได้เมื่อปี พ.ศ. 2550 มาแล้ว แต่ยังไม่ค่อยมีอุปกรณ์ที่ใช้กับคลื่นความถี่นี้ได้ รวมถึงเรื่องราคาที่ยังสูงอยู่มาก และอุปกรณ์ที่ยังไม่รองรับ 5 GHz เท่าไรนัก โดยช่องสัญญาณความถี่ 5 GHz ของประเทศไทยมีมากถึง 24 ช่องด้วยกัน ช่องความถี่ 5 GHz เป็นช่องที่ว่างและไร้สัญญาณรบกวน

มาตรฐานความถี่ 5 GHz จะใช้สัญลักษณ์ IEEE 802.11a ตัว a บ่งบอกว่ารองรับ 5 GHz และถ้ามีทั้ง a และ n หมายความว่ารองรับทั้ง 2 ความถี่ 5 GHz และ 2.4 GHz ที่คุ้นหูกันก็คือ Dual-Band ยังไม่รวมถึงมาตรฐาน a/c ที่เป็น Dual-Band กระจายสัญญาณได้ทั้ง 2.4 GHz และ 5 GHz โดย 802.11ac รองรับ 802.11b/g/n ความเร็ว 1300 Mbps สำหรับ 5 GHz และ 450 Mbps สำหรับ 2.4 GHz

สำหรับประเทศไทย สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) มีอำนาจหน้าที่ส่วนหนึ่งในการพิจารณาอนุญาตและกำกับดูแลการใช้คลื่นความถี่ในช่วง 2.4-2.5 GHz โดยอนุญาตในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวิทยุคมนาคม และสถานีวิทยุที่ได้รับการยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาต ได้กำหนดการจัดสรรคลื่นความถี่ ลักษณะและประเภทของการใช้งาน สำหรับความถี่ 2.45 GHz มีการกำหนดการใช้งานไว้ในช่วงความถี่ 2.4-2.484 GHz และมีกำลังส่งออกอากาศสมมูลแบบไอโซทรอปิก (Equivalent Isotropically Radiated Power: E.I.R.P.) ไม่เกิน 100 mW และมีหลักเกณฑ์ให้สามารถใช้งานได้ทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานในช่วงความถี่นี้ถูกนำมาใช้งานหลากหลายด้าน เช่น การระบุเอกลักษณ์ด้วยคลื่นวิทยุหรืออาร์เอฟไอดี (Radio Frequency Identity: RFID) โทรศัพท์ไร้สาย (Telephone) ตัวกระจายสัญญาณ (Access Point) การใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งกระตุ้นให้เกิดความร้อนภายในอาหารหรือใช้ประกอบอาหารให้สุก หรือที่นิยมเรียกว่า เตาอบไมโครเวฟ รวมถึงการใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปอาหารในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ การผลิตมันฝรั่งทอดกรอบซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำแห้ง นอกจากนี้ อาจใช้ไมโครเวฟซึ่งมีทั้งระบบธรรมดา และระบบสุญญากาศ ได้แก่ การทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหารเส้น (Pasta) หอมใหญ่ ขนมหั้วที่ทำจากข้าว สหราชอาณาจักร เป็นต้น

หลักเกณฑ์การใช้คลื่นความถี่ย่าน 5 GHz นั้น คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ได้ออกประกาศไว้ให้ได้รับการยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาตเช่นเดียวกัน และมีการใช้งานคลื่นความถี่ และกำลังส่งออกอากาศสมมูลแบบไอโซทรอปิก มีหลักเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 1.1 [21]

ตารางที่ 1.1 การใช้งานคลื่นความถี่ และกำลังส่งออกอากาศสมมูลแบบไอโซทรอปิก

คลื่นความถี่	กำลังส่ง E.I.R.P.	การใช้งาน
5.150-5.350 GHz	0.2 W	ภายในอาคาร
5.470-5.725 GHz	1 W	ภายในอาคารและภายนอกอาคาร
5.725-5.850 GHz	1 W	ภายในอาคารและภายนอกอาคาร

ทั้งนี้ เนื่องจากเป็นการอนุญาตให้ใช้งานร่วมกันเป็นการทั่วไป โดยไม่ได้รับสิทธิคุ้มครองการรบกวน และหากก่อให้เกิดการรบกวนระดับรุนแรงต่อการใช้คลื่นความถี่อื่นที่ได้รับอนุญาตในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ผู้ใช้คลื่นความถี่ต้องระงับการใช้คลื่นความถี่ดังกล่าวที่ก่อให้เกิดการรบกวนในบริเวณนั้นโดยทันทีทั้งสองช่วงความถี่ที่กล่าวมาข้างต้น

1.2 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

จากความต้องการในการใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายที่เพิ่มมากขึ้น จึงได้พัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายในหลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการรับส่งสัญญาณ การลดขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์การสื่อสาร และการเพิ่มช่วงความถี่ในการใช้งาน เป็นต้น

ในการเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานสำหรับเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายนี้ เป็นการเพิ่มช่องทางการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายเพิ่มขึ้นเพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WLAN) ซึ่งมีความนิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวาง จากเดิมมีการใช้งานในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz แต่ในปัจจุบันได้มีการขยายการใช้งานเพิ่มขึ้นในช่วงความถี่ 5-6 GHz ตามมาตรฐาน IEEE802.11 [1] จะเห็นว่าจากการเพิ่มช่องสัญญาณดังกล่าว ทำให้สามารถมีช่องทางการติดต่อสื่อสารสำหรับใช้งานมากยิ่งขึ้น และเป็นผลกระทบไปถึงการออกแบบและสร้างอุปกรณ์การสื่อสารให้สามารถรองรับช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นด้วย ยกตัวอย่างเช่น ตัวกระจายสัญญาณ (Access Point) ยี่ห้อ Cisco รุ่น Aironet 1140 ที่สามารถรองรับการกระจายสัญญาณสองช่วงความถี่ [2] คือทั้ง 2.4-2.5 GHz และ 5-6 GHz เป็นต้น ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าสายอากาศเป็นส่วนสำคัญของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย หากสายอากาศไม่สามารถที่จะรองรับหรือตอบสนองการใช้งานตามช่วงความถี่ได้ ก็จะไม่สามารถที่จะทำการติดต่อสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้มีการศึกษาค้นคว้า และพัฒนาการออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่ที่สามารถรองรับการใช้งานช่วงความถี่ที่เพิ่มขึ้นมาได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา พัฒนาและออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz และช่วงความถี่ 5.0-5.3 GHz โครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอจะเริ่มจากการออกแบบสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองแบบ FR4 ชั้นเดียวที่มีความหนา 1.6 mm [15] ซึ่งเป็นความหนาของแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีจำหน่ายทั่วไป และมีการป้อนสัญญาณแบบโพรบ [16] พบว่าค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศสามารถที่จะตอบสนองความถี่ได้ดีในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz แต่ในช่วงความถี่ 5-6 GHz ไม่สามารถที่จะตอบสนองได้ดี จึงต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อออกแบบและพัฒนาสายอากาศให้ตรงกับความต้องการ วัสดุฐานรองชั้นเดียวจึงถูกนำมาศึกษาถึงการตอบสนองของความถี่ ซึ่งพบว่า การเพิ่มวัสดุฐานรองชั้นเดียวความหนา 1.6 mm เป็นวัสดุฐานรอง 2 ชั้น และมีความหนารวม 3.2 mm นั้น มีผลตอบสนองทางความถี่สามารถตอบสนองสองย่านความถี่ได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการมีวัสดุฐานรองชั้นเดียว

การจำลองสายอากาศเพื่อออกแบบและพัฒนาให้ได้คุณลักษณะตามที่ต้องการ ใช้โปรแกรม CST microwave studio ผลการจำลองจะนำมาศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศ เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับเงื่อนไขคุณลักษณะของสายอากาศ และสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศเปรียบเทียบกับผลการจำลอง และใช้งานกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสองช่วงความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ซึ่งวัตถุประสงค์โดยสรุปเป็นข้อของวิทยานิพนธ์ คือ

- 1 เพื่อศึกษาการออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่ แบบแพทช์สำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz และช่วงความถี่ 5.0-5.3 GHz
- 2 เพื่อศึกษาการออกแบบสายอากาศให้มีขนาดกะทัดรัดด้วยวิธีการป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและการลัดวงจร
- 3 เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศสำหรับการใช้งานกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสองช่วงความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงการใช้งานความถี่ในช่วง 2.45 GHz และช่วง 5 GHz สำหรับประเทศไทย ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ส่วนรายละเอียดของวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึงในหัวข้อสุดท้าย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและโพลาริซั่ สายอากาศไมโครสตริป และงานวิจัยที่มีมาก่อนสำหรับการออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่ที่สามารถรองรับการใช้งานช่วงความถี่ที่เพิ่มขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่ได้คำนวณทางทฤษฎี โดยจะมุ่งเน้นพิจารณาพารามิเตอร์หลักมูลของสายอากาศ และสามารถใช้งานกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสองช่วงความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 4 กล่าวถึงการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสมสำหรับสายอากาศที่นำเสนอ และศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ของสายอากาศ

บทที่ 5 กล่าวถึงการนำผลที่ได้จากการจำลองมาสร้างสายอากาศต้นแบบ และทำการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ

บทที่ 6 กล่าวถึงเนื้อหาโดยสรุปของวิทยานิพนธ์ รวมถึงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ และข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการ โดยจะเริ่มจากระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz และช่วงความถี่ 5.0-5.3 GHz ในส่วนของทฤษฎีและหลักการของสายอากาศจะกล่าวถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและโพลาไรซ์ และสายอากาศไมโครสตริป ในส่วนสุดท้ายได้กล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อนสำหรับกรออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่ที่สามารถรองรับการใช้งานช่วงความถี่ที่เพิ่มขึ้นมาได้

2.1 ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN)

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network) หรือ WLAN คือ เทคโนโลยีที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ตั้งแต่สองตัวขึ้นไปเข้าด้วยกัน โดยใช้วิธีการกระจายแบบไร้สาย ส่วนใหญ่แล้ว จะใช้คลื่นวิทยุแบบกระจายความถี่ (Orthogonal Frequency Division Multiplex: OFDM) และโดยปกติแล้ว จะมีการเชื่อมต่อผ่านทางตัวกระจายสัญญาณ (Access Point: AP) เพื่อเข้าไปยังโลกอินเทอร์เน็ต ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทำให้ผู้ใช้สามารถนำพาหรือเคลื่อนย้ายคอมพิวเตอร์ไปยังพื้นที่ใดก็ได้ที่มีสัญญาณของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย และยังสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายได้ตามปกติ WLAN ที่ทันสมัยส่วนใหญ่จะมีพื้นฐานมาจากมาตรฐาน IEEE 802.11 ที่ถูกวางตลาดภายใต้ชื่อแบรนด์ Wi-Fi. ครั้งหนึ่ง WLAN เคยถูกเรียกว่า LAWN (Local Area Wireless Network) โดยกระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกา

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้รับความนิยมในการใช้ตามบ้านอันเนื่องมาจากความง่ายในการติดตั้ง และมีการใช้กันมากในย่านธุรกิจและในอาคารขนาดใหญ่เพื่อให้บริการลูกค้าซึ่งปกติจะให้บริการฟรีเพื่อการเข้าถึงอินเทอร์เน็ต เช่น โครงการฟรีอินเทอร์เน็ตของกระทรวงไอซีที และภายในกรุงเทพมหานครก็มีอินเทอร์เน็ตสำหรับใช้งานฟรี เป็นต้น

2.1.1 ประวัติของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

ในปี ค.ศ. 1970 นอร์แมน แอบรามสัน ศาสตราจารย์แห่งมหาวิทยาลัยฮาวายได้พัฒนาเครือข่ายสื่อสารทางคอมพิวเตอร์แบบไร้สายขึ้นเป็นครั้งแรกของโลก ในชื่อ ALOHAnet โดยใช้คลื่นวิทยุแบบต้นท่อนต่ำ โดยตัวระบบได้มีการใช้คอมพิวเตอร์ทั้งหมด 7 ตัวกระจายไปยัง 4 เกาะแล้วทำการสื่อสารที่ศูนย์คอมพิวเตอร์กลางที่เกาะโออาฮู โดยไม่ใช้สายโทรศัพท์เลย

ในปี ค.ศ. 1979 เอฟ. อาร์. จีเฟลเลอร์ และยู. บาสต์ ได้เผยแพร่งานวิจัยในวารสาร IEEE เพื่อรายงานผลของการทดลองระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้คลื่นรังสีอินฟราเรด จากนั้นไม่นาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 1980 พี. เฟอร์เริร์ต ได้รายงานผลของการทดลองใช้คลื่นวิทยุ Spread spectrum รหัสเดียวสำหรับการสื่อสารแบบไร้สายในที่ประชุมโทรคมนาคมระดับชาติของ IEEE จากนั้นในปี ค.ศ. 1984 มีการเปรียบเทียบระหว่างคลื่นรังสีอินฟราเรดและ Spread spectrum แบบ Code Division Multiple Access: CDMA สำหรับเครือข่ายแลกเปลี่ยนข้อมูลในสำนักงานแบบไร้สาย และมีการตีพิมพ์ในวารสาร Computer Networking Symposium ของ IEEE และจากนั้นได้มีการตีพิมพ์ต่อในวารสาร Communication Society ของ IEEE

ในปี ค.ศ. 1985 มาร์คัส ได้ทำการทดลองใช้ Industrial Sciences Medicine band: ISM band เพื่อนำเทคโนโลยี Spread spectrum ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ จากนั้น เอ็ม. เคฟฮาด ได้รายงานผลของการทดลองระบบ Private Branch Exchange: PBX โดยใช้การเข้ารหัสแบบผู้ใช้เข้าถึงข้อมูลได้ที่หลายคน ความพยายามครั้งนี้แสดงถึงการนำเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรม จนต่อมาได้มีการพัฒนาเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายรุ่นใหม่ขึ้นมา และมีการปรับปรุงรุ่นเก่าเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน

2.1.2 องค์ประกอบของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

2.1.2.1 สถานี

อุปกรณ์ทุกตัวที่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับตัวกลางไร้สายในเครือข่ายได้จะถูกเรียกว่า สถานี สถานีทุกสถานีจะใช้ตัวควบคุมระบบติดต่อประสานเครือข่ายไร้สาย (Wireless Network Interface Controller: WNIC) สถานีไร้สายแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ตัวกระจายสัญญาณ (AP) และเครื่องลูกข่าย ตัวกระจายสัญญาณส่วนใหญ่จะเป็นเราเตอร์ คือสถานีฐานสำหรับเครือข่ายไร้สาย AP จะรับและส่งคลื่นความถี่วิทยุเพื่อให้อุปกรณ์ไร้สายสามารถสื่อสารกับตัวมันเองได้ เครือข่ายแบบไร้สายมีได้หลายแบบ เช่น แล็ปท็อป อุปกรณ์ช่วยเหลือแบบดิจิทัล (Personal Digital Assistance) โทรศัพท์ IP และโทรศัพท์อัจฉริยะ เป็นต้น หรืออุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่อย่างคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ และเวิร์คสเตชัน (คอมพิวเตอร์แบบหนึ่งทีออกแบบมาใช้งานเฉพาะด้าน เช่น ด้านเทคนิคหรือวิทยาศาสตร์) ที่มีอุปกรณ์เชื่อมต่อกับระบบไร้สาย

2.1.2.2 เซ็ตบริการพื้นฐาน

เซ็ตบริการพื้นฐาน (Basic Service Set: BSS) คือเซตของสถานีทุกสถานีที่สามารถสื่อสารกันได้ ทุกเซ็ตบริการพื้นฐานจะมีหมายเลข (ID) กำกับ ที่เรียกว่า BSSID ซึ่งก็คือ MAC Address ของ AP ที่ให้บริการในเซ็ตบริการพื้นฐานนั่นเอง เซ็ตบริการพื้นฐานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เซ็ตบริการพื้นฐานอิสระ (Independent BSS: IBSS) และเซ็ตบริการพื้นฐานโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure BSS) เซ็ตบริการพื้นฐานอิสระก็คือ เครือข่ายเฉพาะกิจ (Ad-hoc Network) ที่จะไม่ มี AP โดยทุกเครื่องลูกข่ายจะติดต่อกันเองซึ่งหมายถึงจะไม่มีการเชื่อมต่อกับเซ็ตบริการพื้นฐานอื่น แต่ใน Infrastructure BSS เครื่องลูกข่ายจะสามารถสื่อสารกับ AP เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3 เซ็ตบริการขยาย

เซ็ตบริการขยาย (Extended Service Set: ESS) คือชุดของหลาย BSSs เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน APs ใน ESS มีการเชื่อมต่อกันด้วยระบบการกระจาย แต่ละ ESS มีรหัสเรียกว่า SSID หรือชื่อเครือข่าย เช่น ICT Free Wi-Fi by XXX หรือ APSPCCTV-1234 เป็นต้น ซึ่งมีความยาวสูงสุด 32 ไบต์

2.1.2.4 ระบบการกระจาย

ระบบการกระจาย (Distribution System: DS) เชื่อมต่อหลาย APs ใน ESS เข้าด้วยกัน แนวคิดของระบบการกระจาย ก็คือ เพื่อใช้ในการเพิ่มความครอบคลุมเครือข่ายผ่านบริการโรมมิ่งระหว่างหลายเซลล์

ระบบการกระจาย อาจเป็นแบบใช้สายหรือไร้สายก็ได้ ปัจจุบันระบบการกระจายไร้สายส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับโพรโทคอล (Wireless Distribution System: WDS) แต่ระบบอื่นๆ ก็ยังใช้งานได้

2.1.3 ประเภทของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

2.1.3.1 แบบ Peer-to-Peer

เครือข่าย Peer-to-Peer หรือเครือข่ายเฉพาะกิจ เป็นเครือข่ายที่สถานีตั้งแต่สองสถานีขึ้นไปสื่อสารกันแบบ P2P เท่านั้น ไม่มีสถานีฐานและไม่มีใครอนุญาตให้ใครพูดคุย การสื่อสารแบบนี้ทำสำเร็จได้โดยใช้ชุดบริการพื้นฐานอิสระ (IBSS)

ในกลุ่ม P2P WiFi ใดๆ เจ้าของกลุ่มจะทำงานเหมือนกับเป็น AP ตัวหนึ่งและอุปกรณ์อื่นๆ เป็นลูกข่าย มีสองวิธีหลักในการสร้างเจ้าของกลุ่ม วิธีการแรกผู้ใช้แต่งตั้งเจ้าของกลุ่ม P2P ด้วยตนเอง วิธีการนี้เป็นที่รู้จักกันในฐานะเจ้าของกลุ่มอัตโนมัติ (Autonomous Group Owner) วิธีที่สองเรียกว่าการตั้งเจ้าของกลุ่มด้วยพื้นฐานการเจรจา โดยที่สองอุปกรณ์แข่งขันบนพื้นฐานของค่าเจตนา อุปกรณ์ที่มีค่าเจตนาสูงกว่าจะเป็นเจ้าของกลุ่มและอุปกรณ์ที่สองจะเป็นลูกข่าย ค่าเจตนาจะขึ้นอยู่กับว่าอุปกรณ์ไร้สายจะดำเนินการข้ามการเชื่อมต่อระหว่างการบริการ WLAN โครงสร้างพื้นฐานกับกลุ่ม P2P หรือไม่ ขึ้นอยู่กับอำนาจที่เหลืออยู่ในอุปกรณ์ไร้สาย ขึ้นอยู่กับว่าอุปกรณ์ไร้สายนั้นเป็นเจ้าของกลุ่มในอีกกลุ่มหนึ่งอยู่แล้วและ/หรือเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความแรงของสัญญาณจากอุปกรณ์ไร้สายตัวแรก

เครือข่าย P2P ช่วยให้อุปกรณ์ไร้สายได้สื่อสารโดยตรงซึ่งกันและกัน อุปกรณ์ไร้สายที่อยู่ในระยะทำการของตัวอื่น สามารถจับสัญญาณได้และสื่อสารกันได้โดยตรงโดยไม่เกี่ยวข้องกับ APs กลาง วิธีนี้จะใช้โดยทั่วไปกับคอมพิวเตอร์สองเครื่องเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกันในรูปแบบเครือข่าย

IEEE 802.11 กำหนดชั้นทางกายภาพ (Physical layer) และชั้น Media Access Control: MAC ที่มีพื้นฐานมาจาก Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CSMA/CA ลักษณะสมบัติของ 802.11 ประกอบด้วยบทบัญญัติที่ออกแบบมาเพื่อลดการชนกันอันเนื่องมาจากสถานีเคลื่อนที่อาจจะอยู่ในระยะทำการของ AP ตัวเดียวกัน แต่อยู่นอกระยะทำการของกันและกัน

802.11 มีสองโหมดพื้นฐานของการทำงาน คือ โหมดเฉพาะกิจและโหมดโครงสร้างพื้นฐาน ในโหมดเฉพาะกิจ สถานีเคลื่อนที่ส่งโดยตรงแบบ P2P ในโหมดโครงสร้างพื้นฐาน สถานีเคลื่อนที่ติดต่อสื่อสารผ่าน AP ที่ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมไปยังโครงสร้างพื้นฐานเครือข่ายแบบใช้สาย เนื่องจากการสื่อสารไร้สายใช้สื่อการสื่อสารที่เปิดมากกว่าเมื่อเทียบกับ LANs ใช้สาย นักออกแบบ 802.11 จึงเพิ่มกลไกการเข้ารหัสแบบ Shared key ได้แก่ Wired Equivalent Privacy: WEP WiFi Protected Access: WPA WPA2 เพื่อรักษาความปลอดภัยให้กับเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย

2.1.3.2 แบบ Bridge

บริติจถูกนำมาใช้เพื่อเชื่อมต่อเครือข่ายที่ต่างชนิดกัน เช่น Ethernet ไร้สายต่อกับ Ethernet ใช้สาย บริติจทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อกับ Wireless Local Area Network

2.1.3.3 แบบระบบการกระจายแบบไร้สาย

ระบบการกระจายแบบไร้สายช่วยในการเชื่อมต่อไร้สายของหลาย APs ในเครือข่าย IEEE 802.11 ระบบนี้จะช่วยให้เครือข่ายไร้สายสามารถขยายขนาดโดยการใช้ AP หลายจุดโดยไม่จำเป็นต้องใช้ แบ็คโบนแบบใช้สายในการเชื่อมโยง AP เข้าด้วยกันอย่างที่เคยใช้ตลอดมา ข้อได้เปรียบที่โดดเด่นของ WDS ที่เหนือกว่าโซลูชันอื่นๆ ก็คือ สามารถเก็บรักษา MAC address ของแพ็กเก็ตลูกข่ายที่ข้ามการเชื่อมโยงระหว่าง APs

APs อาจเป็นได้ทั้งสถานีหลัก สถานีถ่ายทอด หรือสถานีระยะไกล สถานีฐานหลักถูกเชื่อมต่อโดยทั่วไปเข้ากับอีเธอร์เน็ตแบบใช้สาย สถานีฐานถ่ายทอดจะถ่ายทอดข้อมูลระหว่างหลายสถานีฐานระยะไกล หลายลูกข่ายไร้สายหรือสถานีทวนสัญญาณอื่นๆ ไปยังสถานีฐานหลักหรือสถานีถ่ายทอดอื่นๆ สถานีฐานระยะไกลยอมรับการเชื่อมต่อแบบไร้สายจากลูกข่ายและส่งพวกเขาไปยังสถานีถ่ายทอดหรือสถานีฐานหลัก การเชื่อมต่อระหว่างลูกข่าย จะทำโดยใช้ MAC address มากกว่า จะใช้การระบุ IP ที่ได้รับมอบหมาย

สถานีฐานทั้งหมดในระบบจำหน่ายแบบไร้สาย (WDS) จะต้องมีการ config ให้ใช้ช่วงความถี่วิทยุ (channel) เดียวกันและใช้ WEP คีย์ WPA คีย์ร่วมกัน สถานีฐานดังกล่าวอาจถูก config ให้มี SSID ที่แตกต่างกัน WDS ยังต้องการให้ทุกสถานีฐานถูก config ให้ส่งข้อมูลต่อไปยังสถานีฐานอื่นในระบบตามที่กล่าวไว้ข้างต้น

WDS อาจถูกใช้งานในโหมด repeater เพราะปรากฏว่าสามารถบริติจและยอมรับลูกข่ายไร้สายในเวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ควรสังเกตด้วยว่า throughput ที่ได้จากวิธีนี้จะลดลงครึ่งหนึ่งสำหรับลูกข่ายทั้งหมดที่เชื่อมต่อแบบไร้สาย

แต่เมื่อเป็นเรื่องยากที่จะเชื่อมต่อทุกจุดเข้าใช้งานในเครือข่ายโดยใช้สาย ก็ยังเป็นไปได้ที่จำเป็นต้องใช้ APs ทำหน้าที่เป็นแคสสถานีทวนสัญญาณเท่านั้นเอง

2.1.4 การเชื่อมต่อของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

การเชื่อมต่อของเครือข่ายไร้สาย ใช้เทคนิคในการสื่อสารด้วยสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ประเภท คือ ประเภทใช้คลื่นความถี่วิทยุ และประเภทใช้คลื่นอินฟราเรด

การเชื่อมต่อด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency: RF) เป็นการสื่อสารที่อาศัยคลื่นความถี่วิทยุเป็นสื่อกลางในการรับส่งข้อมูลระหว่างจุด ซึ่งอยู่ในรูปแบบของระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายซึ่งมีคุณสมบัติที่เด่นชัด คือ เป็นช่วงคลื่นที่สามารถสร้างขึ้นใช้งานได้ง่าย ส่งไปได้ในระยะทางไกล สามารถเดินทางผ่านวัตถุทึบต่างๆ ได้เป็นอย่างดีและยังเดินทางออกจากแหล่งกำเนิดไปได้ทุกทิศทุกทาง คลื่นวิทยุที่ใช้อยู่ในย่านความถี่ ISM ซึ่งเป็นย่านความถี่เสรีหรือความถี่สาธารณะสามารถใช้งานโดยไม่ต้องขออนุญาต โดยแต่ละประเทศมีช่องสัญญาณที่อนุญาตให้ใช้งานแตกต่างกัน สำหรับประเทศไทย กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารได้ออกคู่มือประกอบการกฎกระทรวง เรื่องกำหนดให้เครื่องวิทยุคมนาคมและสถานีวิทยุคมนาคมบางประเภทได้รับยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาต พ.ศ.2547 ได้กำหนดให้เครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในย่านความถี่ 2.4-2.5 GHz และมีกำลังส่งไม่เกิน 100 mW เป็นคลื่นวิทยุคมนาคมที่ได้รับยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาต

โดยทั่วไปแล้วระบบเครือข่ายไร้สายจะใช้สัญญาณคลื่นความถี่วิทยุซึ่งแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แถบความถี่แคบ (Narrow Band) และแถบความถี่สเปกตรัม (Spread Spectrum)

การเชื่อมต่อด้วยอินฟราเรด ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในการสื่อสารระยะใกล้ เช่น รีโมตสำหรับควบคุมวิทยุโทรทัศน์ และวีดิทัศน์ เป็นต้น อินฟราเรดเป็นหน่วยหนึ่งของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่เหนือคลื่นวิทยุและต่ำกว่าแสงที่มองเห็น โดยแสงอินฟราเรดสามารถใช้รับส่งข้อมูลได้คุณสมบัติเด่นของการรับส่งข้อมูลผ่านคลื่นอินฟราเรด คือ เดินทางเป็นแนวตรงราคาถูก และง่ายต่อการผลิตใช้งาน แต่คลื่นประเภทนี้มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถเดินทางผ่านวัตถุหรือสิ่งกีดขวางได้ แม้ว่าอุปกรณ์ ทั้งสองชั้นนั้นจะใช้ความถี่เดียวกัน ยิ่งไปกว่านั้นอุปกรณ์ที่ใช้คลื่นอินฟราเรดยังปลอดภัยต่อการถูกลักลอบ ดักฟังสัญญาณ ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้คลื่นอินฟราเรดสามารถนำมาใช้ในการสื่อสารในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้เป็นอย่างดี

นอกจากนั้นอินฟราเรดยังมีคุณสมบัติในการนำมาใช้กับสถานะที่มีการแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีแบนด์วิดท์ที่กว้าง สามารถใช้ได้กับอัตราการส่งที่สูงกว่าความถี่คลื่นวิทยุด้วย อย่างไรก็ตาม การเชื่อมต่อด้วยอินฟราเรดก็มีข้อจำกัด คือ ไม่เหมาะสมกับวัตถุที่เคลื่อนที่เพราะมันมีระยะทางที่จำกัดไม่สามารถผ่านวัตถุทึบแสงได้ เช่น กำแพง จากข้อจำกัดเรื่องระยะทางนี้จึงทำให้การนำอินฟราเรดมาใช้งานในเครือข่ายน้อย

2.1.4.1 เทคนิคการส่งข้อมูลในเครือข่ายไร้สาย

การเชื่อมต่อในเครือข่ายไร้สายนิยมใช้คลื่นความถี่วิทยุ (RF) เป็นตัวกลางในการสื่อสาร ข้อมูล ซึ่งจะถูกนำไปใช้สำหรับส่งข้อมูลระหว่างจุด โดยมีเทคนิคการส่งข้อมูลในระบบเครือข่ายไร้สายดังนี้

เทคนิคแบบความถี่แคบ (Narrow Band Technology) เป็นการรับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุบนความถี่เฉพาะที่รู้จักในชื่อของแถบความถี่ ISM สัญญาณจะมีกำลังต่ำ (โดยทั่วไปประมาณ 1 mW) และใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่างต้นทางกับปลายทางเพียง 1 คู่เท่านั้น และไม่สามารถส่งสัญญาณข้ามโหนดไปมาได้ การรับส่งข้อมูลแบบนี้เปรียบได้กับคู่สายโทรศัพท์ที่สามารถคุยได้เฉพาะต้นทางกับปลายทางแต่ไม่สามารถคุยพร้อมกันได้เลยหลายๆ คน

เทคนิคแบบแถบความถี่สเปกตรัม (Spread Spectrum Technology) ระบบเครือข่ายไร้สายส่วนใหญ่นิยมใช้เทคนิคแบบความถี่สเปกตรัม ซึ่งใช้ความถี่ที่กว้างกว่าเทคนิคแบบความถี่แคบ ซึ่ง เทคนิคแถบความถี่สเปกตรัม คือ วิธีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณข้อมูลเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ความถี่วิทยุ มากเกินกว่าความจำเป็น แรกทีเดียวเทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใช้ในกิจการทางทหารซึ่งต้องการความ เชื่อถือได้ในระดับสูงมากในระหว่างการรบ เพื่อป้องกันมิให้ฝ่ายตรงข้ามใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดักฟัง สัญญาณเพื่อขโมยความลับหรือรบกวนการทำงาน เพราะในระบบนี้การส่งสัญญาณถูกส่งออกไปหลายความถี่พร้อมกันจึงทำให้การดักฟังเป็นไปได้ยากขึ้น รวมทั้งการรบกวนการสื่อสารก็ยากมากขึ้นด้วยเพราะ จะต้องค้นหาคลื่นความถี่ทั้งหมดให้ได้ โดยการส่งสัญญาณจะใช้แถบความถี่ ISM ที่ช่วงความถี่ระหว่าง 902-928 MHz และ 2.4-2.484 GHz ซึ่งไม่จำเป็นต้องได้รับอนุญาตจาก FCC เทคนิคนี้ต้องใช้แบนด์วิดท์มากกว่าแบนด์วิดท์ของข้อมูล

เทคนิคแบบแถบความถี่สเปกตรัมสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ดีเอสเอสเอส และ เอฟเอสเอสเอส มีรายละเอียดดังนี้

ดีเอสเอสเอส (Direct Sequence Spread Spectrum: DSSS) เป็นเทคนิคที่ยังใช้คลื่นพาห์ที่ต้องระบุความถี่ที่ใช้ ข้อมูลจะถูกกระจายให้ช่วงแบนด์วิดท์กว้างขึ้นในรูปแบบของรหัสเฉพาะโดย จะสร้างบิตชดเชยสำหรับบิตทุกบิตที่ขนส่งซึ่งเรียกว่าชิป (Chip) หรือรหัสชิปปิง (Chipping code) เทคนิคนี้ต้องการแบนด์วิดท์มากกว่าวิธีการขนส่งแบบเทคนิคแถบความถี่แคบ ซึ่งมีข้อดีกว่าเทคนิคแบบแถบความถี่แคบ คือ ถ้าเกิดเหตุการณ์ที่ปลายทางได้รับข้อมูลแล้ว มีบางบิตของข้อมูลเกิดผิดพลาดหรือเสียหายใน ระหว่างการส่งข้อมูล ปลายทางฝั่งรับข้อมูลสามารถที่จะทำการกู้คืน (Recover) ข้อมูลที่เสียกลับมาได้ จากข้อมูลที่เกิดความผิดพลาดหรือเสียหายระหว่างการส่งโดยไม่ต้องให้ต้นทางส่งข้อมูลมาให้ใหม่

เอฟเอสเอสเอส (Frequency Hopping Spread Spectrum: FHSS) การส่งสัญญาณรูปแบบนี้จะใช้ความถี่พาห์เพียงความถี่เดียว และจะเปลี่ยนแปลงความถี่ ไปมาอย่างต่อเนื่อง ในลักษณะหรือรูปแบบที่เป็นที่เข้าใจตรงกันระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับสามารถทำงานประสานกันได้ วิธีการส่งแบบนี้ป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่ข้างเคียงได้เป็นอย่างดี เพราะว่าความถี่ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้จะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยการส่งและรับแต่ละครั้งที่ส่วนหัวของแพ็กเก็ตข้อมูลจะสามารถที่จะ ปรับเปลี่ยนความถี่ไปได้ตลอดเวลาอันจะทำให้เกิดความปลอดภัยของข้อมูลสูงมากขึ้น ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบเอฟเอชเอสเอส สามารถส่งข้อมูลไปพร้อมๆ กันหลายช่องสัญญาณได้ด้วยการกำหนดให้มีรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงหลายๆ รูปแบบทำงานไปพร้อมกัน ซึ่งจะสามารถใช้ประโยชน์แถบความถี่ได้ดีกว่าและทำให้เครือข่ายมีประสิทธิภาพสูงกว่า

เทคนิคโอเอฟดีเอ็ม (Orthogonal Frequency Division Multiplexes: OFDM) เทคนิคนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความเร็วในการรับส่งข้อมูลในมาตรฐานใหม่ๆ ของระบบเครือข่ายไร้สาย คือ LESS 802.11a และ IEEE 802.11g การส่งสัญญาณคลื่นวิทยุแบบนี้เป็นการมัลติเพล็กซ์สัญญาณ โดย ช่องสัญญาณความถี่จะถูกแบ่งออกเป็นความถี่พาห่อย่อย (Subcarrier) หลายๆ ความถี่ โดยแต่ละความถี่พาห่อย่อยจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน ทำให้มันเป็นอิสระต่อกัน ความถี่ที่คลื่นพาห่ที่ตั้งฉากกันนั้น ทำให้ไม่มีปัญหาการซ้อนทับกันของสัญญาณที่อยู่ติดกัน

2.1.5 Roaming

มีสองความหมายสำหรับการโรมมิ่งของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย คือ

2.1.5.1 การโรมมิ่งภายใน สถานีเคลื่อนที่ (Mobile Station: MS) จะเคลื่อนที่จาก AP หนึ่งไปยังอีก AP หนึ่ง ภายในเครือข่ายบ้าน อันเนื่องมาจากความแรงของสัญญาณอ่อนเกินไป เซิร์ฟเวอร์การตรวจสอบ (RADIUS) ดำเนินการรับรองความถูกต้องของ MS ผ่าน 802.1x (เช่น ด้วย PEAP) การทำงานของ QoS อยู่ในเครือข่ายบ้าน สถานีเคลื่อนที่ที่กำลังโรมมิ่งจาก AP หนึ่งไปยังอีก AP หนึ่งมักจะขัดจังหวะการไหลของข้อมูลระหว่างสถานีเคลื่อนที่และแอปพลิเคชันบนโฮสต์ที่เชื่อมต่อกับเครือข่าย สถานีเคลื่อนที่ที่จะคอยตรวจสอบเป็นระยะๆ เพื่อหา AP ทางเลือก (ตัวที่จะให้การเชื่อมต่อที่ดีกว่า) ในบางขณะ ขึ้นอยู่กับกลไกที่เป็นกรรมสิทธิ์ สถานีเคลื่อนที่อาจตัดสินใจที่จะเชื่อมโยงกับ AP ที่มีสัญญาณไร้สายที่แรงกว่า สถานีเคลื่อนที่อาจสูญเสียการเชื่อมต่อกับจุดเชื่อมต่อเดิมก่อนที่จะเชื่อมต่อใหม่จะสำเร็จ เพื่อที่จะให้การเชื่อมต่อที่ต่อเนื่องเชื่อถือได้ สถานีเคลื่อนที่ที่จะต้อง มีซอฟต์แวร์ที่ให้เซสชันที่มั่นคง

2.1.5.2 การโรมมิ่งภายนอก MS (ลูกข่าย) เคลื่อนที่เข้าไปใน WLAN ของการให้บริการอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wireless Internet Service Provider: WISP) รายอื่น และใช้บริการ (Hotspot) ของพวกเขา ถ้า WISP รายนั้นเปิดให้เข้าได้ ผู้ใช้ก็จะเป็นอิสระจากเครือข่ายบ้านของตัวเอง และสามารถใช้อีกเครือข่ายท้องถิ่น แต่ต้องมีการตรวจสอบและระบบการเรียกเก็บเงินเป็นพิเศษสำหรับบริการเคลื่อนที่ในเครือข่ายท้องถิ่น

2.1.6 การประยุกต์ใช้งานระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้รับความนิยมอย่างมากในคอมพิวเตอร์ตามบ้านเนื่องจากติดตั้งง่าย และยิ่งได้รับความนิยมมากขึ้นในกลุ่มแล็ปท็อป ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายมีแอปพลิเคชันจำนวนมาก การใช้งานที่ทันสมัยของ WLANs จากเครือข่ายในบ้านเล็กๆ ไปจนถึงบ้าน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่ วิทยาเขตขนาดใหญ่ไปจนถึงเครือข่ายเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์แบบบนเครื่องบินและรถไฟ ธุรกิจหลายแขนงเริ่มให้บริการการเข้าถึงอินเทอร์เน็ตผ่านทาง Hotspot ของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายให้กับลูกค้าที่มาใช้บริการ เช่น ร้านกาแฟ ซึ่งส่วนใหญ่มักให้บริการแบบไม่คิดมูลค่า และในปัจจุบันให้บริการกับอุปกรณ์พกพาที่เชื่อมต่อกับ 3G หรือ 4G นอกจากนี้ในประเทศไทย มีการสร้างระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายขนาดใหญ่ให้คนทำงานสามารถเข้าถึงอินเทอร์เน็ตได้โดยสะดวกในพื้นที่สาธารณะอีกด้วย ภายในกรุงเทพมหานคร ก็มีอินเทอร์เน็ตฟรี บ่อยครั้งที่ APs สาธารณะเหล่านี้ไม่ต้องลงทะเบียนหรือใช้รหัสผ่านในการเข้าร่วมเครือข่าย แต่บางที่จะสามารถเข้าถึงได้เมื่อได้ลงทะเบียนและ/หรือจ่ายค่าธรรมเนียมแล้ว

2.1.7 มาตรฐานการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11

IEEE 802.11 คือ มาตรฐานการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สายกำหนดขึ้นโดย สถาบันวิชาชีพวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE) เป็นมาตรฐานกลาง ที่ได้นำมาปฏิบัติใช้ เพื่อที่จะทำการเชื่อมโยงอุปกรณ์เครือข่ายไร้สายเข้าด้วยกันบนระบบ ในทางปกติแล้ว การเชื่อมต่อบนระบบเครือข่ายไร้สาย จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์สองชิ้น นั่นคือ

ตัวกระจายสัญญาณ คือตัวกลางที่ช่วยในการติดต่อระหว่างตัวรับและส่งสัญญาณไร้สายของผู้ใช้กับเราเตอร์ผ่านทางสายนำสัญญาณที่มาจากทองแดงที่ได้รับการเชื่อมต่อกับระบบเครือข่าย เช่น สายแลนหรือสายโทรศัพท์ ADSL หรือผ่านทางสายใยแก้วนำแสง

ตัวรับ-ส่งสัญญาณไร้สาย ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณ ระหว่างตัวรับส่งแต่ละตัวด้วยกันหรือระหว่างตัวลูกข่ายกับตัวกระจายสัญญาณ

หลังจากที่เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายนี้ได้เกิดขึ้น ก็ได้เกิดมาตรฐานตามมามากมาย โดยที่การจะเลือกซื้อหรือเลือกใช้อุปกรณ์เครือข่ายไร้สายเหล่านั้น เราจำเป็นจะต้องคำนึงถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในผลิตภัณฑ์นั้นๆ รวมถึงความเข้ากันได้ของเทคโนโลยีที่ต่างๆ ด้วย

2.1.7.1 ประวัติของมาตรฐาน IEEE 802.11

เทคโนโลยี 802.11 มีต้นกำเนิดในปี ค.ศ. 1985 กำหนดขึ้นโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (U.S. Federal Communications Commission: FCC) ที่ประกาศช่วงความถี่สำหรับกิจการด้านอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ (ISM) สำหรับการใช้งานที่ไม่ต้องมีใบอนุญาต

ในปี ค.ศ. 1991 บริษัท เอ็นซีอาร์/เอทีแอนด์ที (ตอนนี้เป็น Alcatel-Lucent และ LSI corporation) ได้สร้างชุดตั้งต้นของ 802.11 ในเมือง Nieuwegein เนเธอร์แลนด์ ตอนแรกนักประดิษฐ์ตั้งใจจะใช้เทคโนโลยีนี้สำหรับระบบเก็บเงิน ผลิตภัณฑ์ไร้สายตัวแรกที่ถูกนำออกสู่ตลาดอยู่ภายใต้ชื่อ WaveLAN

วิก เฮย์ส ผู้เป็นประธานของ IEEE 802.11 เป็นเวลา 10 ปีและถูกเรียกว่า บิดาแห่ง WiFi ได้มีส่วนร่วมในการออกแบบ 802.11b และ 802.11a มาตรฐานเริ่มต้นภายใน IEEE

ในปี ค.ศ. 1999 Wi-Fi Alliance ถูกจัดตั้งขึ้นเป็นสมาคมการค้าเจ้าของเครื่องหมายการค้า Wi-Fi ซึ่งผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ใช้ Wi-Fi จะมีเครื่องหมายนี้

2.1.7.2 มาตรฐานที่อยู่ภายใต้กรอบของเทคโนโลยี IEEE 802.11

ปัจจุบันนี้มีมาตรฐานออกมาหลายอย่าง แต่ที่ได้รับความนิยมทั้งในอดีตและปัจจุบันนั้น แบ่งออกเป็น 7 มาตรฐานด้วยกัน ได้แก่

IEEE 802.11a เสร็จสมบูรณ์เมื่อปี ค.ศ. 1999 โดยออกเผยแพร่ชื่อว่าของมาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อปรับปรุงความเร็วในการส่งข้อมูลให้วิ่งได้สูงถึง 54 Mbps บนความถี่ 5 GHz ซึ่งจะมีคลื่นรบกวนน้อยกว่าความถี่ 2.4 GHz ที่มาตรฐานอื่นใช้กัน ที่ความเร็วนี้สามารถทำการแพร่ภาพและข่าวสารที่ต้องการความละเอียดสูงได้ อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลสามารถปรับระดับให้ช้าลงได้ เพื่อเพิ่มระยะทางการเชื่อมต่อให้มากขึ้น แต่ทว่าข้อเสียก็คือ ความถี่ 5 GHz นั้น หลายๆ ประเทศไม่อนุญาตให้ใช้ เช่น ประเทศไทย เพราะได้จัดสรรให้อุปกรณ์ประเภทอื่นไปแล้ว และเนื่องด้วยการที่มาตรฐานนี้ใช้การเชื่อมต่อที่ความถี่สูงๆ ทำให้มาตรฐานนี้ มีระยะการรับส่งที่ค่อนข้างใกล้ คือประมาณ 35 เมตร ในโครงสร้างปิด (เช่น ในตึก ในอาคาร) และ 120 เมตร ในที่โล่งแจ้งและด้วยความที่ส่งข้อมูลด้วยความถี่สูงนี้ ทำให้การส่งข้อมูลนั้นไม่สามารถทะลุทะลวงโครงสร้างของตึกได้มากนัก อุปกรณ์ไร้สายที่รองรับเทคโนโลยี IEEE 802.11a นี้ไม่สามารถเข้ากันได้กับอุปกรณ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ที่จะอธิบายด้านล่างนี้ได้ อีกทั้งอุปกรณ์ของ IEEE 802.11a ยังมีราคาสูงกว่า IEEE 802.11b ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a จึงได้รับความนิยมน้อยกว่า IEEE 802.11b มาก จึงทำให้ไม่ค่อยเป็นที่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร

IEEE 802.11b เสร็จสมบูรณ์เมื่อปี ค.ศ. 1999 ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ผสมกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz เนื่องจากการใช้คลื่นความถี่ที่ต่ำกว่าอุปกรณ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11a ทำให้อุปกรณ์ที่ใช้มาตรฐานนี้จะมีความสามารถในการส่งคลื่นสัญญาณไปได้ไกลกว่า คือประมาณ 38 เมตร ในโครงสร้างปิด และ 140 เมตร ในที่โล่งแจ้ง รวมถึง สัญญาณสามารถทะลุทะลวงโครงสร้างตึกได้มากกว่าอุปกรณ์ที่รองรับกับมาตรฐาน IEEE 802.11a ด้วย ปัจจุบันผลิตภัณฑ์อุปกรณ์เครือข่ายไร้สายภายใต้มาตรฐานนี้ได้รับการผลิตออกมาเป็นจำนวนมาก โดยอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้ก็เช่น IEEE 802.11 Bluetooth โทรศัพท์ไร้สาย และเตาไมโครเวฟ และที่สำคัญแต่ละผลิตภัณฑ์มีความสามารถทำงานร่วมกันได้ อุปกรณ์ของผู้ผลิตทุกยี่ห้อต้องผ่านการตรวจสอบจากสถาบัน Wi-Fi Alliance เพื่อตรวจสอบมาตรฐานของอุปกรณ์และความเข้ากันได้ของแต่ละผู้ผลิต ปัจจุบันนี้นิยมนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ WLAN ที่มาตรฐาน 802.11b ไปใช้ในองค์กรธุรกิจ สถาบันการศึกษา สถานที่สาธารณะ และ กำลังแพร่เข้าสู่สถานที่พักอาศัยมากขึ้น มาตรฐานนี้มีระบบเข้ารหัสข้อมูลแบบ WEP ที่ 128 บิต

IEEE 802.11g เสร็จสมบูรณ์ในปี ค.ศ. 2003 ทางคณะกรรมการ IEEE 802.11g ได้นำเอาเทคโนโลยี OFDM ของ 802.11a มาพัฒนาบนความถี่ 2.4 GHz จึงทำให้ใช้ความเร็ว 36-54 Mbps ซึ่งเป็นความเร็วที่สูงกว่ามาตรฐาน 802.11b ซึ่ง 802.11g สามารถปรับระดับความเร็วในการสื่อสารลงเหลือ 2 Mbps ได้ตามสภาพแวดล้อมของเครือข่ายที่ใช้งาน มาตรฐานนี้เป็นที่ยอมรับจากผู้ใช้เป็นจำนวนมากและกำลังจะเข้ามาแทนที่ 802.11b ในอนาคตอันใกล้

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ยังมีบางผลิตภัณฑ์ใช้เทคโนโลยีเฉพาะตัวเข้ามาเสริม ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 54 Mbps เป็น 108 Mbps แต่ต้องทำงานร่วมกันเฉพาะอุปกรณ์ที่ผลิตจากบริษัทเดียวกันเท่านั้น ซึ่งความสามารถนี้เกิดจากชิป (Chip) กระจายสัญญาณของตัวอุปกรณ์ที่ผู้ผลิตบางรายสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณเป็น 2 เท่าของการรับส่งสัญญาณได้แต่ปัญหาของการกระจายสัญญาณนี้จะมีผลทำให้อุปกรณ์ไร้สายในมาตรฐาน 802.11b มีประสิทธิภาพลดลงด้วยเช่นกัน

IEEE 802.11n เสร็จสมบูรณ์ในปี ค.ศ. 2009 ทำงานบนย่านความถี่ 2.4 และ 5 GHz โดยที่สามารถให้อัตราการส่งถ่ายข้อมูลสูงสุดถึง 300 Mbps มีความสามารถในการส่งคลื่นสัญญาณได้ระยะประมาณ 70 เมตร ในโครงสร้างปิด และ 250 เมตร ในที่โล่งแจ้ง เพิ่มความสามารถในการกันสัญญาณกวนจากอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ความถี่ 2.4 GHz เหมือนกัน และสามารถรองรับอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ได้

802.11-2012 ในปี ค.ศ. 2007 กลุ่มงาน TGmb ได้รับการอนุมัติให้รวบรวมการแก้ไขทั้งหมดให้เป็นเวอร์ชันที่เรียกว่า REVmb หรือ 802.11mb ที่ประกอบด้วย 802.11k r y n w p z v u s ตีพิมพ์วันที่ 29 มีนาคม 2012

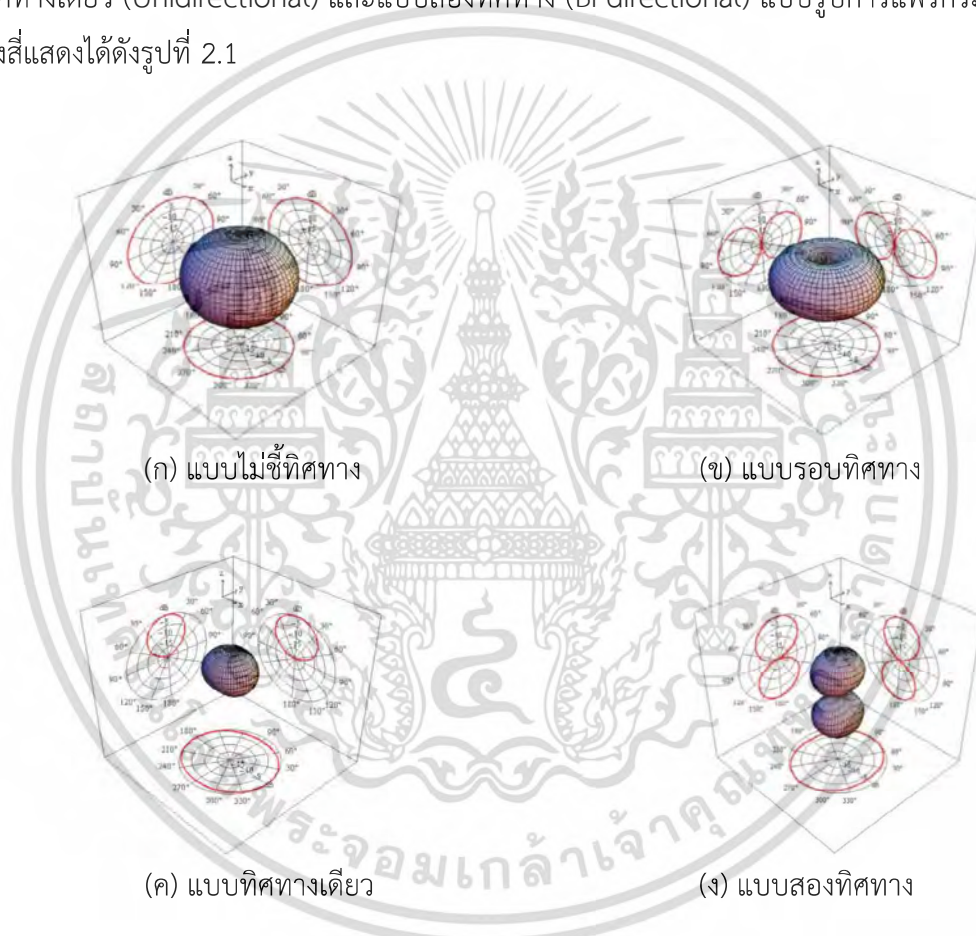
802.11ac เป็นมาตรฐานที่ 5 GHz ให้ throughput กับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบหลายสถานีสูงกว่าอย่างน้อย 1 Gbps และสำหรับลิงก์เดียวอย่างน้อย 500 Mbps โดยการใช้ RF แบนด์วิดท์ที่กว้างกว่า (80 หรือ 160 MHz) สตรีมมากกว่า (สูงถึง 8 สตรีม) และมอดูเลทที่มีความจุสูงกว่า (สูงถึง 256 QAM)

802.11ad หรือ WiGig เกิดจากการผลักดันจากผู้ผลิตฮาร์ดแวร์ ในวันที่ 24 กรกฎาคม 2012 Marvell และ Wilocity ได้ประกาศการเป็นคู่ค้าใหม่เพื่อนำ WiFi solution แบบ Tri-band ใหม่ออกสู่ตลาด โดยการใช้ความถี่ที่ 60 GHz ทรุพทะทางทฤษฎีสูงสุดถึง 7 Gbps มาตรฐานนี้จะออกสู่ตลาดได้ราวต้นปี 2014

2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและโพลาริซ

2.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

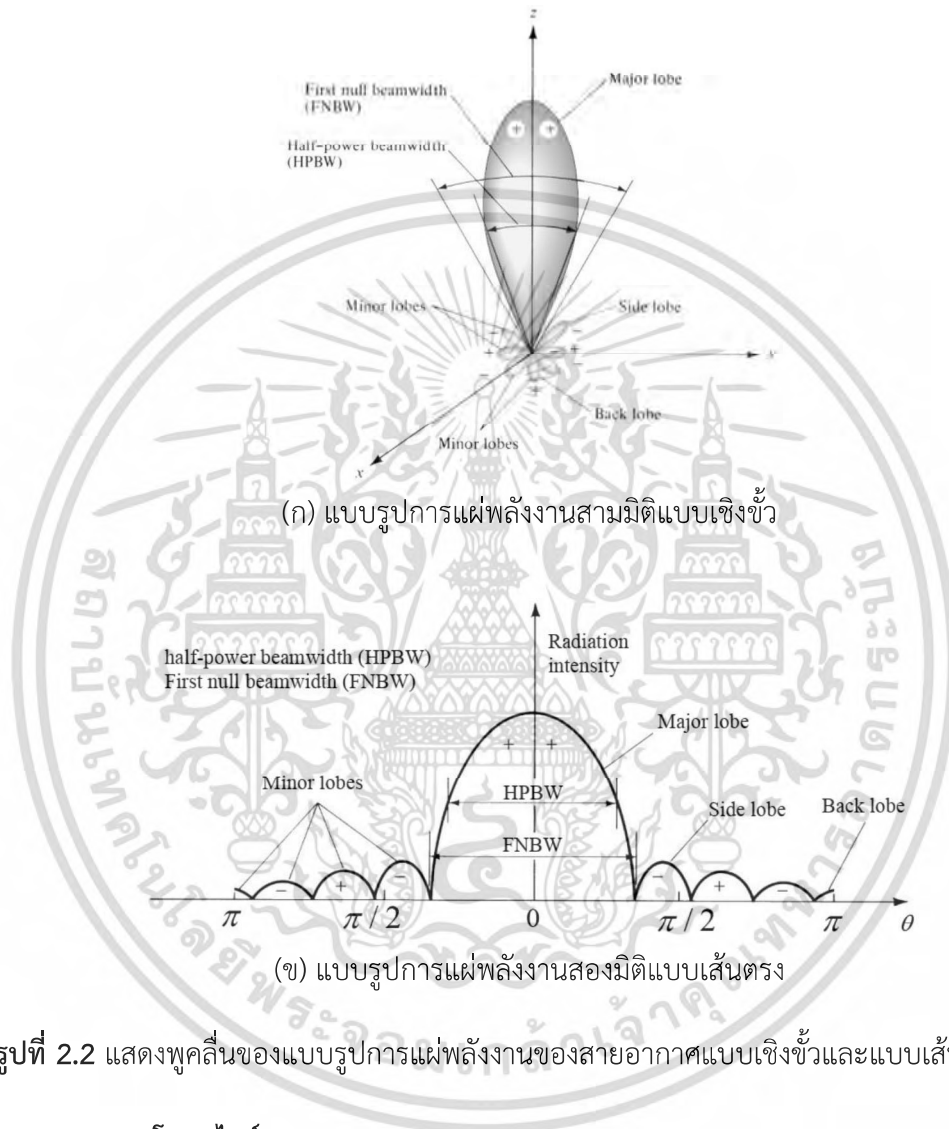
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นประโยชน์ในการประกอบการพิจารณานำสายอากาศไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสม แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีหลายลักษณะ เช่น แบบรูปโพลาริเซชันและแบบรูปสภาพเจาะจงทิศทาง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เป็นการแสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศด้วยกราฟใช้เป็นการระบุทิศทางและหาได้จากสนามระยะไกล แบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ คือ แบบไม่ชี้ทิศทาง (Non-directional) แบบรอบตัว (Omnidirectional) แบบทิศทางเดียว (Unidirectional) และแบบสองทิศทาง (Bi-directional) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งสี่แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ [16]

การวัดระดับสัญญาณที่ชี้ไปในทิศทางต่างๆ ในแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะมีระดับสัญญาณที่มีค่าสูงสุดเรียกว่า ลำคลื่นหลัก (Major Lobe) ส่วนระดับสัญญาณอื่นเรียกว่า ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) โดยที่ยังแบ่งลำคลื่นย่อยออกตามตำแหน่งที่ปรากฏ คือ ลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe) และลำคลื่นย่อยด้านหลัง (Back Lobe) ซึ่งลำคลื่นย่อยเป็นทิศทางการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ตรงกับกรอกแบบสายอากาศที่ต้องการ รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของลำคลื่นสายอากาศ ในการพิจารณาความสามารถในการครอบคลุมพื้นที่ของสัญญาณจะพิจารณาจากความเอกสาร์นเป็นเอกสาร์นที่สวอนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้างของลำคลื่น การวัดความกว้างของลำคลื่นที่นิยมใช้มี 2 แบบ คือ 1).ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beam Width: HPBW) เป็นการวัดความกว้างลำคลื่นตรงช่วงตำแหน่งที่กำลังคลื่นลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังสูงสุด และ 2).ความกว้างลำคลื่น ณ จุดศูนย์คู่แรก (First Null Beam Width: FNBW) เป็นการวัดความกว้างของลำคลื่นตรงช่วงตำแหน่งที่กำลังคลื่นเป็นศูนย์ในครั้งแรก



รูปที่ 2.2 แสดงพหุคลื่นของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบเชิงขั้วและแบบเส้นตรง [16]

2.2.2 โพลารไรซ์

โพลารไรซ์ (Polarize) เป็นการอธิบายเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่แปรผันตามเวลาของลำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป โพลารไรซ์จะเป็นการสังเกตยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ กันในตำแหน่งคงที่และใช้การมองตามหลังคลื่นที่แพร่กระจายไป ในการกำหนดทิศทางโพลารไรซ์ของสายอากาศ จะเป็นโพลารไรซ์ของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศจากทิศทางที่กำหนดให้ ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางจะใช้ทิศทางที่สายอากาศมีอัตราการขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลารไรซ์ของสายอากาศตัวเดียวกันจะต่างกันเมื่อกำหนดทิศทางที่ไม่เหมือนกัน สมการที่ 2.1 เป็นสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลาของคลื่นระนาบในทิศทาง z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

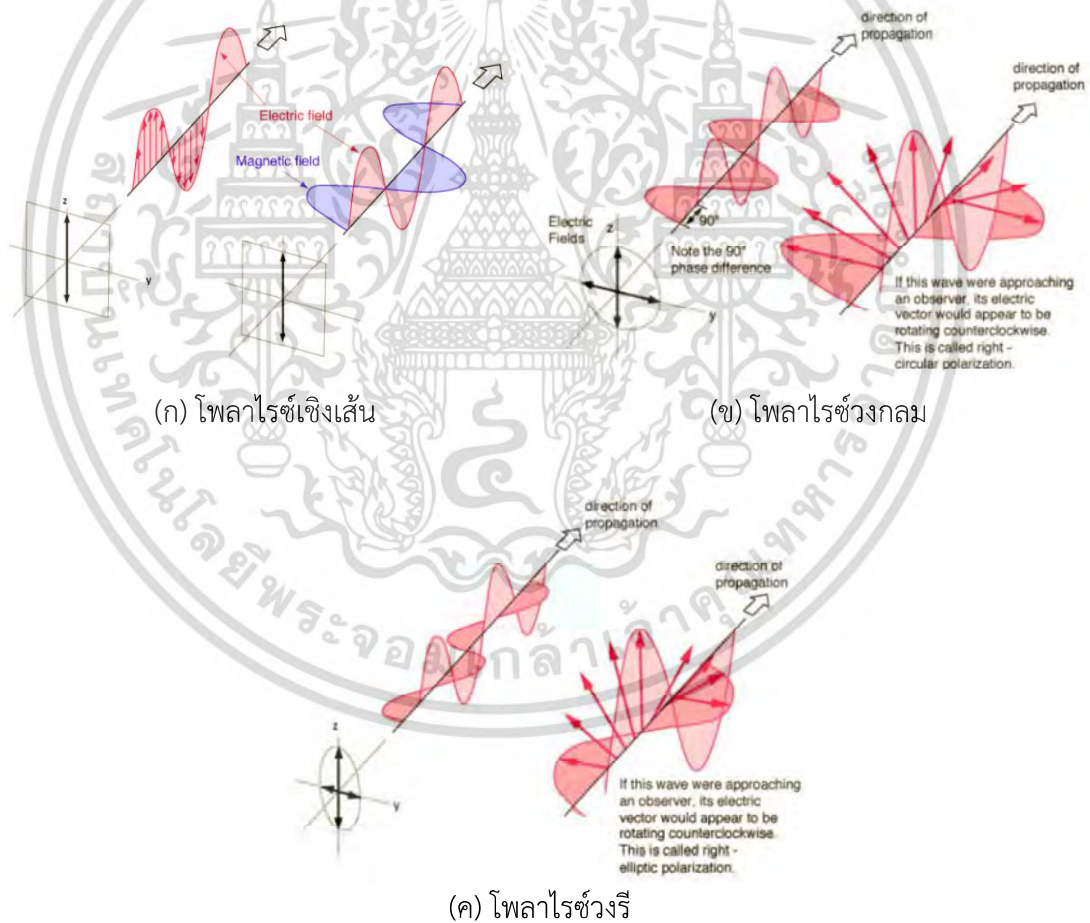
$$E(z;t) = \hat{a}_x E_x(z;t) + \hat{a}_y E_y(z;t) \quad (2.1)$$

โดยส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลานั้นแสดงเป็นความสัมพันธ์ของค่าสนามสูงสุด E_{x0} และ E_{y0} ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ดังนี้

$$E_x(z;t) = E_{x0} \cos(\omega t + kz + \phi_x) \quad (2.2)$$

$$E_y(z;t) = E_{y0} \cos(\omega t + kz + \phi_y) \quad (2.3)$$

โพลาไรซ์ของสายอากาศจะเป็นเงื่อนไขสำคัญในการเลือกใช้งานและการติดตั้ง ชนิดของโพลาไรซ์แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ 1).โพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear Polarization) 2).โพลาไรซ์วงกลม (Circular Polarization) และ 3).โพลาไรซ์วงรี (Elliptical Polarization) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

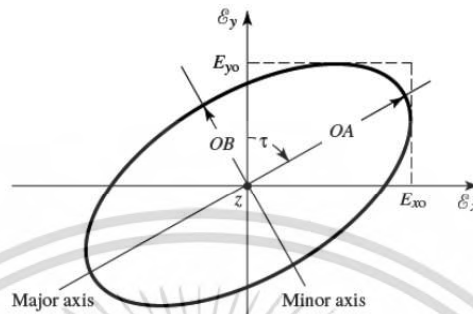


รูปที่ 2.3 ประเภทโพลาไรซ์ของสายอากาศ [19]

การจำแนกชนิดของโพลาไรซ์จะพิจารณาได้จากค่าอัตราส่วนแกน (Axial Ratio: AR) โดย
 เอกสารนี้ เป็นเอกสาร วิศวกรรมไฟฟ้า สำหรับการปฏิบัติงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AR = \frac{\text{Major axis}}{\text{Minor axis}} = \frac{OA}{OB} = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} \quad (2.4)$$

โดยที่ OA คือ แกนหลัก และ OB คือ แกนรอง แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แกนหลักและแกนรองของโพลาริซ [16]

เมื่อพิจารณาจากค่าอัตราส่วนแกนแล้วจะพบว่า การแบ่งประเภทของโพลาริซทั้งสามมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนแกนดังนี้

1). โพลาริซเชิงเส้น จะมีเพียงค่า $|E|_{\max}$ เนื่องจาก $|E|_{\min} = 0$ ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนแกนเป็น

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

2). โพลาริซวงกลม จะมีค่า $|E|_{\max} = |E|_{\min}$ ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนแกนเป็น

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

3). โพลาริซวงรี จะมีค่า $|E|_{\max} > |E|_{\min}$ ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนแกนเป็น

$$1 < AR < \infty$$

2.2.2.1 โพลาริซเชิงเส้น

โพลาริซเชิงเส้นจะมีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าคงที่ตลอดในการเดินทางของคลื่นองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในทิศทาง x และ y จะมีเฟสที่ตรงกัน หรือต่างเฟสกัน 180 องศา แสดงได้สมการที่ 2.4

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลาไรซ์เชิงเส้นแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบตามทิศทางของสนามไฟฟ้าตลอดการเดินทางของคลื่นในแนวตั้ง แนวนอน และแนวเฉียง คือ โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง (Vertical Polarization) โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอน (Horizontal Polarization) และโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวเฉียง (Slant Polarization) ตามลำดับ

2.2.2.2 โพลาไรซ์วงกลม

โพลาไรซ์วงกลมจะมีการเปลี่ยนแปลงของทิศทางสนามไฟฟ้าตลอดเวลา การเกิดโพลาไรซ์วงกลมจะต้องมีองค์ประกอบสนามไฟฟ้าแบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบที่มีขนาดเท่ากัน และต่างเฟสกันเป็นจำนวนเท่าของ $\pi/2$ นั่นคือ E_{x0} จะเท่ากับ E_{y0} และ

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+4n)\pi}{2}, n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.6)$$

หรือ

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\frac{(1+4n)\pi}{2}, n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 ทำให้โพลาไรซ์วงกลมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดตามการหมุนของคลื่นเป็น โพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา (Right-handed Circular Polarization) เป็นการหมุนของสนามไฟฟ้าตามเข็มนาฬิกา และโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย (Left-handed Circular Polarization) เป็นการหมุนของสนามไฟฟ้าทวนเข็มนาฬิกา

2.2.2.3 โพลาไรซ์วงรี

โพลาไรซ์วงรีจะมีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าตลอดเวลาเหมือนกับโพลาไรซ์วงกลม การเกิดโพลาไรซ์วงรีได้แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ 1) มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าแบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบที่มีขนาดเท่ากัน และมีเฟสที่ต่างกันไม่เป็นจำนวนเท่าของ $\pi/2$ และ 2) มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าแบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบที่มีขนาดไม่เท่ากัน และมีเฟสที่ต่างกันไม่เป็นจำนวนเท่าของ π

2.3 สายอากาศไมโครสตริบ

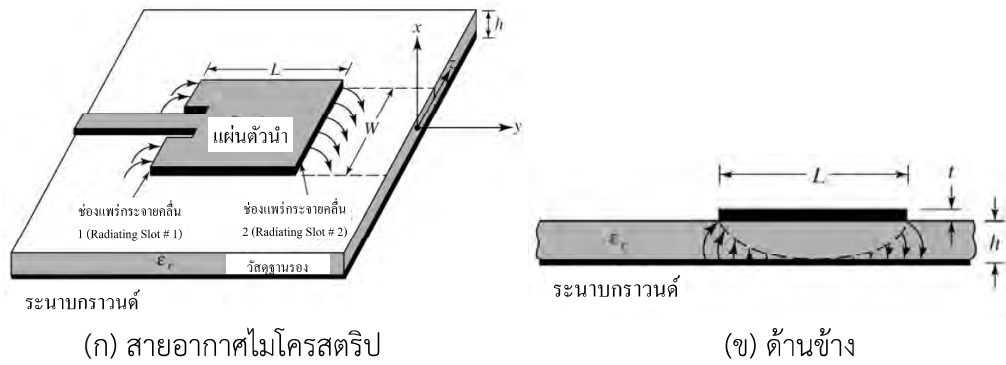
ในการประยุกต์สายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้งานด้านอากาศยาน ยานอวกาศ ดาวเทียม และจรวด มักจะมีเงื่อนไขมากมายเกี่ยวกับคุณลักษณะของสายอากาศ เช่น ขนาด น้ำหนัก ราคา ประสิทธิภาพ ลักษณะการติดตั้ง ลักษณะรูปร่าง และลักษณะทางแอร์โรไดนามิก ฉะนั้นสายอากาศที่มีรายละเอียดน้อย (Low-profile Antennas) จึงเป็นที่ต้องการอย่างมาก ในปัจจุบันก็ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่น โทรศัพท์ไร้สาย และระบบการสื่อสารไร้สาย ซึ่งมีความต้องการที่สอดคล้องกัน เพื่อที่จะออกแบบและสร้างสายอากาศให้ได้ตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้องการ สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antennas) จึงเป็นสายอากาศที่จะสามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้ สายอากาศชนิดนี้มีรายละเอียดน้อย เหมาะสำหรับติดตั้งบนพื้นผิวที่มีลักษณะราบเรียบและโค้งงอ สามารถสร้างได้ง่ายและราคาไม่แพงด้วยเทคโนโลยีของแผ่นวงจรพิมพ์ ทั้งยังสามารถเข้ากันได้กับการออกแบบ MMIC สายอากาศชนิดนี้สามารถออกแบบให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้หลากหลายไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติของ ความถี่เรโซแนนซ์ โพลาริเซชัน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และค่าอิมพีแดนซ์ ยิ่งไปกว่านั้นสายอากาศชนิดนี้ยังสามารถที่จะทำการเพิ่มโหนดระหว่างแผ่นและระนาบกราวนด์ได้ ยกตัวอย่างเช่น ฟินไดโอด วาแรกเตอร์ไดโอด และองค์ประกอบที่สามารถปรับตัวได้ เพื่อที่จะใช้ในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของความถี่เรโซแนนซ์ อิมพีแดนซ์ โพลาริเซชัน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

อย่างไรก็ตามข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป คือ เป็นสายอากาศที่มีประสิทธิภาพต่ำ รองรับกำลังงานต่ำ มีค่า Q สูง มีลักษณะของโพลาริเซชันที่ไม่บริสุทธิ์ เกิดการกระจายคลื่น แปรกลปลงจากจุดบ่อนสัญญาณและตอบสนองช่วงกว้างความถี่แคบ แต่อย่างไรก็ตามมีหลากหลายเทคนิคที่สามารถใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ได้ซึ่งจะกล่าวต่อไป

2.3.1 ลักษณะเบื้องต้นของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปเริ่มเป็นที่สนใจมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.5 ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นโลหะบาง ($t \ll \lambda_0$ เมื่อ λ_0 คือค่าความยาวคลื่นในอากาศ) วางอยู่บนระนาบกราวนด์ด้วยระยะที่น้อยกว่าความยาวคลื่น ($h \ll \lambda_0$ โดยปกติแล้วจะอยู่ในช่วง $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$) โดยปกติแล้วสายอากาศไมโครสตริปจะถูกออกแบบให้มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นโลหะหรือตัวแพร่กระจายคลื่น (แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบบรอดไซด์) ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับลักษณะการบ่อนสัญญาณเข้าไปยังแผ่นโลหะ ในกรณีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบเอนด์ไฟร์ก็เช่นเดียวกัน ตัวอย่างในรูปที่ 2.5 (ก) เป็นสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีความยาวขององค์ประกอบเท่ากับ L โดยปกติแล้วจะมีค่าอยู่ในช่วง $\lambda_0/3 \leq L \leq \lambda_0/2$ และแผ่นโลหะจะถูกแยกออกจากระนาบกราวนด์ด้วยวัสดุฐานรองที่มีลักษณะเป็นแผ่นไดอิเล็กตริก



(ก) สายอากาศไมโครสตริป

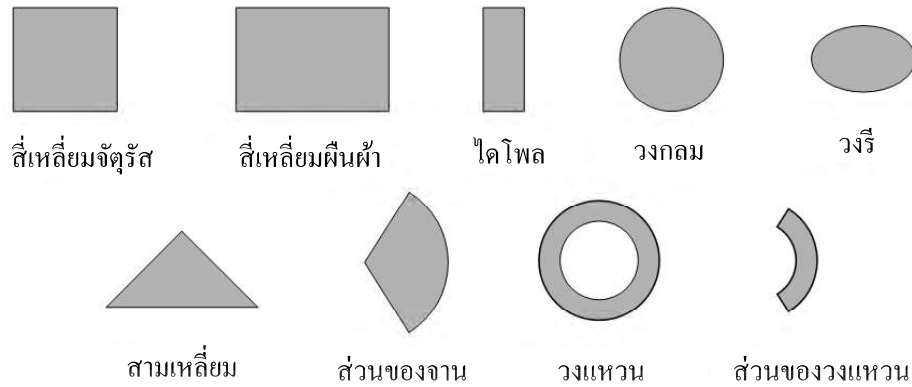
(ข) ด้านข้าง

(ค) ระบบพิกัดของช่องแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 2.5 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปนั้นวัสดุฐานรองหลากหลายชนิดให้เลือกใช้งาน โดยจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอยู่ในช่วง $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ ซึ่งวัสดุฐานรองที่มักจะเป็นที่ที่ต้องการในการออกแบบสายอากาศเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงคือวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำกว่าช่วงดังกล่าว ซึ่งจะมีผลทำให้ได้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ช่วงกว้างความถี่ที่กว้างกว่า แต่ก็จะมีขนาดที่ใหญ่มากขึ้น ส่วนวัสดุฐานรองที่มีความบางและมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงนั้นมักจะถูกนำไปใช้ในงานด้านวงจรไมโครเวฟเนื่องจากต้องการการควบคุมสนามไม่ให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นและการคับปลิง จึงเป็นผลให้ขนาดของตัวนำนั้นเล็กลง แต่อย่างไรก็ตามจะทำให้เกิดการสูญเสียสูง มีประสิทธิภาพต่ำและมีช่วงกว้างความถี่แคบ ดังนั้นจึงทำให้สายอากาศไมโครสตริปนิยมนำไปเชื่อมต่อกับวงจรไมโครเวฟ

บ่อยครั้งที่สายอากาศไมโครสตริปถูกกล่าวถึงในลักษณะของสายอากาศแบบแผ่น (Patch Antenna) โดยองค์ประกอบการแพร่กระจายคลื่นและสายส่งสำหรับการป้อนสัญญาณมักจะอยู่บนวัสดุฐานรอง ส่วนแผ่นตัวนำนั้นสามารถเป็นได้ทั้งแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า แผ่นบาง วงกลม วงรี สามเหลี่ยมและอื่นๆ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปทรงต่างๆ ของแผ่นไมโครสตริป

2.3.2 หลักการป้อนสัญญาณ

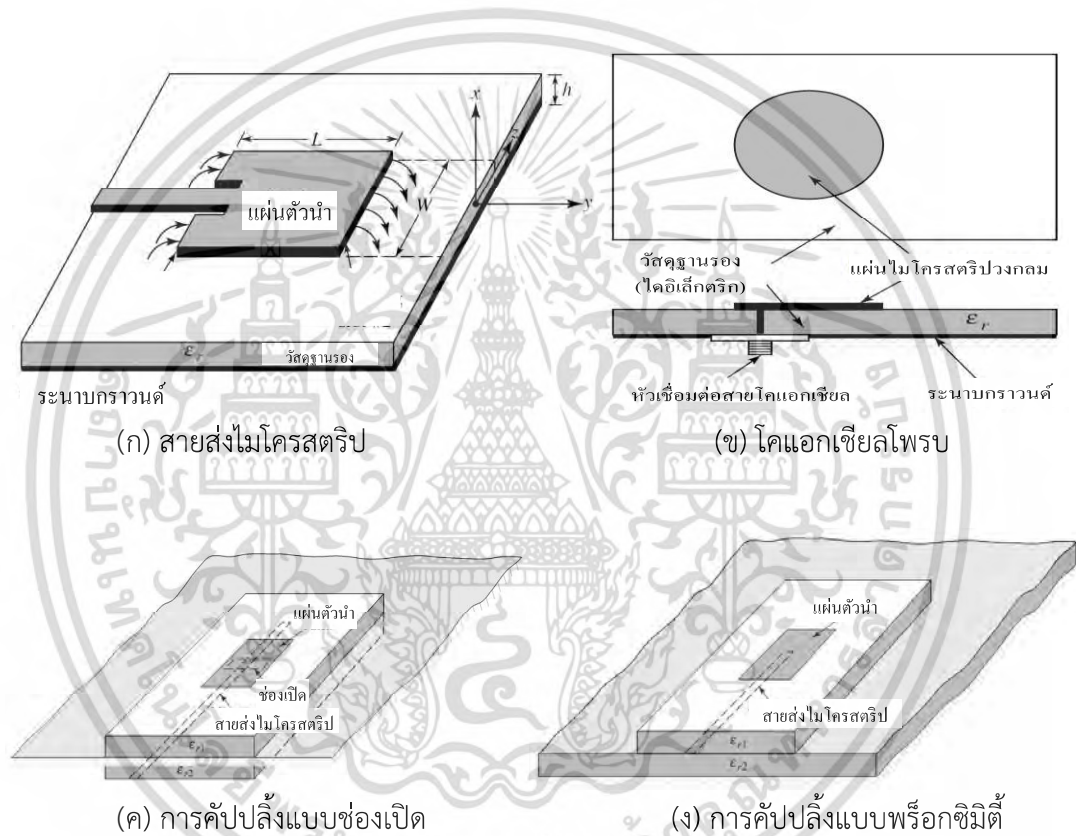
หลักการป้อนสัญญาณให้สายอากาศไมโครสตริปนั้นมีหลายวิธีการ แต่ก็มีเพียงสี่วิธีการที่เป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบสายอากาศคือ สายส่งไมโครสตริป (Microstrip Line) โคแอกเซียลโพรบ (Coaxial Probe) การคัปปลิงแบบช่องเปิด (Aperture Coupling) และการคัปปลิงแบบพร็อกซิมิตี (Proximity Coupling) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และลักษณะของวงจรสมมูลของวงจรป้อนสัญญาณแสดงในรูปที่ 2.8 การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริปนั้นโดยปกติแล้วจะมีขนาดความกว้างน้อยกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของแผ่นสายอากาศ แต่การป้อนสัญญาณชนิดนี้สามารถสร้างได้ง่ายและสามารถปรับจูนเพื่อให้เกิดการแมตช์ได้ง่าย แต่เมื่อความหนาของวัสดุฐานรองมีความหนาเพิ่มขึ้นจะทำให้คลื่นผิว (Surface Wave) และเกิดคลื่นแปลกปลอมมากขึ้นที่จุดป้อนสัญญาณจึงเป็นผลทำให้มีความกว้างแถบความถี่แคบลง

การป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบ เมื่อตัวนำในของสายโคแอกเซียลถูกเชื่อมต่อกับแผ่นสายอากาศและตัวนำนอกถูกเชื่อมต่อกับระนาบกราวด์ซึ่งเป็นชนิดที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง และสามารถสร้างได้ง่ายเช่นเดียวกันและมีการรบกวนน้อย แต่อย่างไรก็ตามจะมีความกว้างแถบความถี่แคบและยากต่อการจำลองแบบโดยเฉพาะที่ความหนาของวัสดุฐานรอง ($h > 0.02\lambda_0$)

การป้อนสัญญาณทั้งสองแบบนี้ทั้งที่เป็นแบบสายส่งไมโครสตริปและโพรบจะมีลักษณะเป็นแบบไม่สมมาตรซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบครอสโพลาริเซชัน เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว การป้อนสัญญาณแบบไม่สัมผัสด้วยคัปปลิงช่องเปิด (Aperture-coupling Feed) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ค) และ (ง) ตามลำดับ การป้อนสัญญาณแบบคัปปลิงช่องเปิดในรูปที่ 2.8 (ค) จะสามารถสร้างได้ยากเมื่อเทียบกับทั้งสี่แบบดังรูปและให้แถบความถี่ที่แคบ ซึ่งจะประกอบไปด้วยวัสดุฐานรองแทรกด้วยระนาบกราวด์ ใต้วัสดุฐานรองด้านล่างจะมีสายส่งไมโครสตริปเพื่อนำส่งสัญญาณไปคัปปลิงสู่แผ่นสายอากาศผ่านช่องเปิดที่อยู่ในระนาบกราวด์ โดยทั่วไปแล้วในการออกแบบจะใช้วัสดุฐานรองด้านล่าง โดยใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีค่าสูงและวัสดุฐานรองด้านบนจะใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีค่าต่ำ และมีระนาบกราวด์ที่อยู่ระหว่างวัสดุฐานรองเพื่อใช้

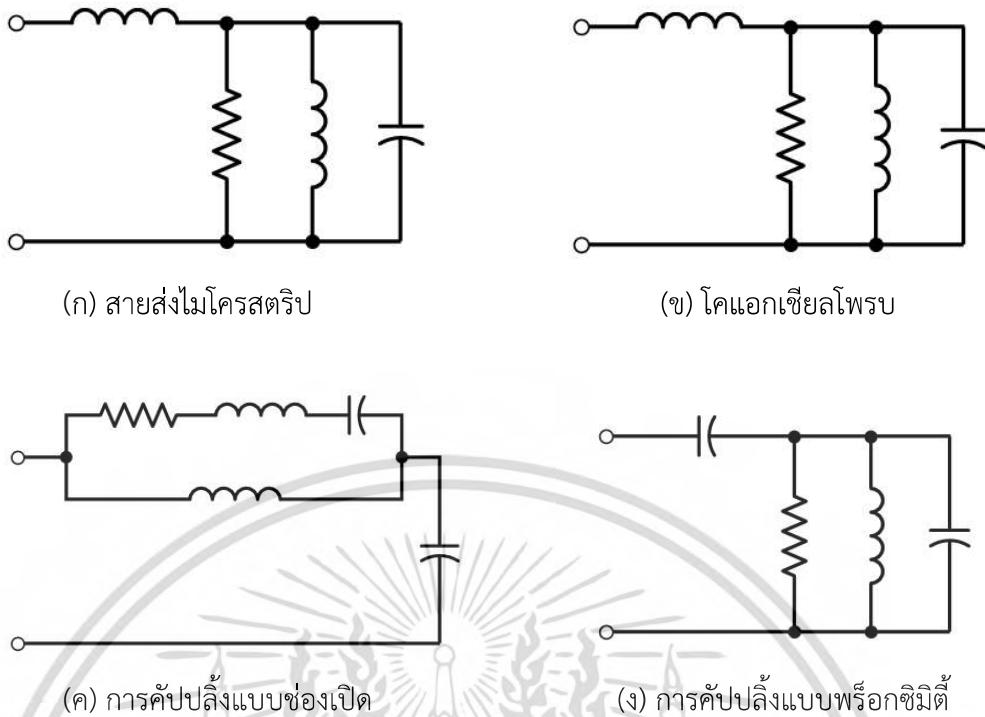
แยกการป้อนสัญญาณออกจากองค์ประกอบการแพร่กระจายคลื่นและเพื่อลดการแทรกสอดของคลื่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงปลอมและทำให้โพลาริเซชันมีลักษณะบริสุทธิ์ โดยทั่วไปการแมตซ์นี้จะสามารถทำได้ด้วยการปรับความกว้างของสายป้อนสัญญาณและความยาวของช่องเปิด การคัปปลิงผ่านช่องเปิดสามารถจำลองได้โดยใช้ทฤษฎีของ Bethe ซึ่งจะใช้ในการคัปปลิงผ่านช่องเปิดที่มีขนาดเล็กบนแผ่นตัวนำ ทฤษฎีนี้สามารถใช้ได้ดีในการวิเคราะห์ที่อนาคินที่มีการคัปปลิงผ่านรู ในทฤษฎีนี้จะวิเคราะห์ช่องเปิดให้เป็นไดโพลไฟฟ้าที่ตั้งฉาก และไดโพลแม่เหล็กในแนวนอนที่อยู่ในแนวเส้นสัมผัส แต่อย่างไรก็ตามในการป้อนสัญญาณทั้งสี่แบบที่แสดงในรูปนั้นการคัปปลิงแบบพรีอักษิมีดีี้จะมีความกว้างแถบความถี่มากที่สุด สร้างได้ง่ายและมีการแพร่แปลงปลอมน้อย ในส่วนของการควบคุมการแมตซ์จะควบคุมด้วยการปรับความยาวของสตัปและอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของช่องแผ่นสายอากาศ



รูปที่ 2.7 หลักการป้อนสัญญาณให้สายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของการบ่อนสัญญาณแต่ละชนิด

2.3.3 วิธีการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปนั้นมีหลากหลายวิธีที่นิยมใช้กัน โดยเทคนิคที่นิยมใช้กันคือ รูปแบบสายส่งสัญญาณ (Transmission Line Model) รูปแบบควาวิตี้ (Cavity Model) และทฤษฎีการวิเคราะห์แบบเต็มคลื่น (Full Wave Analysis Method) เช่น วิธีโมเมนต์ (Method of Moments) และวิธีสมการเชิงอินทิกรัล (Integral Equation) แต่อย่างไรก็ตามวิธีที่ง่ายที่สุดคือรูปแบบสายส่งสัญญาณ ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถอธิบายกลไกการทำงานได้ดีแต่มีความเที่ยงตรงค่อนข้างน้อยและยากต่อการจำลองการคัปปลิง ในขณะที่เดียวกันเมื่อเทียบกับรูปแบบสายส่งสัญญาณนั้นรูปแบบควาวิตี้จะค่อนข้างมีความเที่ยงตรงมากกว่าแต่มีความซับซ้อนมากกว่า แต่ก็ยังคงมีลักษณะคล้ายกันคือสามารถอธิบายกลไกการทำงานได้ดีและยากต่อการจำลองการคัปปลิง โดยทั่วไปแล้วการใช้วิธีการวิเคราะห์แบบเต็มคลื่นนั้นจะมีความเที่ยงตรงมากกว่าทั้งสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่เป็นตัวเดียวและแบบแถวลำดับ หรือการวิเคราะห์การคัปปลิงต่างๆ แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือไม่สามารถอธิบายกลไกการทำงานของคลื่นได้และความซับซ้อนในการคำนวณมากกว่า

2.3.4 แผ่นสื่อนำไฟฟ้า

จากโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบสื่อนำไฟฟ้ามีความนิยมในการใช้งานกันอย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถวิเคราะห์ได้ง่ายด้วยทั้งสองวิธีคือ รูปแบบสายส่งสัญญาณ และรูปแบบควาวิตี้ ซึ่งมีความถูกต้องมากสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่มีวัสดุฐานรองบาง

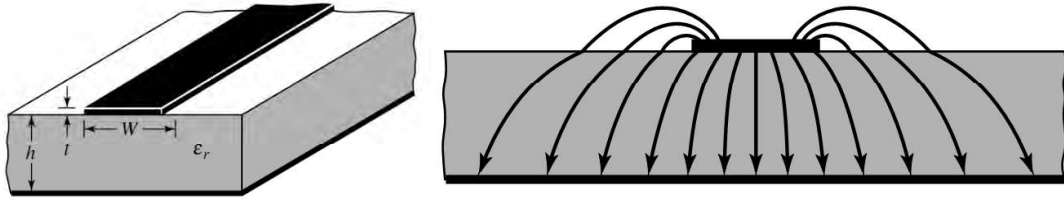
2.3.4.1 รูปแบบสายส่งสัญญาณ

1). Fringing Effects

เนื่องจากมิติของแผ่นไมโครสตริปนั้นมีขนาดจำกัดทั้งด้านกว้างและด้านยาว สนามที่ขอบของแผ่นจะเกิด Fringing Effects ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 ปริมาณของผลกระทบฟรินจี้จะเป็นฟังก์ชันของขนาดของแผ่นและความสูงของวัสดุฐานรอง สำหรับระนาบสนามไฟฟ้า (E -plane) ที่เป็นระนาบหลัก (xy -plane) ผลกระทบนี้จะเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความยาวของแผ่น (L) ต่อความสูง (h) ของวัสดุฐานรอง (L/h) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ดังนั้นสำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่มี $L/h \gg 1$ จะทำให้ผลกระทบนี้ลดน้อยลง แต่อย่างไรก็ตาม ผลกระทบนี้ก็ยังถูกพิจารณาเพราะเกิดจากผลของความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ

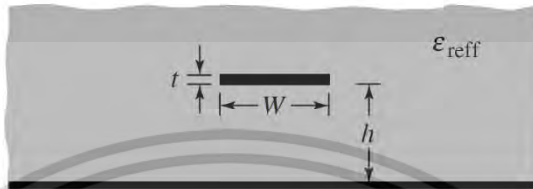
สำหรับไมโครสตริปที่เป็นสายนำสัญญาณดังรูปที่ 2.9 (ก) โดยทั่วไปเส้นสนามไฟฟ้าถูกแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) ซึ่งเป็นเส้นของสนามที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุฐานรองสองส่วนโดยทั่วไปคือ วัสดุฐานรองและอากาศ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นสนามไฟฟ้าจะอยู่ในวัสดุฐานรองเป็นส่วนใหญ่และบางส่วนจะอยู่ในอากาศ เมื่อ $W/h \gg 1$ และ $\epsilon_r \gg 1$ เส้นสนามไฟฟ้าจะรวมกันอยู่ในวัสดุฐานรองผลกระทบในกรณีนี้เมื่อใช้สร้างสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปจะทำให้ขนาดทางไฟฟ้าใหญ่กว่าขนาดจริง ดังนั้นการเดินทางของคลื่นในวัสดุฐานรองและในอากาศ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant: ϵ_{eff}) จะถูกพิจารณาสำหรับผลกระทบดังกล่าวและคลื่นที่เดินทางในสายนำสัญญาณ

ก่อนอื่นจะกล่าวถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล เมื่อมีสายนำสัญญาณไมโครสตริปวางอยู่บนระนาบกราวนด์ ซึ่งแทรกตัวอยู่ภายในวัสดุฐานรองดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ค) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลจะถูกนิยามไว้ว่าเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกที่เป็นแบบยูนิฟอร์ม ดังนั้นสายนำสัญญาณในรูปที่ 2.9 (ค) จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เหมือนกัน มีค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น ดังเช่นสายนำสัญญาณในรูปที่ 2.9 (ก) สำหรับสายนำสัญญาณที่วางอยู่ระหว่างอากาศกับวัสดุฐานรองค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลจะมีค่าอยู่ในช่วง $1 < \epsilon_{eff} < \epsilon_r$ สำหรับการประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่เมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่ามากกว่า 1 มากๆ ($\epsilon_r \gg 1$) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลจะมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่แท้จริงของวัสดุฐานรอง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลจึงเป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อความถี่ใช้งานเพิ่มสูงขึ้นเส้นสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่ก็จะอยู่ในวัสดุฐานรอง ฉะนั้นจึงทำให้ไมโครสตริปเสมือนเป็นสายนำสัญญาณที่อยู่ในวัสดุฐานรองเพียงอย่างเดียว และจากการที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความถี่ใช้งานรูปที่ 2.10 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองที่แตกต่างกันสามชนิด



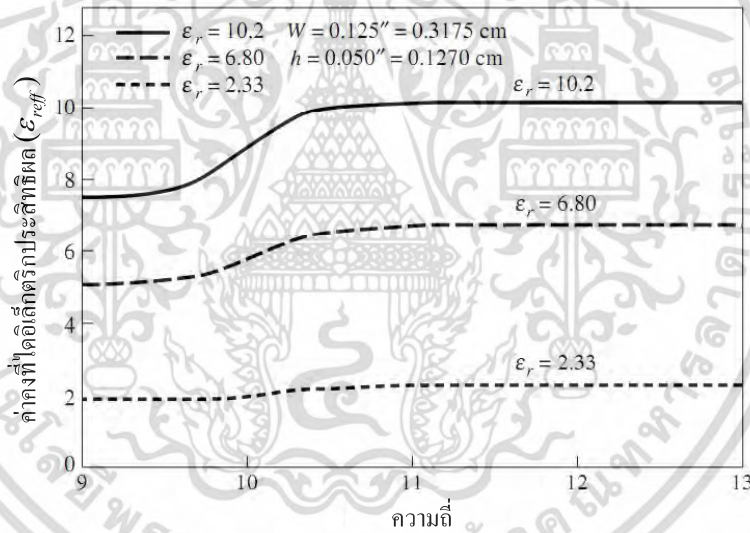
(ก) สายนำสัญญาณไมโครสตริป

(ข) เส้นสนามไฟฟ้า



(ค) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล

รูปที่ 2.9 สายนำสัญญาณไมโครสตริปและเส้นสนามไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล



รูปที่ 2.10 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลต่อความถี่สำหรับวัสดุฐานรองชนิดต่างๆ

สำหรับความถี่ต่ำ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลจะมีค่าคงที่ที่ความถี่กลาง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลจะเริ่มที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง ซึ่งค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (ที่ความถี่ต่ำ) จะพิจารณาที่ค่าคงที่โดย $W/h > 1$ จะได้ว่า

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2). ความยาวประสิทธิผล ความถี่เรโซแนนซ์ และความกว้างประสิทธิผล

เนื่องจาก Fringing Effects ทำให้ขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปค่อนข้างมากกว่าขนาดจริง สำหรับระนาบสนามไฟฟ้า (xy -plane) ได้แสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อขนาดความยาวของแผ่นถูกขยายออกไปด้วยค่าเท่ากับ ΔL ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลและอัตราส่วนความกว้างต่อความสูง (W/h) ทำให้ในทางปฏิบัติมีการประมาณค่าความยาวโดย

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.9)$$

ดังนั้นค่าความยาวของแผ่นจะถูกขยายออกไปด้วยค่า ΔL ในแต่ละด้าน ($L = \lambda/2$ สำหรับโหมดหลัก TM_{010} เมื่อไม่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล)

สำหรับโหมดหลัก TM_{010} ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปเป็นฟังก์ชันของความยาวโดยทั่วไปคือ

$$f_{10} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.10)$$

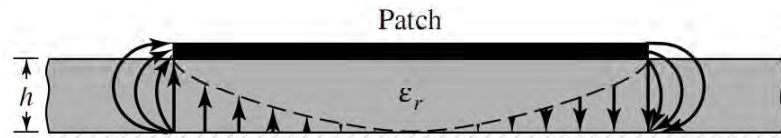
เมื่อ f_{10} คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของโหมด TM_{10}
 L คือ ความยาวของแผ่นแพตช์
 ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permittivity)



(ก) ด้านบน

รูปที่ 2.11 ความยาวและความยาวประสิทธิผลของแผ่นไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 2.11 ความยาวและความยาวประสิทธิภาพของแผ่นไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ต่อ)

3).การออกแบบ

จากสมการอย่างง่ายที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ ลำดับขั้นตอนการออกแบบจะกล่าวถึงสำหรับสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยในขั้นตอนจะประกอบไปด้วย ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (ϵ_r) ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และความสูงของวัสดุฐานรอง (h) มีขั้นตอนดังนี้

กำหนดค่า ϵ_r , f_r (Hz) และ h แล้วคำนวณค่า W และ L

1).เพื่อให้ตัวแพร่กระจายคลื่นมีประสิทธิภาพ ความกว้างของแผ่นจะต้องทำให้เกิดค่าประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ดี คำนวณจาก

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.11)$$

โดย v_0 คือ ความเร็วแสง และ W_0 คือ ความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

2).คำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปด้วยสมการที่ 2.8

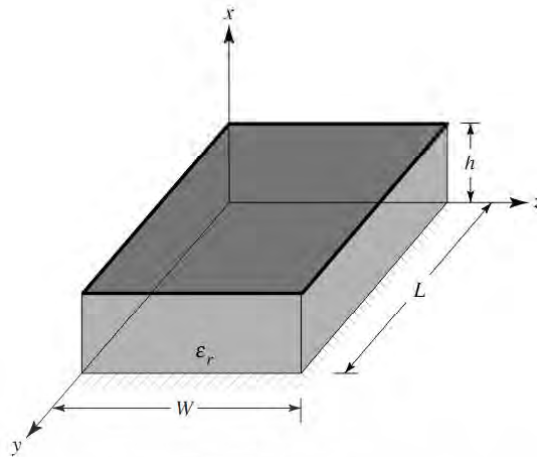
3).เมื่อได้ค่า W จากสมการที่ 2.11 ก็สามารถคำนวณค่า ΔL ด้วยสมการที่ 2.9

4).ค่าความยาวจริงของแผ่นจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2.12)$$

2.3.4.2 รูปแบบของสนาม (โหนด) TM^x

รูปแบบของสนามภายในควาวิที่สามารถหาได้โดยใช้ศักย์เวกเตอร์ จากรูปที่ 2.12 จะพิจารณาให้เป็นควาวิสี่เหลี่ยมผืนผ้าไหลดด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ_r



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของแผ่นไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เพื่อคำนวณโหมดเด่นด้วยค่าเรโซแนนซ์ที่ต่ำที่สุด ซึ่งกล่าวคือความถี่เรโซแนนซ์ที่ลำดับต่ำที่สุดคือโหมดเด่น ซึ่งจะสามารถที่จะใช้ในการคำนวณความถี่ใช้งานได้ สำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่ $h \ll L$ และ $h \ll W$ ถ้า $L > W > h$ จะได้โหมดเด่นคือ TM_{010}^x และความถี่เรโซแนนซ์คือ

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.13)$$

เมื่อ v_0 คือค่าความเร็วแสงในอากาศ และถ้าเงื่อนไข $L > W > L/2 > h$ โหมดที่สูงขึ้นถัดมาคือ TM_{001}^x และความถี่เรโซแนนซ์คือ

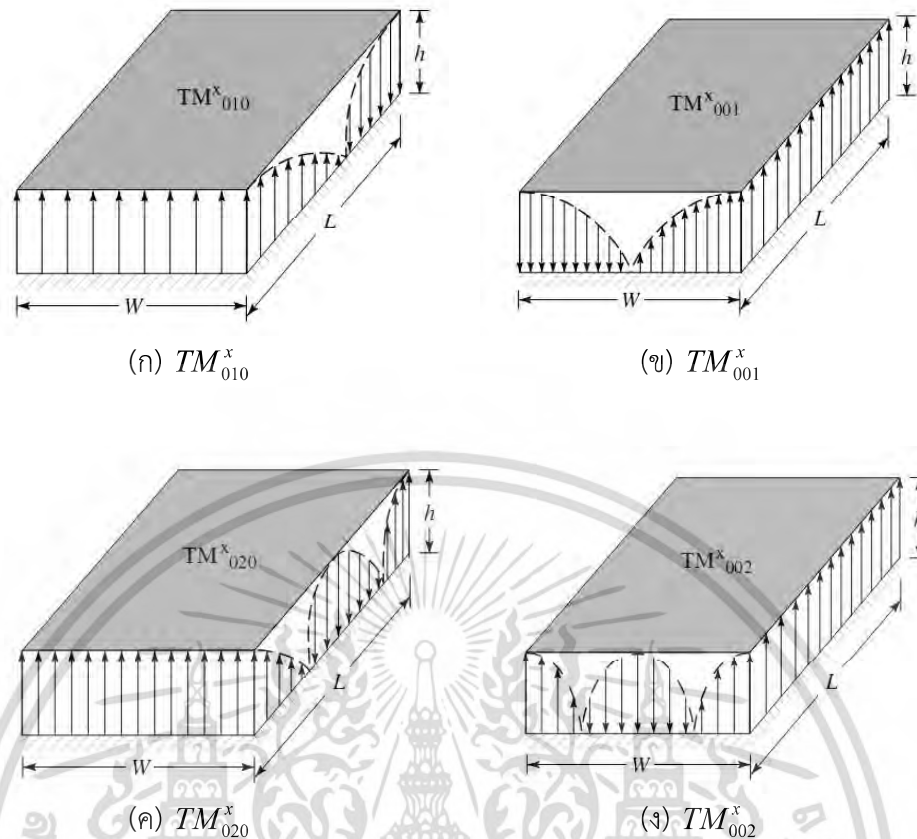
$$(f_r)_{001} = \frac{1}{2W\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2W\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.14)$$

อย่างไรก็ตามถ้า $L > L/2 > W > h$ โหมดที่อยู่ลำดับที่สองคือ TM_{020}^x แทนที่ TM_{001}^x และความถี่เรโซแนนซ์คือ

$$(f_r)_{020} = \frac{1}{L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.15)$$

ถ้า $L > W > h$ โหมดเด่นคือ TM_{001}^x ความถี่เรโซแนนซ์คือสมการที่ 2.14 ในขณะที่ถ้า $W > W/2 > L > h$ โหมดลำดับที่ 2 คือ TM_{002}^x การกระจายของสนามไฟฟ้าบนพื้นผิวสัมผัสบนผนังของควาวิดีสำหรับโหมด TM_{010}^x TM_{001}^x TM_{020}^x และ TM_{002}^x ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 รูปแบบของสนาม (โหมด) สำหรับไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ต่อ)

2.4 งานวิจัยที่มีมาก่อน

สายอากาศ เป็นส่วนสำคัญของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายหากสายอากาศไม่สามารถที่จะรองรับหรือตอบสนองการใช้งานตามช่วงความถี่ได้ก็จะไม่สามารถที่จะทำการติดต่อสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงทำให้มีการศึกษาค้นคว้าในบทความทางวิชาการต่างๆ เกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่ที่สามารถรองรับการใช้งานช่วงความถี่ที่เพิ่มขึ้นมาได้ ดังจะกล่าวต่อไปนี้

ในงานวิจัย [3] A Low Profile Rectangular Patch Microstrip Antenna for Dualband Operation of Wireless Communication System ได้มีการนำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีรายละเอียดน้อยด้วยการใช้วิธีการป้อนสัญญาณที่ขอบข้างและการตัดขอบของแผ่นแพร่กระจายสัญญาณซึ่งสายอากาศที่นำเสนอสามารถตอบสนองความถี่ 1.8 GHz และ 2.4 GHz

ในงานวิจัย [4] Dual-Band Microstrip Antenna Based on Polarization Conversion Metasurface Structure ได้มีการนำเสนอโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนแยกเสริม (Complementary Split Ring Resonator: CSRR) วางไว้บนระนาบกราวด์และทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใหม่คือที่ความถี่ 3.54 GHz และ 6.72 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัย [5] A Compact Dual-Band CPW-Fed Planar Monopole Antenna for 2.62-2.73 GHz Frequency Band, WiMAX and WLAN Applications มีการใช้โครงสร้างการป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide: CPW) และสายอากาศโมโนโพลหลายแผ่นทำให้สามารถได้การตอบสนองหลายช่วงความถี่และสามารถนำไปใช้งานได้กับระบบวายแมกซ์ (WiMax) และเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

ในงานวิจัย [6] Dual Band Meander Line Antenna for Wireless LAN Communication มีการมุ่งเน้นที่จะนำเสนอการออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายอีกด้วย ซึ่งมีการนำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแบบเส้นคดเคี้ยวร่วมกับการปรับรูปร่างของระนาบกราวด์ [6] ทำให้สามารถตอบสนองช่วงความถี่ 2.4-2.48 GHz และ 5.15-5.35 GHz ได้

ในงานวิจัย [7] Compact Dual-Band Slot Antenna for 2.4/5 GHz WLAN Applications ได้มีการนำเสนอสายอากาศที่มีขนาดกะทัดรัดด้วยโครงสร้างช่องเปิดวงกลมและมีการป้อนสัญญาณด้วยวิธีการเชื่อมต่อด้านวัสดุฐานรองและสายอากาศที่นำเสนอนี้มีช่วงความถี่ 2.4-2.485 GHz และ 5.15-5.825 GHz

ในงานวิจัย [8] Differentially Fed, Dual-Band Dual-Polarized Filtering Antenna with High Selectivity for 5G Sub-6 GHz Base Station Applications ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับช่วงความถี่ Sub-6 GHz เพิ่มมากขึ้นเช่นในงานวิจัยที่ [8] ได้มีการนำเสนอสายอากาศสองย่านความถี่ที่สามารถตอบสนองช่วงความถี่ 3.28-3.71 GHz และ 4.8-5.18 GHz อีกทั้งยังมีโพลาไรซ์สองแบบร่วมกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางด้วยอัตราการขยายสูงถึง 8.34 dBi สายอากาศนี้ใช้เทคนิคโครงสร้างของสายอากาศแพตช์ (Patch antenna) ร่วมกับช่องเปิดด้วยการป้อนสัญญาณ 4 จุด

ในงานวิจัย [9] Compact Dual-Band Dual-Polarized Filtering Antenna for 5G Base Station Applications ได้มีการใช้เทคนิคโครงสร้างของสายอากาศแพตช์ (Patch antenna) ร่วมกับช่องเปิดด้วยการป้อนสัญญาณ 4 จุด และมีการนำเสนอสายอากาศสองย่านความถี่ที่สามารถตอบสนองช่วงความถี่ 3.4-3.6 GHz และ 4.8-5 GHz

ในงานวิจัย [10] 2020 9th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP) ได้มีการนำเสนอเทคนิคเรโซเนเตอร์แบบไดอิเล็กตริกในโครงสร้างของสายอากาศแพตช์ซึ่งสามารถทำให้สายอากาศทำงานได้สองย่านความถี่คือ 3.35-3.62 GHz และ 4.99-5.15 GHz ด้วยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางด้วยอัตราการขยายเท่ากับ 5.5 dBi และ 6.75 dBi ตามลำดับ

ในงานวิจัย [11] Miniaturized Dual-Band Antenna for 2.4/5.8GHz WLAN Operation in the Notebook Computer มีการนำเสนอสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีขนาดเล็กด้วยเทคนิควิธีการลดขนาดโดยรวมของสายอากาศด้วยวิธีเส้นคดเคี้ยวและสายอากาศแบบเอพหัวกลับ (Planar Inverted-F Antenna: PIFA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัย [12] Design of Dual Band Antenna for WLAN Application มีการนำเสนอสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีขนาดเล็กด้วยเทคนิควิธีการลดขนาดโดยรวมของสายอากาศด้วยวิธีเส้นคดเคี้ยวและสายอากาศแบบเอฟหัวกลับ (Planar Inverted-F Antenna: PIFA)

ในงานวิจัย [13] Compact Dual-Band Split-Ring Antenna for 2.4/5.2 GHz WLAN Applications มีการนำเสนอสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีขนาดเล็กด้วยเทคนิควิธีการลดขนาดโดยรวมของสายอากาศด้วยวิธีการใช้โครงสร้างวงแหวนกับเรโซเนเตอร์เพื่อการลดขนาด

และในงานวิจัย [14] A Dual Band SIR Coupled Dipole Antenna for 2.4/5.2/5.8 GHz Applications มีการนำเสนอสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีขนาดเล็กด้วยเทคนิควิธีการลดขนาดโดยรวมของสายอากาศด้วยวิธีการใช้โครงสร้างวงแหวนกับเรโซเนเตอร์เพื่อการลดขนาด

จากบทความวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมด สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz และ 5-6 GHz แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีมาก่อน

สายอากาศ	ช่วงความถี่	อัตราการขยาย	ขนาด (mm ²)
[6]	2.4-2.48 GHz และ 5.15-5.35 GHz	5.3 dBi (2.45 GHz) และ 3.7 dBi (5.25 GHz)	31 × 7.5
[7]	2.4-2.485 GHz และ 5.15-5.825 GHz	3.2 dBi (2.45 GHz) และ 5.5 dBi (5.5 GHz)	40 × 40
[8]	3.28-3.71 GHz และ 4.8-5.18 GHz	8.34 dBi (3.5 GHz) และ 8.7 dBi (4.9 GHz)	42 × 42
[9]	3.4-3.6 GHz และ 4.8-5 GHz	5 dBi (3.5 GHz) และ 5.5 dBi (4.9 GHz)	-
[10]	3.35-3.62 GHz และ 4.99-5.15 GHz	5.5 dBi (3.5 GHz) และ 6.75 dBi (5 GHz)	-
สายอากาศที่นำเสนอ	2.26-2.53 GHz และ 4.97-5.30 GHz	1.8 dBi (2.45 GHz) และ 2.21 dBi (5.2 GHz)	20 × 30

2.5 สรุป

ช่วงความถี่ใช้งานของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) มีความนิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวางจากเดิมมีการใช้งานในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz แต่ในปัจจุบันได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการขยายการใช้งานเพิ่มขึ้นในช่วงความถี่ 5-6 GHz การออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่ที่สามารถรองรับการใช้งานช่วงความถี่ที่เพิ่มขึ้นมานั้นจึงมีความสำคัญ ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีทางสายอากาศและหลักการ และได้นำเสนอสายอากาศไมโครสตริปที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น ในส่วนของงานวิจัยที่ผ่านมา การออกแบบสายอากาศมีหลายเทคนิคที่นำเสนอ แต่มักจะมีเงื่อนไขมากมายเกี่ยวกับคุณลักษณะของสายอากาศ เช่น ขนาด น้ำหนัก ราคา ประสิทธิภาพ ลักษณะรูปร่างและลักษณะการติดตั้ง เป็นต้น ดังนั้นสายอากาศที่มีรายละเอียดน้อย (Low-profile Antennas) จึงเป็นที่ต้องการอย่างมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

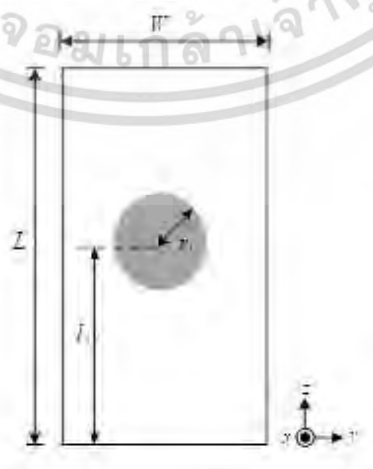
บทที่ 3

สายอากาศแพตช์วงกลมคู่และวัสดุฐานรองหลายชั้น

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่แบบแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นสำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz และช่วงความถี่ 5.0-5.3 GHz โดยใช้ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 และนำมาออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST microwave studio [17] เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่ได้คำนวณทางทฤษฎี โดยจะมุ่งเน้นพิจารณาพารามิเตอร์หลักมูลของสายอากาศ ซึ่งจะใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมของสายอากาศ โดยอ้างอิงกับพลังงานที่แผ่ออกไป ประสิทธิภาพของกำลัง การเข้ากันได้หรือการแมตช์กันระหว่างสายอากาศและวงจรป้อนกำลัง เป็นต้น เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่ได้ออกแบบ และปรับพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับเงื่อนไขคุณลักษณะของสายอากาศ และสามารถใช้งานกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสองช่วงความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.1 การออกแบบสายอากาศแพตช์วงกลม

การออกแบบสายอากาศที่น่าเสนอจะเริ่มจากแนวคิดของการออกแบบสายอากาศแพตช์วงกลมที่วางตัวอยู่บนวัสดุฐานรอง ในการออกแบบนี้จะพิจารณาใช้วัสดุฐานรองแบบ FR4 ชั้นเดียวที่มีความหนา 1.6 mm ซึ่งเป็นความหนาของแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีจำหน่ายทั่วไปดังรูปที่ 3.1 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant: ϵ_r) เท่ากับ 4.3 และความถี่กลางที่พิจารณามีค่าเท่ากับ 2.45 GHz โดยการคำนวณหาพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศตัวแรก คือ รัศมีของแผ่นวงกลม และกำหนดพารามิเตอร์เป็น r_1 ซึ่งจะใช้สมการที่ 3.1 และ 3.2 [16]



รูปที่ 3.1 สายอากาศแพตช์วงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ h มีค่าเท่ากับ 0.16 cm ϵ_r และ f_r มีค่าเท่ากับ 4.3 และ 2.45 GHz ตามลำดับ

$$a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (3.1)$$

โดยระบุให้ ϵ_r และ f_r อยู่ในหน่วยของ Hz และ h อยู่ในหน่วยของ cm

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.2)$$

เมื่อ a คือ รัศมีของแผ่นวงกลม ซึ่งในที่นี้กำหนดพารามิเตอร์เป็น r_1

h คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์

จะทำให้ขนาดเริ่มต้นของรัศมีของแผ่นวงกลม (r_1) มีค่าเท่ากับ 1.678 cm

3.2 การป้อนสัญญาณไปยังแพตช์วงกลมด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 [16] พบว่ารัศมีของแผ่นวงกลม (r_1) ที่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ 1.678 cm หรือ 16.78 mm

เมื่อได้รัศมีของแผ่นวงกลม (r_1) เรียบร้อยแล้ว เนื่องจากสายอากาศที่จะทำการสร้างขึ้นมีการป้อนสัญญาณเข้าด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance: Z_o) ที่ 50 Ω โดยคำนวณได้จากทฤษฎีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง ความยาวของสายนำสัญญาณเท่ากับ $\lambda/4$ ของความถี่กลางที่พิจารณาคือ 2.45 GHz จะใช้สมการที่ 3.4 3.5 และ 3.6 [16]

เมื่อ h มีค่าเท่ากับ 0.16 cm ϵ_r และ W_0 มีค่าเท่ากับ 4.3 และ 0.5 cm ตามลำดับ

$$Z_o = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \ln \left[\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right], \frac{W_0}{h} \leq 1 \quad (3.3)$$

หรือ

$$Z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}} \left[\frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]}}, \frac{W_0}{h} > 1 \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3.5)$$

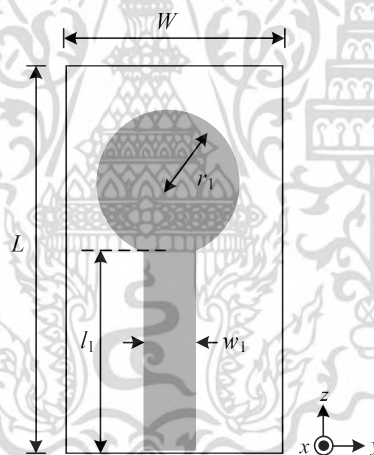
ในการคำนวณหา ϵ_{reff} โดยที่ $\frac{W}{h} > 1$ ซึ่งคำนวณหา W โดยใช้สมการที่ 3.6

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.6)$$

โดย v_0 คือ ความเร็วแสง และ W_0 คือ ความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป ซึ่งในที่นี้กำหนดพารามิเตอร์เป็น w_1

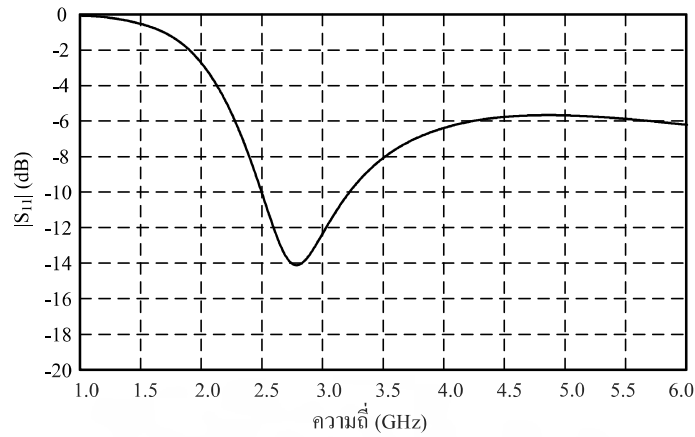
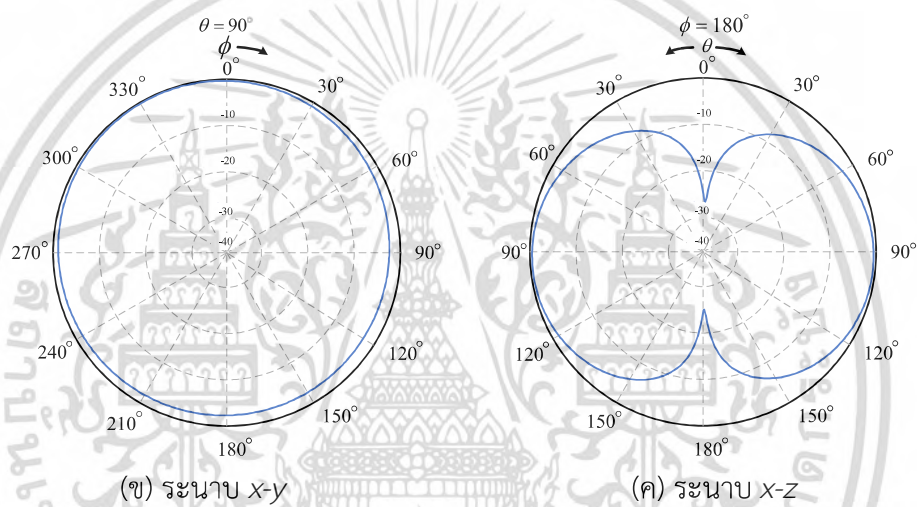
จะทำให้ความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (w_1) มีค่าเท่ากับ 3.111 mm และความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (x_1) มีค่าเท่ากับ 16.938 mm

การป้อนสัญญาณไปยังแพตช์วงกลมด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปจะเป็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การป้อนสัญญาณไปยังแพตช์วงกลมด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพตช์วงกลม

(ข) ระนาบ x-y

(ค) ระนาบ x-z

รูปที่ 3.3 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพตช์วงกลม 2.75 GHz

ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพตช์วงกลม พบว่าสามารถที่จะตอบสนองความถี่ได้ดี คือ มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ต่ำกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ 2.5-3.25 GHz

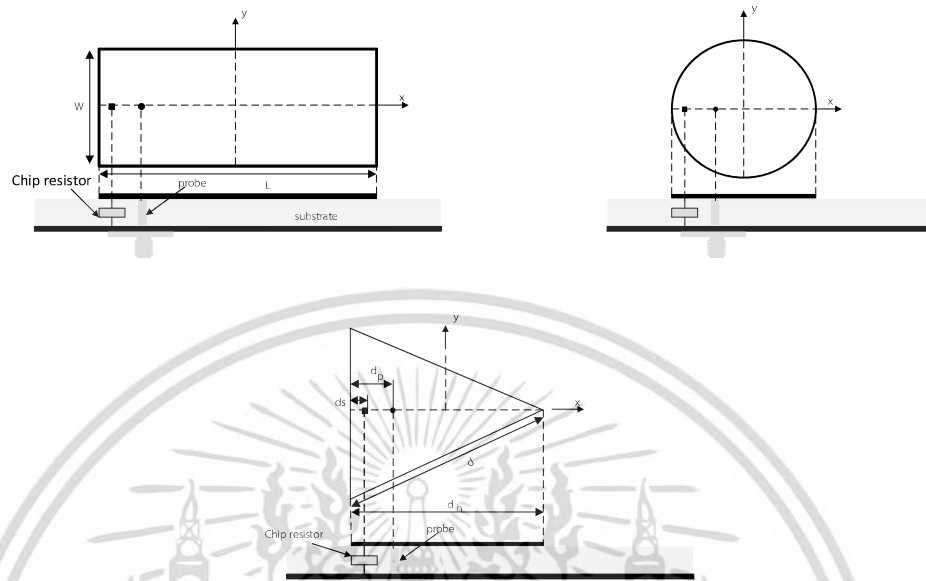
ในขณะที่ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.75 GHz ในระนาบ x-y และระนาบ x-z พบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบกึ่งรอบทิศทาง

3.3 สายอากาศแพตช์วงกลมป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจร

หลังจากที่ได้โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศ จะเห็นได้ว่าสายอากาศมีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่ จึงได้ทำการพัฒนาการออกแบบเพื่อลดขนาดของสายอากาศด้วยวิธีการป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและการลัดวงจร วิธีการลัดวงจรบนแผ่นแพตช์บนวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกนั้น จาก

รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบแพตช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปวงกลม และรูปสามเหลี่ยม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นแบบฉบับหรือใช้ข้อมูลใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีการลัดวงจรไปยังระนาบกราวด์ [18] และยังมีข้อดีอีกหลายด้าน เช่น มีน้ำหนักเบา ง่ายต่อการออกแบบ มีต้นทุนต่ำ และสายอากาศมีขนาดกะทัดรัด



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสายอากาศแบบแพตช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปวงกลม และรูปสามเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร

สำหรับกรณีตัวอย่างของแผ่นแพตช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปวงกลม และรูปสามเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจรนั้น สายอากาศแบบแพตช์รูปสี่เหลี่ยมจะทำงานที่ขนาดครึ่งความยาวคลื่น จากการประมาณค่าแบบโพรง (Cavity Model) ความถี่พื้นฐานหรือความถี่เรโซแนนซ์แรกของแผ่นแพตช์รูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.4 โดยไม่มีพินลัดวงจรขั้วต่อจะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.7

$$f_{10} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.7)$$

- เมื่อ f_{10} คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของโหมด TM_{10}
 L คือ ความยาวของแผ่นแพตช์
 ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permittivity)

เมื่อมีการใช้พินลัดวงจรจากแผ่นแพตช์ไปยังระนาบกราวด์ ณ จุดศูนย์กลางของขอบแพตช์ และเลือกตำแหน่งการป้อนสัญญาณบนเส้นกึ่งกลางตามแนวแกน x ความถี่เรโซแนนซ์แรกจะเกิดขึ้นที่ประมาณ $0.38 f_{01}$ เมื่อมีการใช้การเชื่อมต่อพินลัดวงจรมากกว่าหนึ่งจุดที่ขอบหรือใช้การลัดวงจรแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

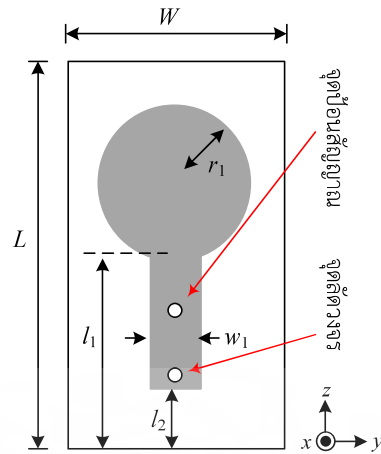
แผ่นความถี่เรโซแนนซ์แรกจะเกิดขึ้นใกล้กับหรือที่ประมาณ $0.5 f_{01}$ ทำให้ในกรณีนี้สายอากาศแบบแพตช์ที่มีการลัดวงจรสามารถทำงานเป็นสายอากาศที่มีความยาวคลื่นหนึ่งในสี่ส่วน ($\lambda / 4$)

การออกแบบลักษณะนี้เรียกว่า สายอากาศแบบแพตช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบลัดวงจรด้วยพินทำงานโดยมีความยาวเรโซแนนซ์น้อยกว่าหนึ่งในสี่ส่วนของความยาวคลื่น และสามารถลดขนาดของสายอากาศให้เล็กลงได้อีกด้วย

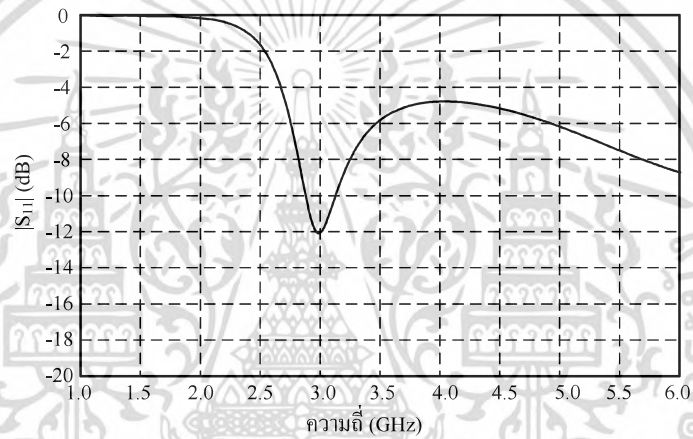
ด้วยเทคนิคการลัดวงจรด้วยพินจะทำให้การลดขนาดของสายอากาศส่วนใหญ่เกิดจากการขยับของจุดแรงดันไฟฟ้าที่จุดศูนย์กลางของแพตช์รูปสี่เหลี่ยมด้วยการบ่อนสัญญาณในโหมด TM_{01} และแพตช์รูปวงกลมจะทำงานที่โหมด TM_{11} ขอบของแผ่นแพตช์ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้แผ่นแพตช์ที่มีการลัดวงจรเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่ต่ำกว่า ดังนั้น ณ ความถี่ใช้งาน ขนาดของแผ่นแพตช์จะสามารถลดลงได้อย่างมากและการลดขนาดของแผ่นแพตช์จะถูกจำกัดด้วยระยะห่างระหว่างจุดแรงดันไฟฟ้าที่เป็นศูนย์ในแผ่นแพตช์และขอบของแผ่นแพตช์

ด้วยเหตุนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของแผ่นแพตช์รูปสี่เหลี่ยมและรูปวงกลมที่มีการลัดวงจรสามารถคาดการณ์ได้ว่า แผ่นแพตช์รูปสามเหลี่ยมด้านเท่าบ่อนสัญญาณที่โหมดพื้นฐาน (โหมด TM_{10}) เมื่อที่จุดแรงดันเท่ากับศูนย์อยู่ที่สองในสามของระยะห่างจากปลายรูปสามเหลี่ยมถึงขอบด้านล่างของรูปสามเหลี่ยม จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ลดลงอย่างมากเมื่อใช้เทคนิคการลัดวงจรด้วยพิน

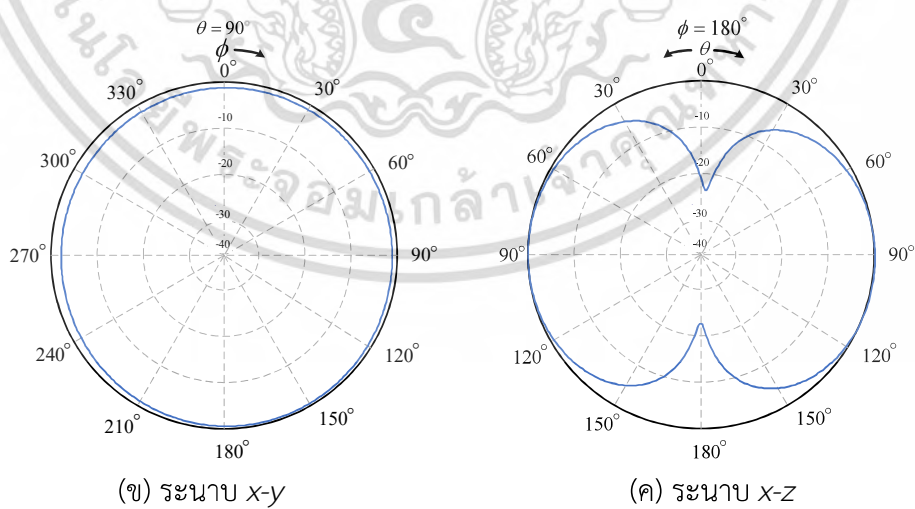
เมื่อทำการลดขนาดของสายอากาศด้วยการบ่อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและการลัดวงจรดังแสดงโครงสร้างของสายอากาศแพตช์วงกลมบ่อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจรดังรูปที่ 3.5 ในที่นี้จะมีการบ่อนสัญญาณด้วยโพรบที่บริเวณกึ่งกลางของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปและทำการลัดวงจรที่ปลายอีกด้านหนึ่งของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปลงระนาบกราวด์ เมื่อทำการจำลองผล พบว่าค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศสามารถที่จะตอบสนองความถี่ได้ดีในช่วงความถี่ 3 GHz แต่ในช่วงความถี่ 5-6 GHz ไม่สามารถที่จะตอบสนองได้ดีดังแสดงในรูปที่ 3.6 ในขณะที่ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 3 GHz ในระนาบ x-y และระนาบ x-z พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบกึ่งรอบทิศทาง



รูปที่ 3.5 สายอากาศแพตช์วงกลมป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจร



(ก) ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพตช์วงกลม



(ข) ระนาบ x-y

(ค) ระนาบ x-z

รูปที่ 3.6 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพตช์วงกลมป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจร 3 GHz

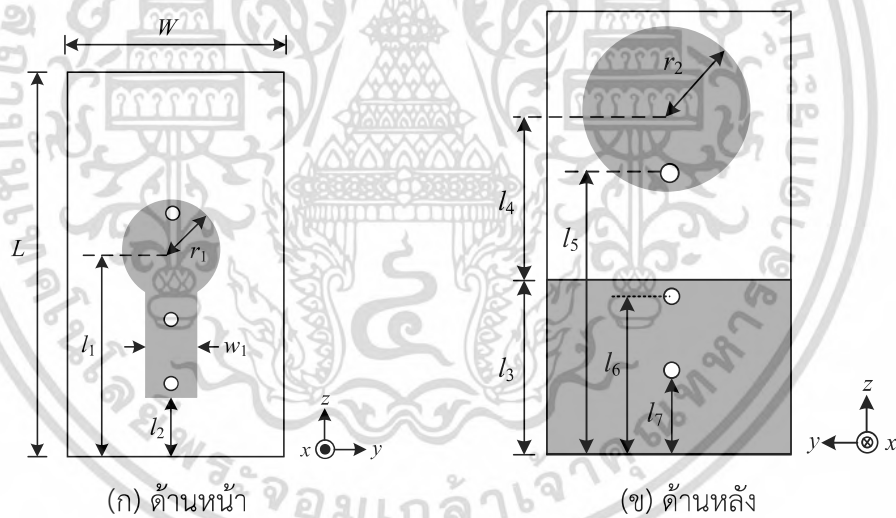
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบสายอากาศแพทช์วงกลมคู่

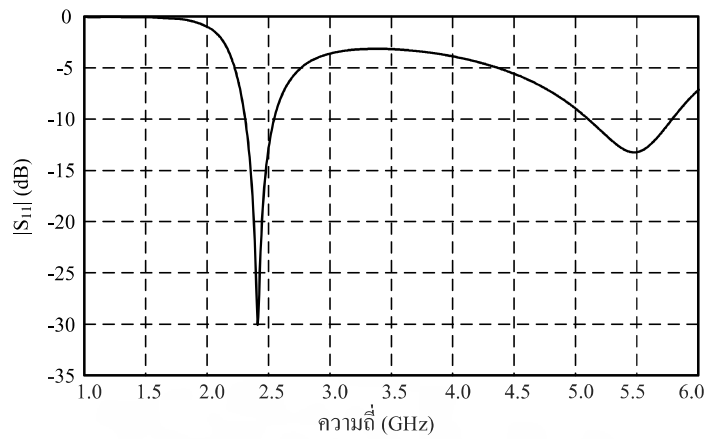
หลังจากที่ได้ทำการลดขนาดของสายอากาศแพทช์วงกลมด้วยการป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและการลัดวงจร จะเห็นได้ว่าเป็นการลดขนาดของสายอากาศให้เล็กลงได้ ถัดมาเป็นการเพิ่มในส่วนของการออกแบบสายอากาศเพื่อให้สามารถตอบสนองได้สองย่านความถี่ ด้วยวิธีการเพิ่มแพทช์วงกลมแผ่นที่สองที่ด้านล่างของวัสดุฐานรองหรือด้านหลังของแพทช์วงกลมแผ่นที่หนึ่ง แล้วทำการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นแพทช์ทั้งสองด้วยจุดลัดวงจรแสดงดังรูปสายอากาศแพทช์วงกลมคู่ป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจรในรูปที่ 3.7

จากผลการจำลอง พบว่าผลตอบสนองทางความถี่สามารถที่จะตอบสนองสองย่านความถี่ได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการมีวัสดุฐานรองชั้นเดียวแต่ยังมีช่วงกว้างความถี่แคบ ซึ่งผลของ $|S_{11}|$ ของสายอากาศสามารถที่จะตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ 2.45 GHz และ 5.5 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.8

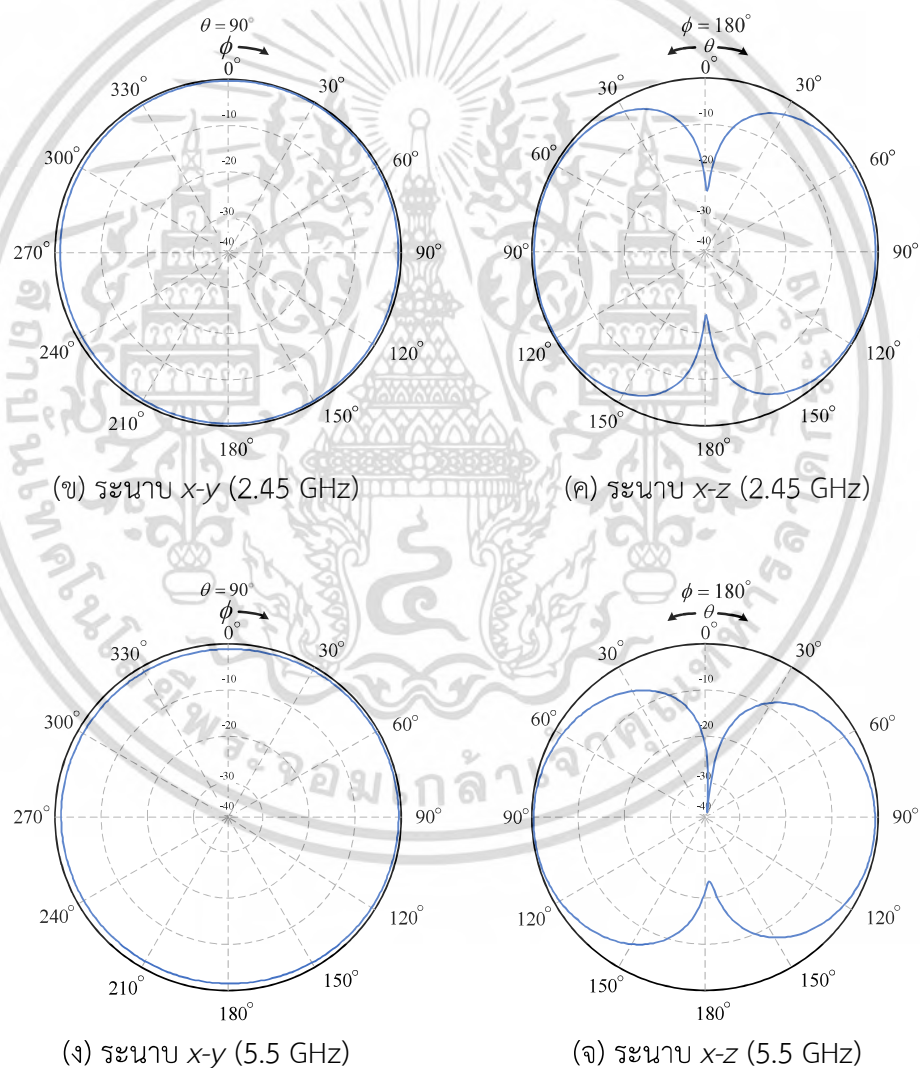
ในขณะที่ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.5 GHz ในระนาบ x-y และระนาบ x-z พบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบกึ่งรอบทิศทางทั้งสองความถี่



รูปที่ 3.7 สายอากาศแพทช์วงกลมคู่ป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจร



(ก) ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่



(ข) ระนาบ x-y (2.45 GHz)

(ค) ระนาบ x-z (2.45 GHz)

(ง) ระนาบ x-y (5.5 GHz)

(จ) ระนาบ x-z (5.5 GHz)

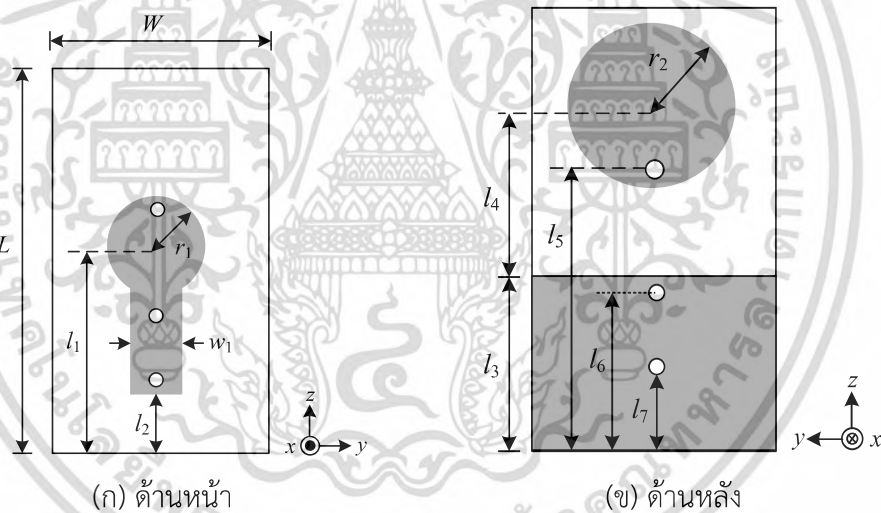
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่

ป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจร 2.45 GHz และ 5.5 GHz ตามลำดับ

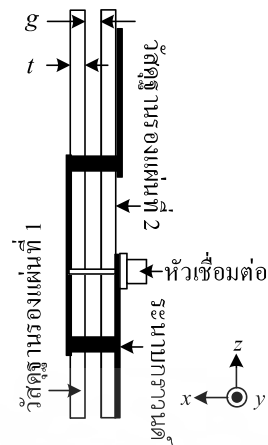
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 สายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

เมื่อสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบและจุดลัดวงจรสามารถมีคุณสมบัติตอบสนองได้สองย่านความถี่ของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า ช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศนั้นยังไม่เพียงพอ จึงใช้เทคนิควัสดุฐานรองหลายชั้นเพื่อเพิ่มช่วงกว้างความถี่ โดยมีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 3 ชั้น คือ ชั้นที่ 1 และ 3 เป็นวัสดุฐานรองชนิด FR4 มีความหนา 1.6 mm และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant: ϵ_r) เท่ากับ 4.3 และชั้นที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศมีระยะห่างเท่ากับ 1.27 mm โดยแผ่นวงกลมที่ 1 กับสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปวางอยู่บนวัสดุฐานรองชั้นที่ 1 และแผ่นวงกลมที่ 2 กับระนาบกราวด์วางอยู่ด้านล่างของวัสดุฐานรองชั้นที่ 3 มีการป้อนสัญญาณด้วยโพรบและมีการเชื่อมต่อแผ่นวงกลมทั้งสองแผ่นผ่านวัสดุฐานรองทั้ง 3 ชั้นด้วยลวดตัวนำ อีกทั้งยังมีการใช้เทคนิคการลัดวงจรที่ปลายสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปไปยังระนาบกราวด์เพื่อให้สายอากาศมีขนาดกะทัดรัดดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.9

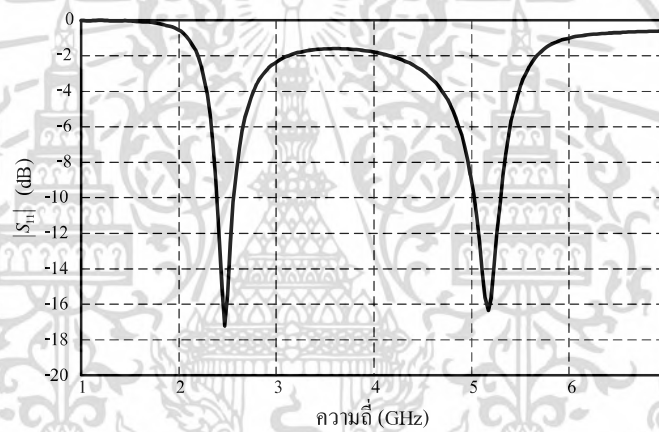


รูปที่ 3.9 โครงสร้างและส่วนประกอบของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

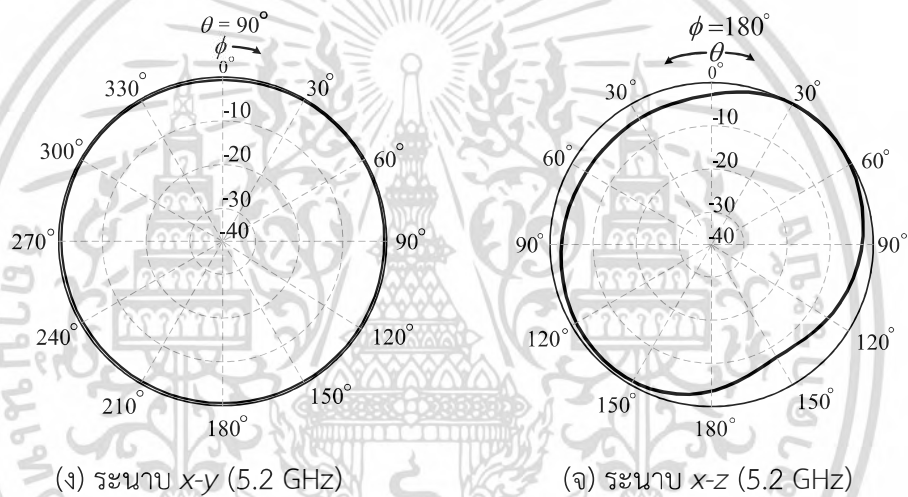
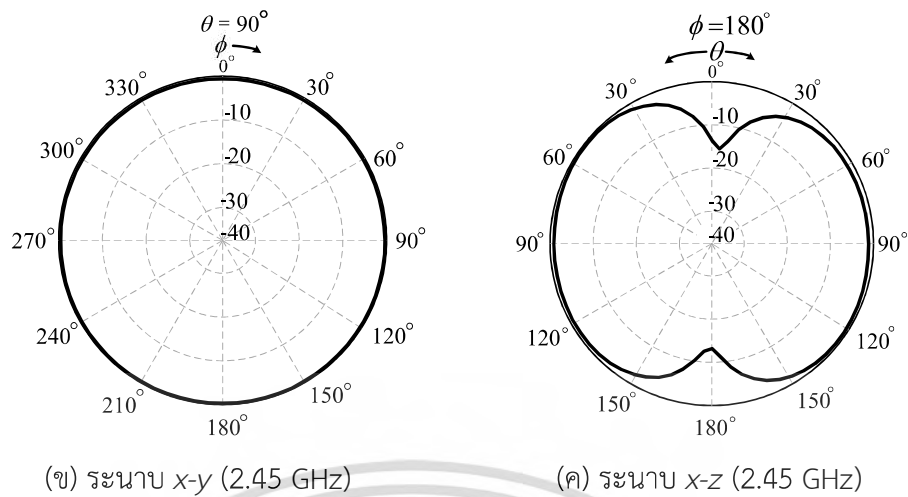


(ค) ด้านข้าง

รูปที่ 3.9 โครงสร้างและส่วนประกอบของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น (ต่อ)

(ก) ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นรูปที่ 3.10 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ (ต่อ)

จากผลของ $|S_{11}|$ พบว่า สายอากาศสามารถที่จะตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz จากผลที่ได้ในบทความนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการออกแบบสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นเพื่อให้สายอากาศสามารถตอบสนองได้ใน 2 ช่วงความถี่สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ x-y และระนาบ x-z ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่รอบทิศทางด้วยอัตราขยายเท่ากับ 1.90 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz แสดงดังรูปที่ 3.10 (ข) และ (ค) ในส่วนของความถี่ 5.2 GHz ก็ยังคงมีลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบที่รอบทิศทางด้วยอัตราขยายเท่ากับ 2.36 dBi ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ง) และ (จ)

และมีการกำหนดพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบ

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
W	ความกว้างของสายอากาศ
L	ความยาวของสายอากาศ
W_1	ความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป
l_1	ระยะของแผ่นวงกลมด้านหน้า
l_2	ระยะห่างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป
l_3	ความยาวของระนาบกราวนด์
l_4	ระยะของแผ่นวงกลมด้านหลัง
l_5	ระยะของจุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นวงกลม
l_6	ระยะของจุดป้อนสัญญาณ
l_7	ระยะของจุดลัดวงจร
r_1	รัศมีของแผ่นวงกลมด้านหน้า
r_2	รัศมีของแผ่นวงกลมด้านหลัง
g	ระยะห่างของวัสดุฐานรอง
t	ความหนาของวัสดุฐานรอง

3.6 สรุปผลการออกแบบสายอากาศ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่แบบแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นสำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz และช่วงความถี่ 5.0-5.3 GHz ซึ่งวัตถุประสงค์คือเพื่อให้สามารถตอบสนองได้สองย่านความถี่ จึงใช้วิธีการเพิ่มแพตช์วงกลมแผ่นที่สองหลังจากที่ได้โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศ ที่ด้านล่างของวัสดุฐานรองหรือด้านหลังของแพตช์วงกลมแผ่นที่หนึ่ง แล้วทำการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นแพตช์ทั้งสองด้วยจุดลัดวงจร แต่จากการจำลอง พบว่าผลตอบสนองทางความถี่สามารถที่จะตอบสนองสองย่านความถี่ได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการมีวัสดุฐานรองชั้นเดียวแต่ยังมีช่วงกว้างความถี่แคบ จึงได้ใช้เทคนิควัสดุฐานรองหลายชั้นเพื่อเพิ่มช่วงกว้างความถี่ โดยมีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 3 ชั้น คือ ชั้นที่ 1 และ 3 เป็นวัสดุฐานรองชนิด FR4 มีความหนา 1.6 mm และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant: ϵ_r) เท่ากับ 4.3 และชั้นที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศมีระยะห่าง (g) เท่ากับ 1.27 mm จากผลของ $|S_{11}|$ พบว่าสายอากาศสามารถที่จะตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น เมื่อได้สายอากาศต้นแบบแล้ว ในบทถัดไปเป็นการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ของสายอากาศ

สายอากาศที่นำเสนอในบทที่ 3 จะเริ่มจากการออกแบบสายอากาศแพตช์วงกลมบนวัสดุฐานรองแบบ FR4 ชั้นเดียวที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นกึ่งรอบทิศทางและมีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น ซึ่งในบทนี้จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสมสำหรับสายอากาศที่นำเสนอได้เพื่อให้สามารถที่จะทำให้ออกแบบได้ทั้งสองย่านความถี่ เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อคุณลักษณะของสายอากาศ โดยพิจารณาจาก $|S_{11}|$ เป็นสำคัญ

4.1 การออกแบบสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

จากการศึกษาเทคนิคการเพิ่มวัสดุฐานรองชั้นเดียวเป็นวัสดุฐานรอง 2 ชั้น จะทำให้ผลตอบสนองทางความถี่สามารถที่จะตอบสนองสองย่านความถี่ได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการมีวัสดุฐานรองชั้นเดียวแต่ยังมีช่วงกว้างความถี่แคบ จึงได้ใช้เทคนิควัสดุฐานรองหลายชั้นเพื่อเพิ่มช่วงกว้างความถี่ โดยมีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 3 ชั้น คือ ชั้นที่ 1 และ 3 เป็นวัสดุฐานรองชนิด FR4 มีความหนา 1.6 mm และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant: ϵ_r) เท่ากับ 4.3 และชั้นที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศมีระยะห่างเท่ากับ 1.27 mm โดยแผ่นวงกลมที่ 1 กับสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปวางอยู่บนวัสดุฐานรองชั้นที่ 1 และแผ่นวงกลมที่ 2 กับระนาบกราวด์วางอยู่ด้านล่างของวัสดุฐานรองชั้นที่ 3 ดังนั้นโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอจึงประกอบไปด้วยวัสดุฐานรอง 3 ชั้น ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.9 โดยมีความกว้าง W ความยาว L mm ตามลำดับ

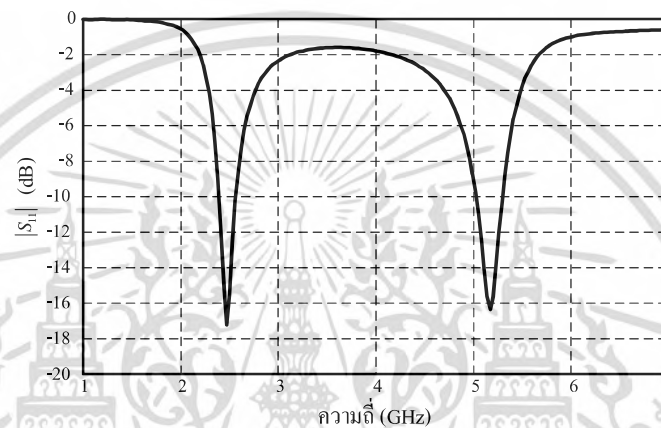
ในการออกแบบสายอากาศจะมีการป้อนสัญญาณด้วยโพรบและมีการเชื่อมต่อแผ่นวงกลมทั้งสองแผ่นผ่านวัสดุฐานรองด้วยลวดตัวนำ อีกทั้งยังมีการใช้เทคนิคการลัดวงจรที่ปลายสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปไปยังระนาบกราวด์เพื่อให้สายอากาศมีขนาดกะทัดรัด

4.2 การศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ของสายอากาศ

เพื่อให้สายอากาศที่นำเสนอสามารถตอบสนองได้ใน 2 ช่วงความถี่สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย คือในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz และช่วงความถี่ 5.0-5.3 GHz จึงต้องทำการศึกษาผลกระทบของการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ ซึ่งจากโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอ ทำให้แยกได้เป็น 2 ส่วนหลักในการศึกษา คือ วัสดุฐานรองด้านหน้า และด้านหลัง โดยนำขนาดพารามิเตอร์จากบทที่ 3 มาทำการศึกษา ผลการศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ของสายอากาศมีดังนี้

4.2.1 การเพิ่มวัสดุฐานรองชั้นเดียว

จากการทำการเพิ่มวัสดุฐานรองชั้นเดียวความหนา 1.6 mm เป็นวัสดุฐานรอง 2 ชั้นและมีความหนารวม 3.2 mm พบว่าผลตอบสนองทางความถี่สามารถที่จะตอบสนองสองย่านความถี่ได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการมีวัสดุฐานรองชั้นเดียวแต่ยังมีช่วงกว้างความถี่แคบ จึงได้ทำการปรับปรุงด้วยการแยกวัสดุฐานรอง 2 ชั้นที่มีความหนา 3.2 mm ออกจากกันด้วยระยะห่างเท่ากับ 1.27 mm และพิจารณาให้วัสดุฐานรองแต่ละชั้นมีความหนาเท่ากับ 1.6 mm ก็จะกลายมาเป็นสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรอง 3 ชั้น



(ก) ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

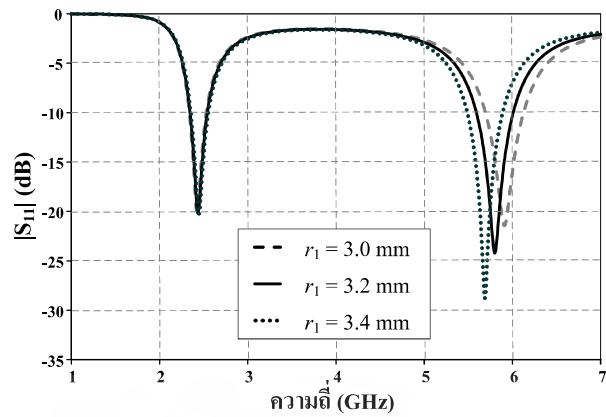
รูปที่ 4.1 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ

จากผลของ $|S_{11}|$ พบว่า สายอากาศสามารถที่จะตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ $x-y$ และระนาบ $x-z$ ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่รอบทิศทางด้วยอัตราการขยายเท่ากับ 1.90 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz แสดงดังรูปที่ 3.10 (ข) และ (ค) ในส่วนของความถี่ 5.2 GHz ก็ยังคงมีลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบที่รอบทิศทางด้วยอัตราการขยายเท่ากับ 2.36 dBi ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ง) และ (จ)

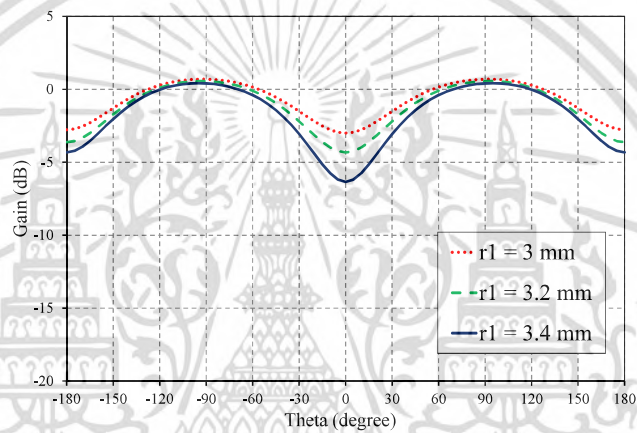
4.2.2 รัศมีของแผ่นวงกลมด้านหน้า

ในการศึกษาผลกระทบจากรัศมีของแผ่นวงกลมด้านหน้า (r_1) จะกำหนดพารามิเตอร์ W และ L คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศ

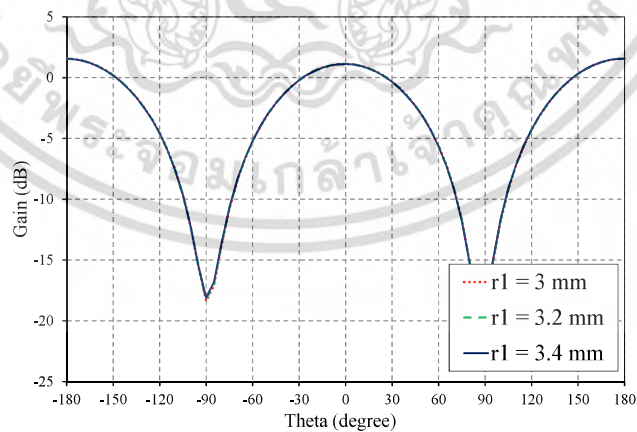
เมื่อปรับค่ารัศมี r_1 (แผ่นวงกลมเล็กด้านหน้า) เป็น 3.0 3.2 และ 3.4 mm ตามลำดับ จะทำให้เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงในช่วงความถี่ 5-6 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่สูง จึงสามารถที่จะยืนยันได้ว่าแผ่นวงกลมเล็กบนวัสดุฐานรองด้านบนจะให้การตอบสนองที่ช่วงความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 4.2



(ก) $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่



(ข) อัตราการขยายระนาบ x-z ที่ความถี่ 5.5 GHz
ที่เป็นฟังก์ชันของรัศมีของแผ่นวงกลมด้านหน้า



(ค) อัตราการขยายระนาบ y-z ที่ความถี่ 2.45 GHz
ที่เป็นฟังก์ชันของรัศมีของแผ่นวงกลมด้านหน้า

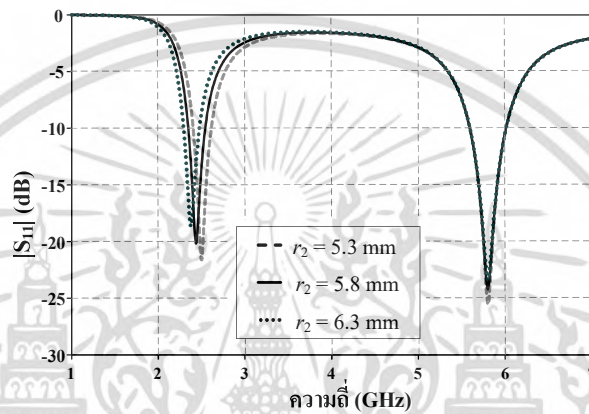
รูปที่ 4.2 ผลของรัศมีของแผ่นวงกลมด้านหน้า (r_1) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

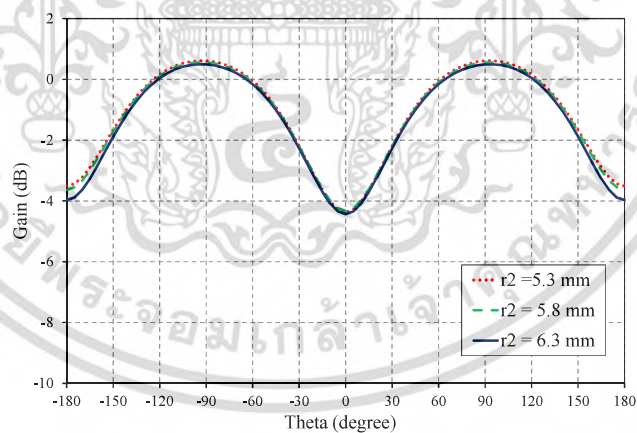
4.2.3 รัศมีของแผ่นวงกลมด้านหลัง

ในการศึกษาผลกระทบจากรัศมีของแผ่นวงกลมด้านหลัง (r_2) จะทำการกำหนดพารามิเตอร์ W และ L คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศ

เมื่อทำการปรับค่ารัศมี r_2 (แผ่นวงกลมใหญ่ด้านหลัง) เป็น 5.3 5.8 และ 6.3 mm ตามลำดับ จะทำให้เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงที่ช่วงความถี่ 2-3 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า จึงสามารถที่ยืนยันได้ว่าแผ่นวงกลมใหญ่บนวัสดุฐานรองด้านล่างจะให้การตอบสนองที่ช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.3



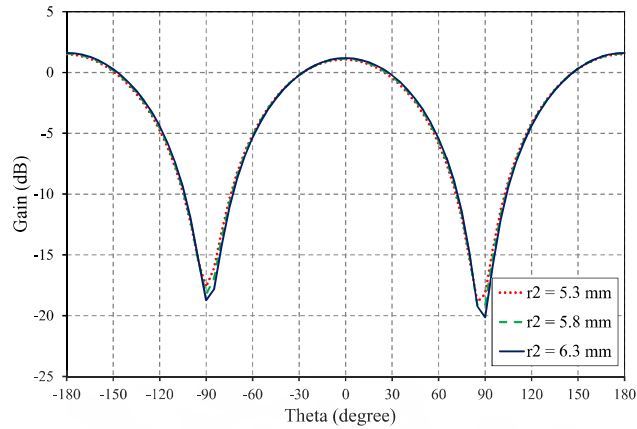
(ก) $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่



(ข) อัตราการขยายระนาบ x-z ที่ความถี่ 5.5 GHz
ที่เป็นฟังก์ชันของรัศมีของแผ่นวงกลมด้านหลัง

รูปที่ 4.3 ผลของรัศมีของแผ่นวงกลมด้านหลัง (r_2) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



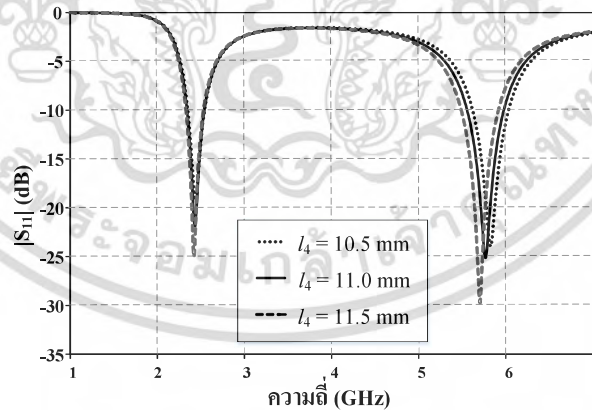
(ค) อัตราการขยายระนาบ $y-z$ ที่ความถี่ 2.45 GHz
ที่เป็นฟังก์ชันของรัศมีของแผ่นวงกลมด้านหลัง

รูปที่ 4.3 ผลของรัศมีของแผ่นวงกลมด้านหลัง (r_2) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ (ต่อ)

4.2.4 ระยะของแผ่นวงกลมด้านหลัง

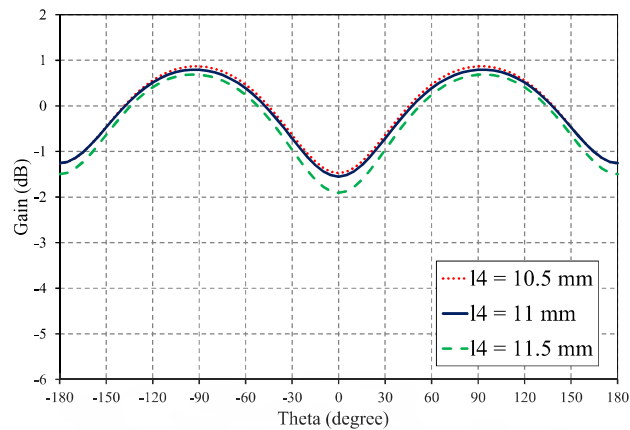
ในการศึกษาผลกระทบจากระยะของแผ่นวงกลมด้านหลัง (l_4) จะทำการกำหนดพารามิเตอร์ W และ L คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศ

ในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ l_4 เป็น 10.5 11 และ 11.5 mm ตามลำดับ จากผลที่แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าสามารถทำให้ค่าเรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงได้ทั้งช่วงความถี่สูงและความถี่ต่ำควบคู่กันไป

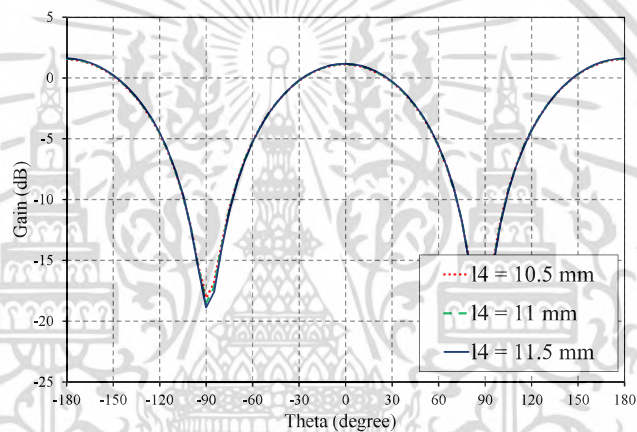


(ก) $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

รูปที่ 4.4 ระยะของแผ่นวงกลมด้านหลัง (l_4) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ



(ข) อัตรการขยายระนาบ $x-z$ ที่ความถี่ 5.5 GHz
ที่เป็นฟังก์ชันของระยะของแผ่นวงกลมด้านหลัง



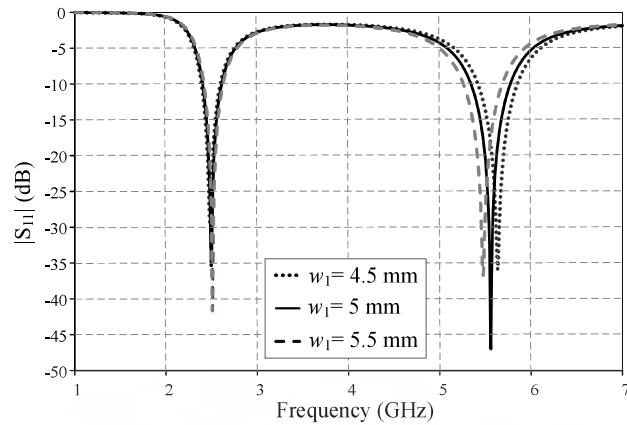
(ค) อัตรการขยายระนาบ $y-z$ ที่ความถี่ 2.45 GHz
ที่เป็นฟังก์ชันของระยะของแผ่นวงกลมด้านหลัง

รูปที่ 4.4 ระยะของแผ่นวงกลมด้านหลัง (l_4) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ (ต่อ)

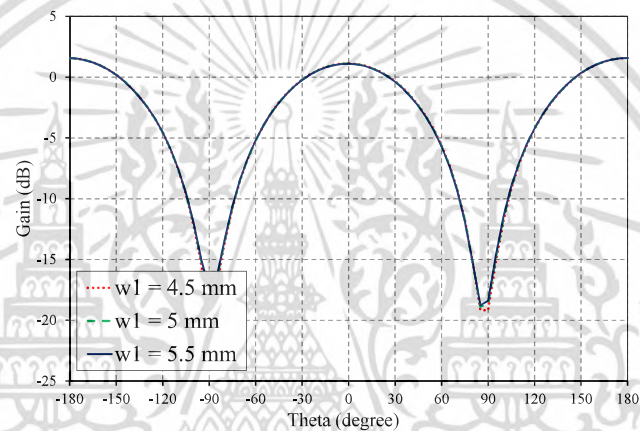
4.2.5 ความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

ในการศึกษาผลกระทบจากความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (w_1) จะกำหนดพารามิเตอร์ W และ L คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศ

เมื่อปรับค่าความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป w_1 เป็น 4.5 5 และ 5.5 mm ตามลำดับ พบว่าสามารถทำให้ค่าเรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงได้ทั้งช่วงความถี่สูงและความถี่ต่ำควบคู่กันไปดังแสดงในรูปที่ 4.5



(ก) $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่



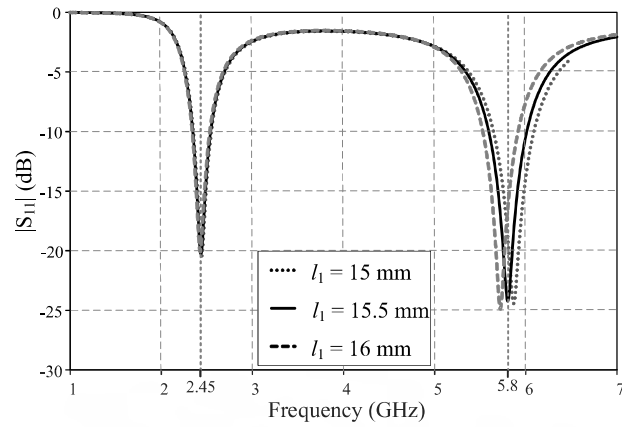
(ข) อัตราการขยายที่เป็นฟังก์ชันของความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

รูปที่ 4.5 ความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (w_1) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ

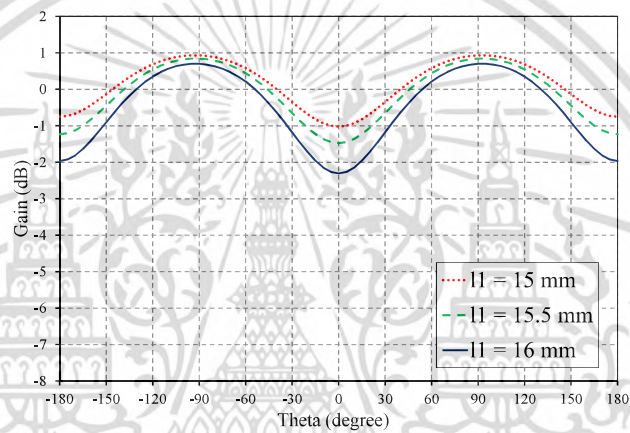
4.2.6 ระยะของแผ่นวงกลมด้านหน้า

ในการศึกษาผลกระทบจากระยะของแผ่นวงกลมด้านหน้า (l_1) จะทำการกำหนดพารามิเตอร์ W และ L คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศ

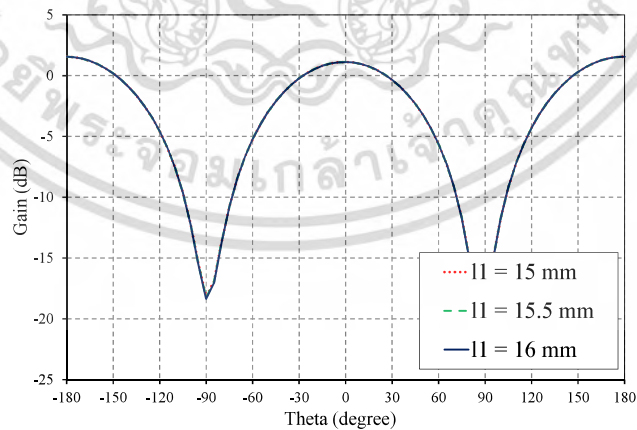
เมื่อทำการปรับค่าระยะของแผ่นวงกลมด้านหน้า l_1 เป็น 15 15.5 และ 16 mm ตามลำดับ พบว่าสามารถทำให้ค่าเรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงได้ทั้งช่วงความถี่สูงและความถี่ต่ำควบคู่กันไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.6



(ก) $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่



(ข) อัตราการขยายระนาบ x-z ที่ความถี่ 5.5 GHz
ที่เป็นฟังก์ชันของระยะของแผ่นวงกลมด้านหน้า



(ค) อัตราการขยายระนาบ y-z ที่ความถี่ 2.45 GHz
ที่เป็นฟังก์ชันของระยะของแผ่นวงกลมด้านหน้า

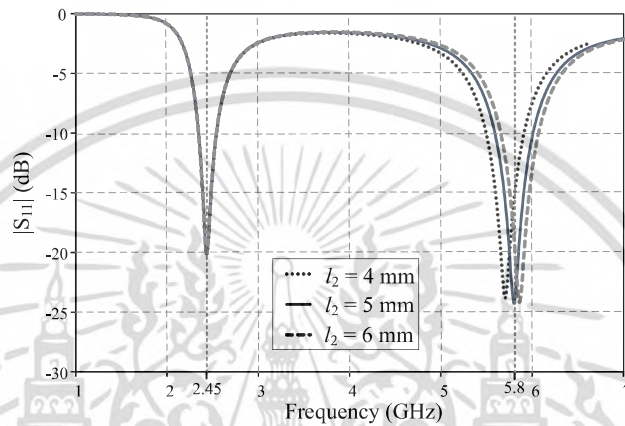
รูปที่ 4.6 ระยะของแผ่นวงกลมด้านหน้า (l_1) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

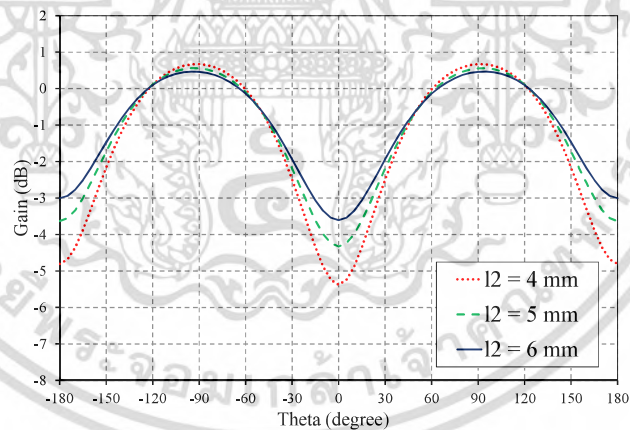
4.2.7 ระยะเวลาของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

ในการศึกษาผลกระทบจากระยะห่างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (l_2) จะทำการกำหนดพารามิเตอร์ W และ L คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศ

เมื่อทำการปรับค่าระยะห่างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป l_2 เป็น 4 5 และ 6 mm ตามลำดับ พบว่าสามารถทำให้ค่าเรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงได้ทั้งช่วงความถี่สูงและความถี่ต่ำควบคู่กันไปดังแสดงในรูปที่ 4.7



(ก) $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

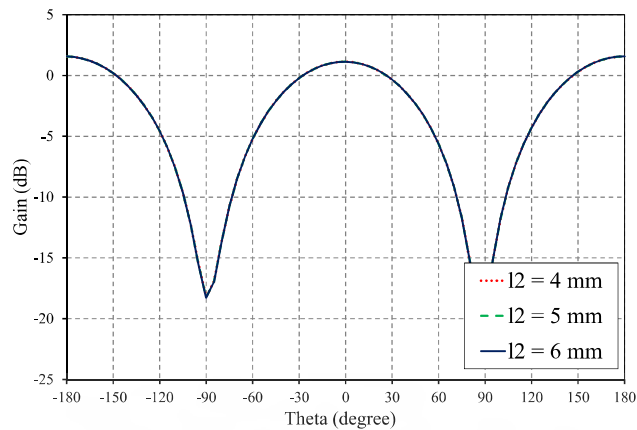


(ข) อัตราการขยายระนาบ x-z ที่ความถี่ 5.5 GHz

ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

รูปที่ 4.7 ระยะเวลาของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (l_2) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



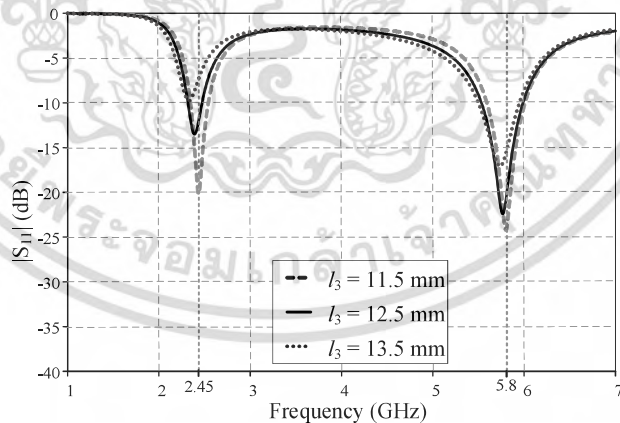
(ค) อัตราการขยายระนาบ $y-z$ ที่ความถี่ 2.45 GHz
ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

รูปที่ 4.7 ระยะห่างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป (l_2) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ (ต่อ)

4.2.8 ความยาวของระนาบกราวด์

ในการศึกษาผลกระทบจากความยาวของระนาบกราวด์ (l_3) จะทำการกำหนดพารามิเตอร์ W และ L คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศ

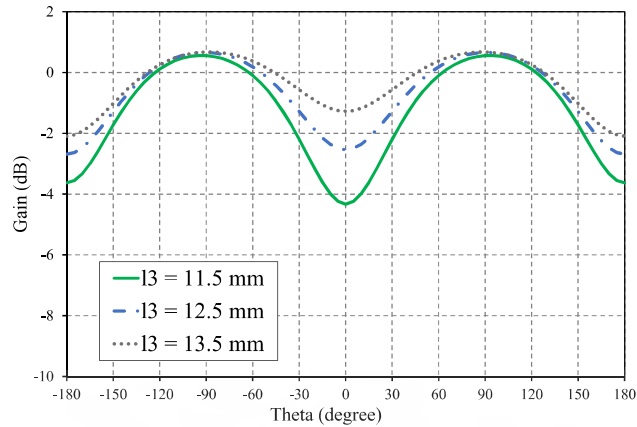
เมื่อทำการปรับค่าความยาวของระนาบกราวด์ l_3 เป็น 11.5 12.5 และ 13.5 mm ตามลำดับ จะทำให้ค่าเรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงได้ทั้งช่วงความถี่สูงและความถี่ต่ำควบคู่กันไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.8



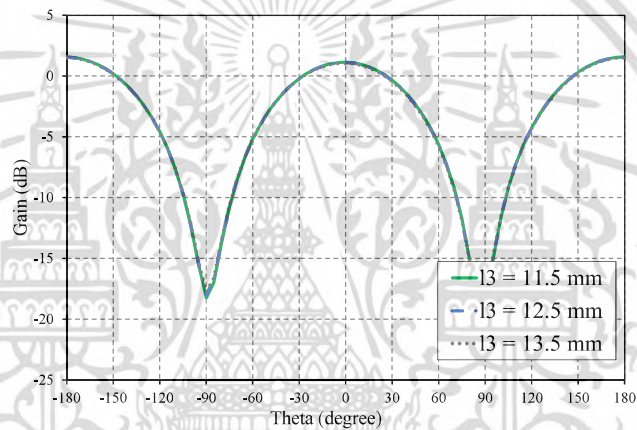
(ก) $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

รูปที่ 4.8 ความยาวของระนาบกราวด์ (l_3) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) อัตรการขยายระนาบ $x-z$ ที่ความถี่ 5.5 GHz ที่เป็นฟังก์ชันของความยาวของระนาบกราวนด์



(ค) อัตรการขยายระนาบ $y-z$ ที่ความถี่ 2.45 GHz ที่เป็นฟังก์ชันของความยาวของระนาบกราวนด์

รูปที่ 4.8 ความยาวของระนาบกราวนด์ (l_3) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ (ต่อ)

4.2.9 ระยะของจุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นวงกลม

ในการศึกษาผลกระทบจากระยะของจุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นวงกลม (l_5) จะทำการกำหนดพารามิเตอร์ W และ L คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศ

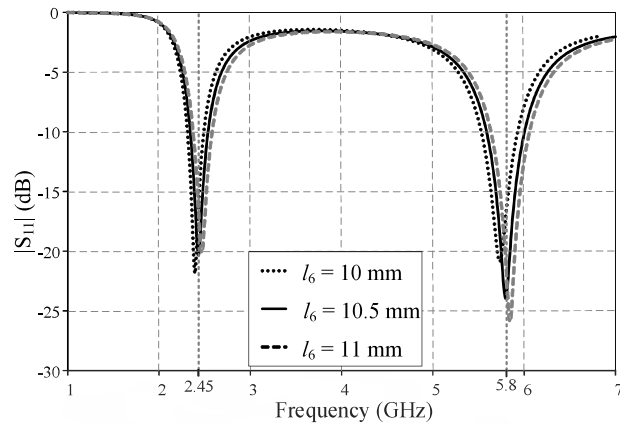
เมื่อทำการปรับค่าระยะของจุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นวงกลม l_5 เป็น 17.5 mm จะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นค่าที่เหมาะสม

4.2.10 ระยะของจุดป้อนสัญญาณ

ในการศึกษาผลกระทบจากระยะของจุดป้อนสัญญาณ (l_6) จะทำการกำหนดพารามิเตอร์ W และ L คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศ

เมื่อทำการปรับค่าระยะของจุดป้อนสัญญาณ l_6 เป็น 10, 10.5 และ 11 mm ตามลำดับ จะทำให้ค่าเรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงได้ในช่วงความถี่สูงและความถี่ต่ำควบคู่กันไปดังแสดงในรูปที่ 4.9

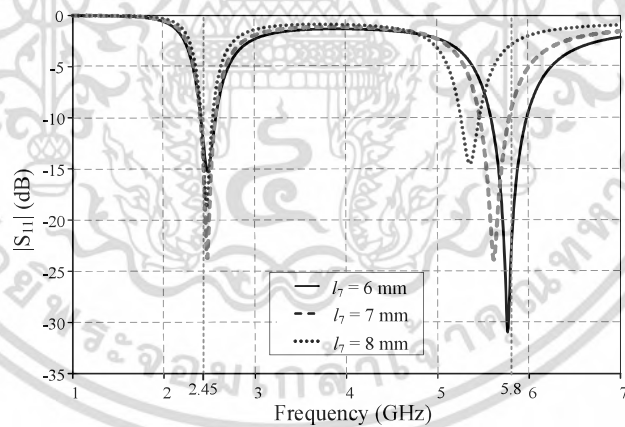
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่รูปที่ 4.9 ระยะของจุดบ่อนสัญญาณ (l_6) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ

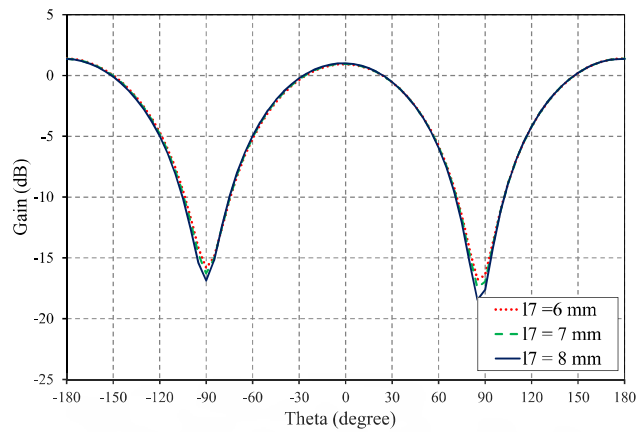
4.2.11 ระยะของจุดลัดวงจร

ในการศึกษาผลกระทบจากระยะของจุดลัดวงจร (l_7) จะกำหนดพารามิเตอร์ W และ L คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศ

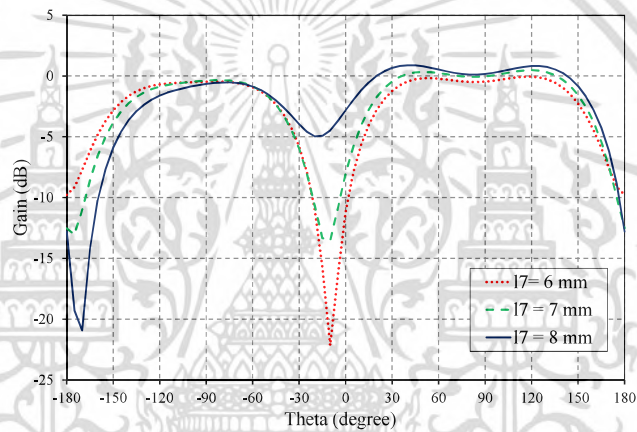
เมื่อปรับค่าระยะของจุดลัดวงจร l_7 เป็น 6 7 และ 8 mm ตามลำดับ จะทำให้ค่าเรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงได้ทั้งช่วงความถี่สูงและความถี่ต่ำควบคู่กันไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.10

(ก) $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่รูปที่ 4.10 ระยะของจุดลัดวงจร (l_7) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ

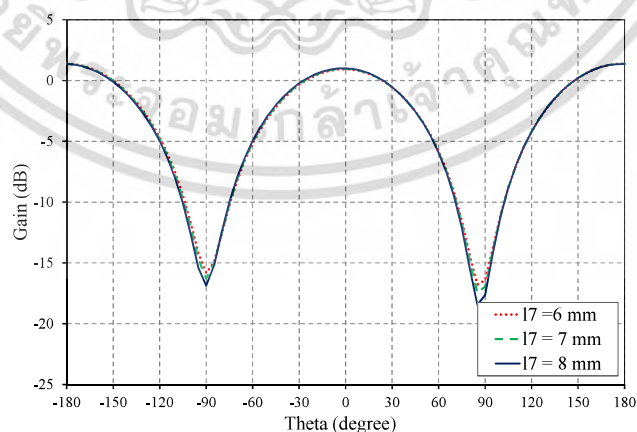
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) อัตราการขยายระนาบ $x-z$ ที่ความถี่ 5.5 GHz
ที่เป็นฟังก์ชันของระยะของจุดลัดวงจร



(ค) อัตราการขยายระนาบ $y-z$ ที่ความถี่ 5.5 GHz
ที่เป็นฟังก์ชันของระยะของจุดลัดวงจร



(ง) อัตราการขยายระนาบ $y-z$ ที่ความถี่ 2.45 GHz
ที่เป็นฟังก์ชันของระยะของจุดลัดวงจร

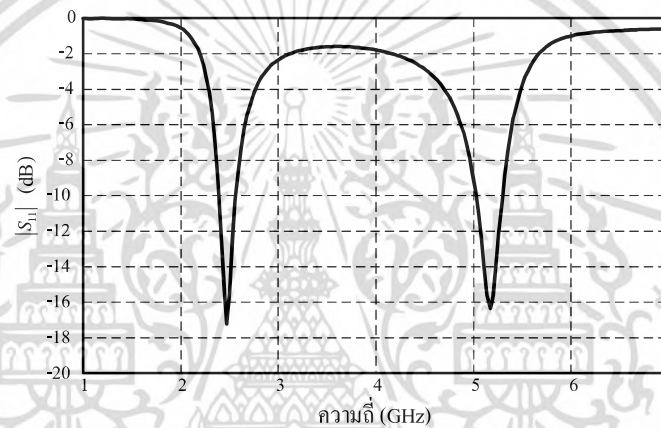
รูปที่ 4.10 ระยะของจุดลัดวงจร (l_7) ต่อประสิทธิภาพสายอากาศ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

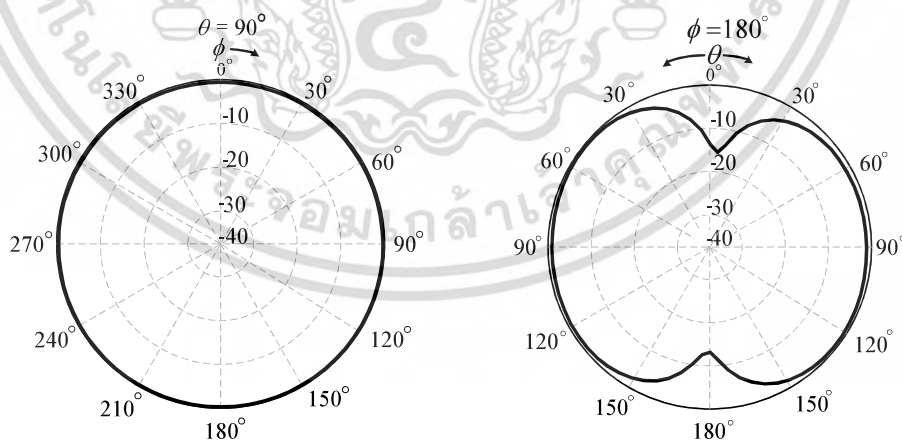
4.2.12 ระยะห่างของวัสดุฐานรอง

ในการศึกษาผลกระทบจากระยะห่างของวัสดุฐานรอง (g) จะทำการกำหนดพารามิเตอร์ W และ L คือ ความกว้างและความยาวของสายอากาศ

เมื่อทำการปรับค่าระยะห่างของวัสดุฐานรอง g เป็น 1.27 mm จะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นค่าที่เหมาะสม คือสายอากาศสามารถที่จะสอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ $x-y$ และระนาบ $x-z$ ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นกึ่งรอบทิศทางด้วยอัตราขยายเท่ากับ 1.90 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz แสดงดังรูปที่ 4.11 (ข) และ (ค) ในส่วนของความถี่ 5.2 GHz ก็ยังคงมีลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบกึ่งรอบทิศทางด้วยอัตราขยายเท่ากับ 2.36 dBi ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ง) และ (จ)



(ก) ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

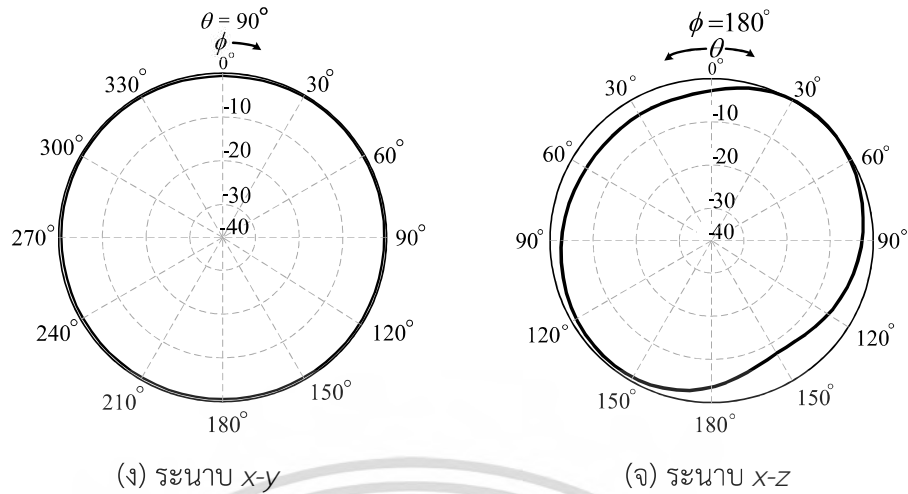


(ข) ระนาบ $x-y$

(ค) ระนาบ $x-z$

รูปที่ 4.11 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ (ต่อ)

เมื่อได้แนวทางจากการศึกษาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เรียบร้อยแล้ว จึงปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมอีกครั้ง ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ขนาด (mm)
W	ความกว้างของสายอากาศ	20
L	ความยาวของสายอากาศ	30
w_1	ความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	5
l_1	ระยะของแผ่นวงกลมด้านหน้า	15.5
l_2	ระยะห่างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	5
l_3	ความยาวของระนาบกราวด์	11.5
l_4	ระยะของแผ่นวงกลมด้านหลัง	10.7
l_5	ระยะของจุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นวงกลม	17.5
l_6	ระยะของจุดป้อนสัญญาณ	10.55
l_7	ระยะของจุดลัดวงจร	6.5
r_1	รัศมีของแผ่นวงกลมด้านหน้า	6.4
r_2	รัศมีของแผ่นวงกลมด้านหลัง	11.6
g	ระยะห่างของวัสดุฐานรอง	1.27
t	ความหนาของวัสดุฐานรอง	1.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในกรณีศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สรุป

การออกแบบสายอากาศที่นำเสนอจะใช้สายอากาศแพตช์วงกลมเป็นสายอากาศต้นแบบ เพื่อต้องการให้สายอากาศสามารถใช้งานกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสองช่วงความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้วิธีการเพิ่มแพตช์วงกลมแผ่นที่สองที่ด้านล่างของวัสดุฐานรองหรือด้านหลังของแพตช์วงกลมแผ่นที่หนึ่ง แต่เนื่องจากช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศนั้นยังไม่เพียงพอ จึงได้ใช้เทคนิควัสดุฐานรองหลายชั้นเพื่อเพิ่มช่วงกว้างความถี่ โดยมีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 3 ชั้น คือ ชั้นที่ 1 และ 3 เป็นวัสดุฐานรองชนิด FR4 มีความหนา 1.6 mm และชั้นที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศมีระยะห่างเท่ากับ 1.27 mm จากผลของ $|S_{11}|$ พบว่า สายอากาศสามารถที่จะตอบสนองได้ดีที่ช่วงความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz

จากนั้นได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศโดยศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญของสายอากาศคือ r_1 และ r_2 เมื่อปรับค่ารัศมี r_1 (แผ่นวงกลมเล็กด้านหน้า) จะทำให้เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงที่ช่วงความถี่ 5-6 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่สูง จึงสามารถที่จะยืนยันได้ว่าแผ่นวงกลมเล็กบนวัสดุฐานรองด้านบนจะให้การตอบสนองที่ช่วงความถี่สูง ถัดมาเมื่อทำการปรับค่ารัศมี r_2 (แผ่นวงกลมใหญ่ด้านล่าง) จะทำให้เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงที่ช่วงความถี่ 2-3 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าจึงสามารถที่จะยืนยันได้ว่าแผ่นวงกลมใหญ่บนวัสดุฐานรองด้านล่างจะให้การตอบสนองที่ช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า จากการศึกษาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้แล้ว สามารถที่จะใช้เป็นแนวทางในการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศที่นำเสนอได้ เพื่อให้สามารถที่จะทำการตอบสนองได้ทั้งสองย่านความถี่

ดังนั้น เมื่อได้แนวทางจากการศึกษาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เรียบร้อยแล้วได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมอีกครั้ง ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศสองย่านความถี่แบบแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

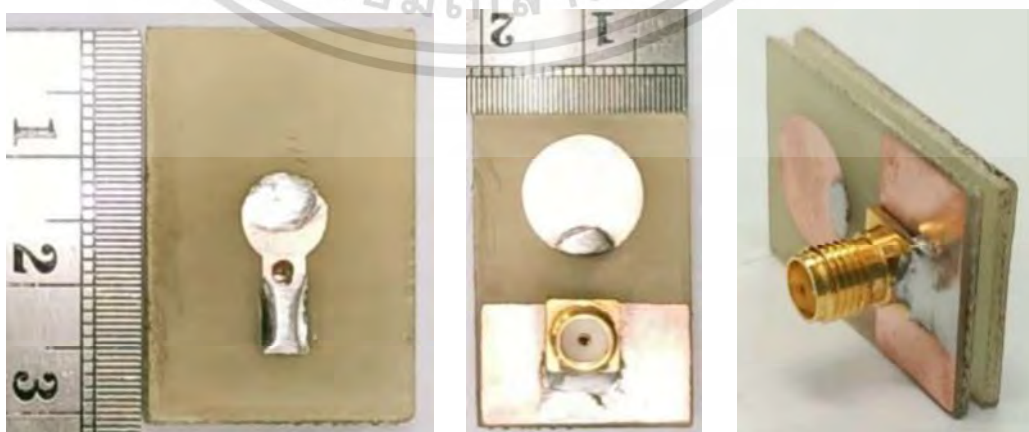
บทที่ 5

การทดสอบและผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบของสายอากาศสองย่านความถี่แบบแพตช์วงกลมคู่ ซึ่งจะพิจารณาถึงผลของ $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราการขยายของสายอากาศ โดยจะทำการทดสอบในห้องไร้การสะท้อน (Anechoic chamber) และใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายในการทดสอบ ซึ่งจะนำผลที่ได้จากการจำลองมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบอีกด้วย เพื่อยืนยันความถูกต้องของคุณสมบัติของสายอากาศ

5.1 สายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำผลที่ได้จากการจำลองมาสร้างสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบคุณสมบัติ โดยสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นที่ได้ทำการออกแบบถูกสร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยถูกสร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ที่มีความหนา 1.6 mm และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant: ϵ_r) เท่ากับ 4.3 จำนวน 2 แผ่น แผ่นแรกถูกใช้เป็นแผ่นวัสดุฐานรองชั้นบนแผ่นที่ 1 ด้านบนถูกกัดเป็นรูวงกลมขนาดเล็กที่มีการป้อนสัญญาณเข้าด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริปรวมกับการป้อนสัญญาณแบบโพรบ และวัสดุฐานรองแผ่นที่ 2 ด้านหลังถูกกัดให้เป็นแผ่นวงกลมขนาดใหญ่และระนาบกราวด์ เมื่อนำทั้งสองแผ่นมาเชื่อมต่อกันด้วยลวดตัวนำและเว้นระยะห่างเป็นช่องว่างอากาศก็จะได้เป็นสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรอง 3 ชั้น คือชั้นที่ 1 เป็น FR4 ชั้นที่ 2 เป็นอากาศ และชั้นที่ 3 เป็น FR4 จากนั้นจึงนำสายอากาศต้นแบบนี้ไปทดสอบค่า $|S_{11}|$ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นแสดงดังตารางที่ 4.1



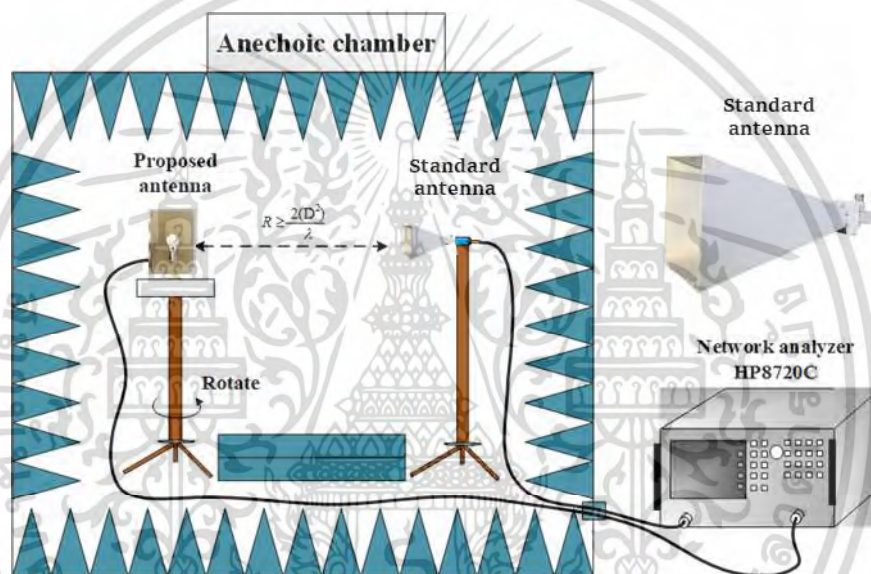
รูปที่ 5.1 ต้นแบบสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดสอบสายอากาศต้นแบบ

จากบทที่ 4 ที่ได้วิเคราะห์สายอากาศ รวมทั้งหาพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับเงื่อนไขคุณลักษณะของสายอากาศ จากนั้นจึงนำผลที่ได้จากการจำลองมาสร้างสายอากาศต้นแบบและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ

การทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบจะทดสอบในห้องไร้การสะท้อน (Anechoic chamber) และทดสอบ $|S_{11}|$ ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP-8720C กับสายอากาศแบบปากแตรทรงพีระมิด โดยทดสอบอัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 อุปกรณ์ในการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะใช้สายอากาศแบบปากแตรทรงพีระมิดเป็นสายอากาศทางด้านส่ง และใช้สายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศทางด้านรับ การทดสอบจะทำในสนามระยะไกล จึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างด้านส่งและด้านรับเป็น 2.2 m ซึ่งอยู่ในสนามระยะไกล

และการทดสอบอัตราขยายจะใช้สายอากาศแบบปากแตรทรงพีระมิด เป็นสายอากาศทางด้านส่ง และใช้สายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศทางด้านรับ การทดสอบจะทำในสนามระยะไกลเช่นเดียวกัน จึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างด้านส่งและด้านรับเป็น 2.2 m ซึ่งอยู่ในสนามระยะไกล และคำนวณหาอัตราขยายจากสมการที่ 5.1

$$(G_t)_{dB} + (G_r)_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \quad (5.1)$$

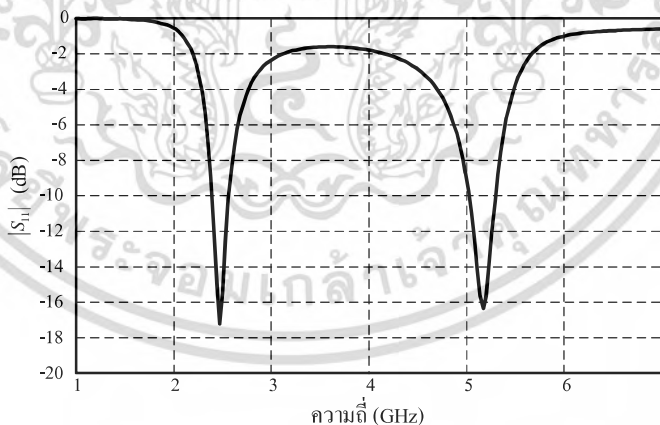
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ G_t คือ อัตราการขยายของสายอากาศส่ง (dB)
 G_r คือ อัตราการขยายของสายอากาศรับ (dB)
 R คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ (m)
 λ คือ ความยาวคลื่น
 P_r คือ กำลังงานที่ด้านรับ (W)
 P_t คือ กำลังงานที่ด้านส่ง (W)

5.2.1 การทดสอบ $|S_{11}|$

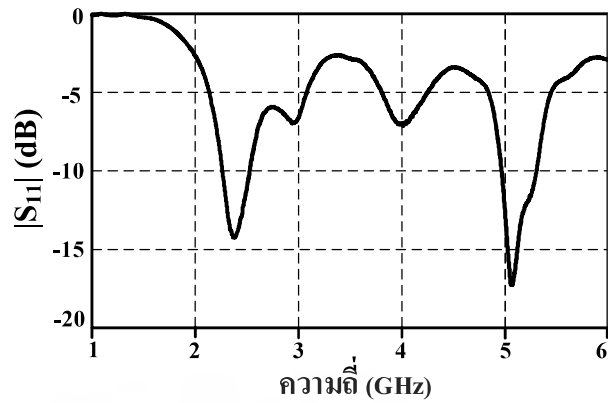
ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น พบว่าสามารถตอบสนองได้ 2 ช่วงความถี่คือ มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ต่ำกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ 2.38-2.57 GHz และช่วงความถี่ 5.0-5.3 GHz

ในขณะที่ผลการทดสอบพบว่าสายอากาศต้นแบบสามารถที่จะเรโซแนนซ์ที่ช่วงความถี่ 2.26-2.53 GHz และที่ช่วงความถี่ 4.97-5.30 GHz ผลการจำลองและผลการทดสอบ $|S_{11}|$ แสดงดังรูปที่ 5.3 ซึ่งผลการจำลองและผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ผลการทดสอบให้ค่า $|S_{11}|$ ที่ดีกว่า เนื่องจากทำการเพิ่มวัสดุฐานรองชั้นเดียวความหนา 1.6 mm เป็นวัสดุฐานรอง 2 ชั้นและมีความหนารวม 3.2 mm และทำการปรับปรุงด้วยการแยกวัสดุฐานรอง 2 ชั้นที่มีความหนา 3.2 mm ออกจากกันด้วยระยะห่างเท่ากับ 1.27 mm ก็จะกลายมาเป็นสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรอง 3 ชั้น



(ก) ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

รูปที่ 5.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

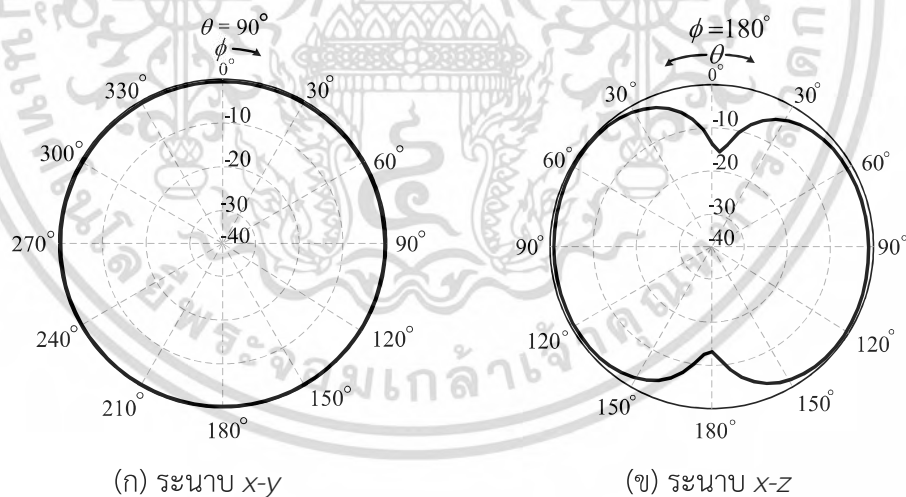


(ข) ผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

รูปที่ 5.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ (ต่อ)

5.2.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ $x-y$ และระนาบ $x-z$ ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่รอบทิศทางด้วยอัตราขยายเท่ากับ 1.90 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz แสดงดังรูปที่ 5.4 (ก) และ (ข) ในส่วนของความถี่ 5.2 GHz ก็ยังคงมีลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบที่รอบทิศทางด้วยอัตราขยายเท่ากับ 2.36 dBi ดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ค) และ (ง)



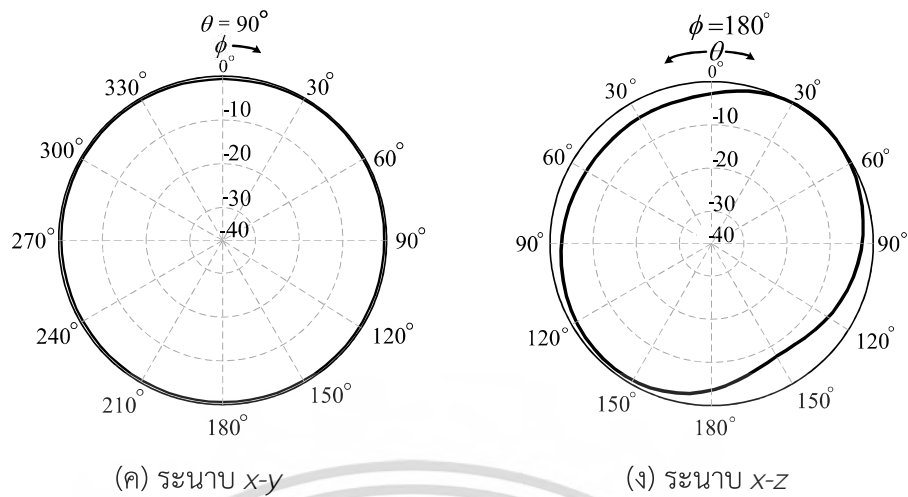
(ก) ระนาบ $x-y$

(ข) ระนาบ $x-z$

รูปที่ 5.4 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ

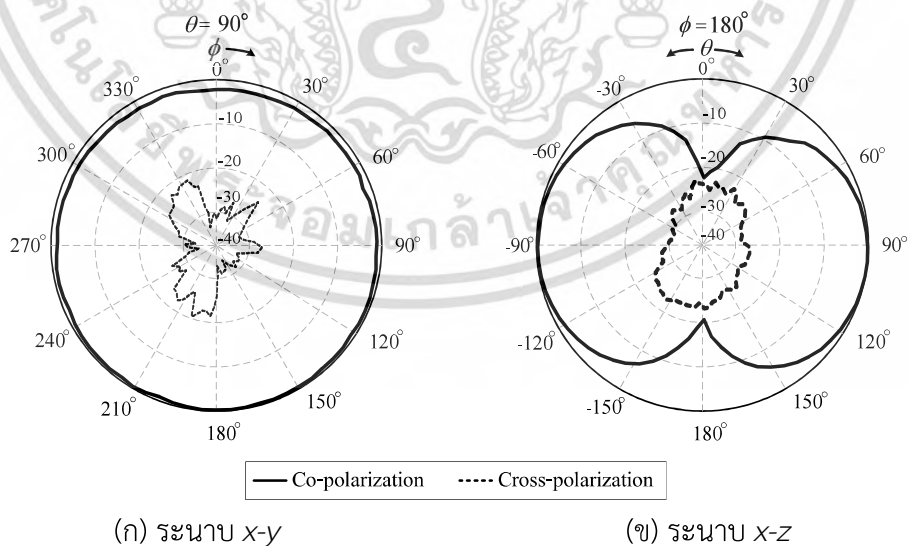
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ (ต่อ)

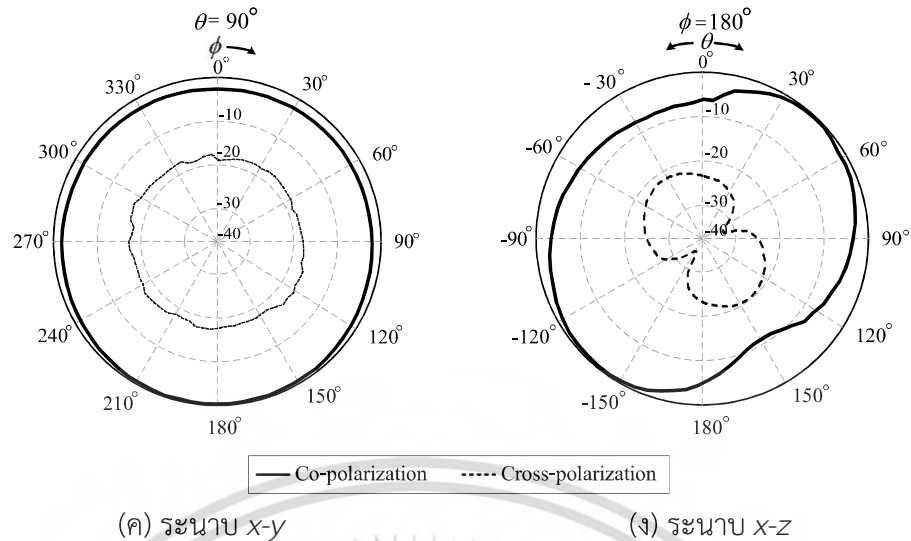
ในขณะที่ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz ในระนาบ x-y และระนาบ x-z พบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบกึ่งรอบทิศทางทั้งสองความถี่ แต่อย่างไรก็ตาม ที่ความถี่ 5.2 GHz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีลักษณะเอียงไปจากมุมหลักประมาณ 45 องศา ทั้งนี้ได้แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization) เปรียบเทียบด้วย พบว่า สายอากาศต้นแบบมีค่าโพลาไรซ์ไขว้ค่อนข้างต่ำและยังแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่นำเสนอมีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

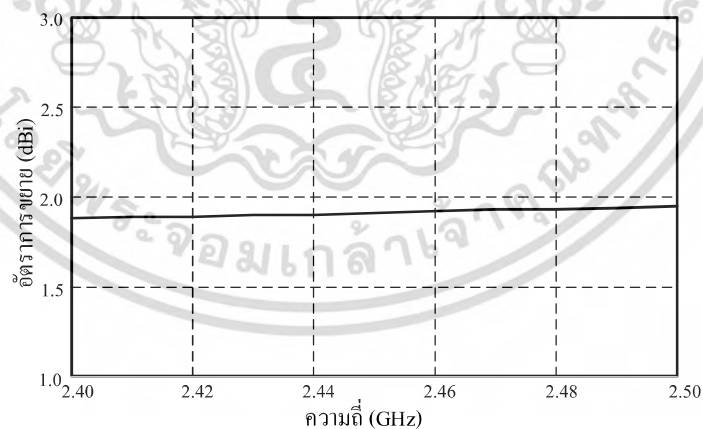


รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 2.45 GHz และ 5.2 GHz ตามลำดับ (ต่อ)

5.2.3 การทดสอบอัตราการขยาย

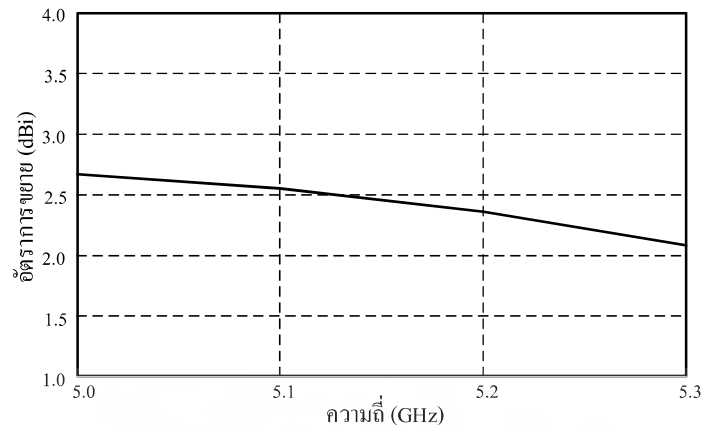
ผลการจำลองอัตราการขยายเท่ากับ 1.90 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz ในส่วนของความถี่ 5.2 GHz มีอัตราการขยายเท่ากับ 2.36 dBi ซึ่งอัตราการขยายตลอดช่วงความถี่สำหรับช่วงความถี่ 2.38-2.57 GHz และ 5.0-5.3 GHz พบว่ามีอัตราการขยายที่ใกล้เคียงกันตลอดย่านความถี่ดังแสดงในรูปที่ 5.6



(ก) ช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz

รูปที่ 5.6 ผลการจำลองอัตราการขยายของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

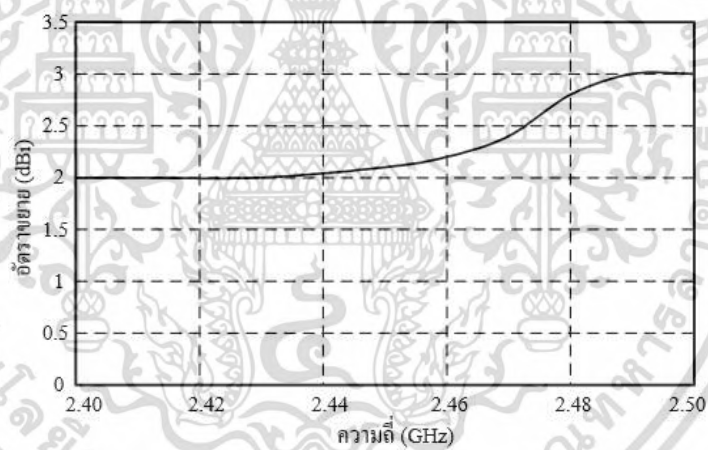
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ช่วงความถี่ 5.0-5.3 GHz

รูปที่ 5.6 ผลการจำลองอัตราการขยายของสายอากาศแพตช์ช่วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น (ต่อ)

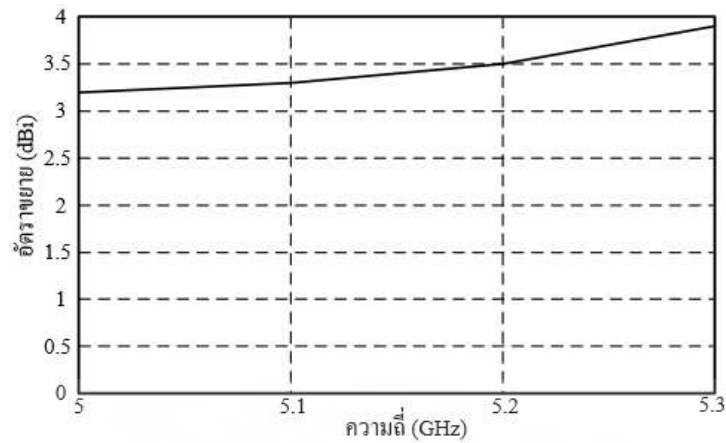
ในขณะที่ผลการทดสอบอัตราการขยายเท่ากับ 2.10 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และเท่ากับ 3.50 dBi ที่ความถี่ 5.2 GHz



(ก) ช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz

รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศแพตช์ช่วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ช่วงความถี่ 5.0-5.3 GHz

รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น (ต่อ)

5.3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศที่นำเสนอกับสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีมาก่อน

จากผลการออกแบบของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นที่ได้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีการนำเสนอในบทความทางวิชาการต่างๆ พบว่ามีจุดเด่นคือ มีขนาดโครงสร้างเล็กกะทัดรัด สามารถตอบสนองได้สองย่านความถี่ด้วยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศที่นำเสนอกับสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีมาก่อน

สายอากาศ	ช่วงความถี่	อัตราการขยาย	ขนาด (mm ²)
[6]	2.4-2.48 GHz และ 5.15-5.35 GHz	5.3 dBi (2.45 GHz) และ 3.7 dBi (5.25 GHz)	31 × 7.5
[7]	2.4-2.485 GHz และ 5.15-5.825 GHz	3.2 dBi (2.45 GHz) และ 5.5 dBi (5.5 GHz)	40 × 40
[8]	3.28-3.71 GHz และ 4.8-5.18 GHz	8.34 dBi (3.5 GHz) และ 8.7 dBi (4.9 GHz)	42 × 42
[9]	3.4-3.6 GHz และ 4.8-5 GHz	5 dBi (3.5 GHz) และ 5.5 dBi (4.9 GHz)	-
[10]	3.35-3.62 GHz และ 4.99-5.15 GHz	5.5 dBi (3.5 GHz) และ 6.75 dBi (5 GHz)	-
สายอากาศที่ นำเสนอ	2.26-2.53 GHz และ 4.97-5.30 GHz	1.8 dBi (2.45 GHz) และ 2.21 dBi (5.2 GHz)	20 × 30

จากตารางที่ 5.1 เป็นการเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศที่นำเสนอกับสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีมาก่อน ซึ่งทำการเลือกสายอากาศที่สามารถทำงานในช่วงความถี่ 2.26-3.71 GHz และ 4.8-5.825 GHz ผลการเปรียบเทียบพบว่าสายอากาศในงานวิจัย [8] มีอัตราการขยายที่สูงที่สุด แต่ขนาดของสายอากาศใหญ่เป็นสองเท่าของสายอากาศที่นำเสนอ สายอากาศในงานวิจัย [8-10] ต้องทำการป้อนสัญญาณมากกว่าหนึ่งจุด (Multiport feeding) และสายอากาศในงานวิจัยทั้ง [6-10] มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่กว่า ไม่เล็กกะทัดรัดเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศที่นำเสนออีกด้วย

5.4 สรุป

จากการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ พบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีขนาด 20 × 30 mm² ลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยแผ่นแพร่กระจายคลื่นวงกลมจำนวน 2 แผ่น วางซ้อนกันอยู่ด้านบนและด้านล่างวัสดุฐานรองหลายชั้น เชื่อมถึงกันด้วยเส้นลวดและมีการป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบ จากผลการจำลองและผลการทดสอบพบว่า สายอากาศที่นำเสนอมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50 Ω และมีค่า |S₁₁| ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.26-2.53 GHz และในช่วงความถี่ 4.97-5.30 GHz มีอัตราการขยายเท่ากับ 2.10 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และเท่ากับ 3.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dBi ที่ความถี่ 5.2 GHz และมีค่าโพลาไรเซชันต่ำ ทั้งนี้สายอากาศสามารถใช้งานกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสองช่วงความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz และช่วงความถี่ 5.0-5.3 GHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอนี้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางและมีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น โครงสร้างของสายอากาศมีขนาดกว้าง 20 mm และยาว 30 mm โดยมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50Ω และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.26-2.53 GHz และในช่วงความถี่ 4.97-5.30 GHz สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz ในระนาบ x-y และระนาบ x-z พบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบกึ่งรอบทิศทางทั้งสองความถี่ และมีอัตราการขยายเท่ากับ 1.80 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และเท่ากับ 2.21 dBi ที่ความถี่ 5.2 GHz ซึ่งจุดเด่นของสายอากาศที่นำเสนอนี้คือ มีขนาดโครงสร้างเล็กกะทัดรัด สามารถตอบสนองได้สองย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะกล่าวถึงเนื้อหาโดยสรุปของวิทยานิพนธ์ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น รวมถึงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ และในส่วนที่สองจะเป็นข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เริ่มจากความต้องการในการใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายที่เพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายในหลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการรับส่งสัญญาณ การลดขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์การสื่อสาร และการเพิ่มช่วงความถี่ในการใช้งาน เป็นต้น

ในการเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานจากช่วงความถี่เดียวเป็นสองช่วงความถี่สำหรับเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายนี้ เป็นการเพิ่มช่องทางการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายเพิ่มขึ้นเพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ซึ่งมีความนิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวาง จากเดิมมีการใช้งานในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz แต่ในปัจจุบันได้มีการขยายการใช้งานเพิ่มขึ้นในช่วงความถี่ 5-6 GHz ตามมาตรฐาน IEEE802.11 [1] จะเห็นได้ว่าการเพิ่มช่องสัญญาณดังกล่าว ทำให้สามารถมีช่องทางการติดต่อสื่อสารสำหรับใช้งานมากยิ่งขึ้น และที่สำคัญตัวสายอากาศควรจะต้องมีขนาดเล็กกะทัดรัดอีกด้วย จึงเป็นที่มาและความสำคัญในการออกแบบสายอากาศแพตช์วงกลมคู่วางตัวบนวัสดุ

ฐานรองหลายชั้นเพื่อให้สายอากาศมีขนาดกะทัดรัดและสามารถตอบสนองได้สองย่านความถี่
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของทฤษฎีได้กล่าวถึงระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) จากนั้นจึงนำเสนอทฤษฎีและหลักการของสายอากาศ และสายอากาศไมโครสตริบ ในส่วนสุดท้ายได้กล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อนสำหรับการออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่ ซึ่งมีการนำเสนอเทคนิคต่างๆ เช่น การใช้วิธีการบ่อนสัญญาณที่ขอบข้างและการตัดขอบของแผ่นแพร่กระจายสัญญาณ การใช้โครงสร้างการบ่อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide: CPW) และสายอากาศโมโนโพลหลายแผ่นทำให้สามารถได้การตอบสนองหลายช่วงความถี่และสามารถนำไปใช้งานได้กับระบบวายแมกซ์ (WiMax) และเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ใช้เทคนิคโครงสร้างของสายอากาศแพตช์ (Patch antenna) ร่วมกับช่องเปิดด้วยการบ่อนสัญญาณ 4 จุด และมีการนำเสนอสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีขนาดเล็กด้วยเทคนิควิธีการลดขนาดโดยรวมของสายอากาศด้วยวิธีเส้นคดเคี้ยวและสายอากาศแบบเอพฟ์หัวกลับ (Planar Inverted-F Antenna: PIFA) เป็นต้น

การออกแบบสายอากาศต้นแบบในบทที่ 3 เริ่มจากการออกแบบสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองแบบ FR4 ชั้นเดียวที่มีความหนา 1.6 mm และมีการบ่อนสัญญาณแบบโพรบ ซึ่งจะใช้ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 และนำมาออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST microwave studio เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่ได้คำนวณทางทฤษฎี โดยจะมุ่งเน้นพิจารณาพารามิเตอร์หลักมูลของสายอากาศ ที่จะใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมของสายอากาศ โดยอ้างอิงกับพลังงานที่แผ่ออกไปประสิทธิภาพของกำลัง การเข้ากันได้หรือการแมตช์กันระหว่างสายอากาศและวงจรบ่อนกำลัง เป็นต้น ซึ่งพารามิเตอร์บางตัวจะมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกัน เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่ได้ออกแบบ และปรับพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับเงื่อนไขคุณลักษณะของสายอากาศ และสามารถใช้งานกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสองช่วงความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในบทที่ 4 ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ของสายอากาศที่นำเสนอ โดยโครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 3 ชั้น คือ ชั้นที่ 1 และ 3 เป็นวัสดุฐานรองชนิด FR4 มีความหนา 1.6 mm ละชั้นที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศมีระยะห่างเท่ากับ 1.27 mm การศึกษาผลกระทบจะวิเคราะห์จาก $|S_{11}|$ เป็นหลัก การเพิ่มวัสดุฐานรองชั้นเดียวความหนา 1.6 mm เป็นวัสดุฐานรอง 2 ชั้นและมีความหนารวม 3.2 mm และทำการปรับปรุงด้วยการแยกวัสดุฐานรอง 2 ชั้นออกจากกันทำให้มีผลกระทบต่อความถี่รีโซแนนซ์ของ $|S_{11}|$ ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ทางด้านกายภาพ และสายอากาศสามารถที่จะตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย การศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ ส่งผลให้ได้ค่าที่เหมาะสมการออกแบบสายอากาศที่นำเสนอ

เมื่อได้แนวทางจากการศึกษาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เรียบร้อยแล้วได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมอีกครั้ง ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นแสดงดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบทที่ 5 เป็นการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศสองย่านความถี่แบบแพตช์วงกลมคู่ที่สร้างขึ้นมีขนาด $20 \times 30 \text{ mm}^2$ ซึ่งจะพิจารณาถึงผลของ $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และ อัตราการขยายของสายอากาศ โดยจะทำการทดสอบในห้องไร้การสะท้อนและใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายในการทดสอบ ซึ่งจะนำผลที่ได้จากการจำลองมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของคุณสมบัติของสายอากาศ

จากผลการออกแบบของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นที่ได้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ จะได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ตารางสรุปผลการจำลองและผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ

คุณลักษณะของสายอากาศ		ผลการจำลอง	ผลการทดสอบ
$ S_{11} < -10 \text{ dB}$		2.38-2.57 GHz	2.26-2.53 GHz
		5.0-5.3 GHz	4.97-5.30 GHz
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	2.45 GHz	รอบทิศทาง	รอบทิศทาง
	5.2 GHz	กึ่งรอบทิศทาง	กึ่งรอบทิศทาง
โพลาริซ		แบบเชิงเส้น	แบบเชิงเส้น
อัตราการขยาย	2.45 GHz	1.90 dBi	2.10 dBi
	5.2 GHz	2.36 dBi	3.50 dBi

ดังนั้นสายอากาศสามารถใช้งานกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสองช่วงความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลของโครงสร้างสายอากาศที่ได้จากการออกแบบสามารถทำให้เกิดการเรโซแนนซ์สองความถี่ได้ จึงสามารถทำให้เกิดแนวคิดให้การพัฒนาโครงสร้างดังกล่าวให้สามารถเกิดการเรโซแนนซ์หลายความถี่ได้เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีขนาดกะทัดรัดและสามารถตอบสนองได้หลายย่านความถี่ ซึ่งจะสามารถรองรับกับเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายในอนาคตที่มีความต้องการใช้หลากหลายย่านความถี่ได้

จากเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาด้วยการจำลอง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดองค์ความรู้เชิงลึกในหลักการทำงานของสายอากาศจึงควรที่จะมีการศึกษาและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการคำนวณทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่อไป ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์แบบควาวิตี เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Banerji and R. S. Chowdhury, "On IEEE 802.11: Wireless LAN Technology," International Journal of Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT), vol. 3, no. 4, pp. 1-20, July 2013.
- [2] Cisco Public Information, "Cisco Aironet 1140 Series Access Point," 2009 Cisco Systems, Inc.
- [3] A. H. Rambe and K. Abdillah, "A Low Profile Rectangular Patch Microstrip Antenna for Dualband Operation of Wireless Communication System," IOP Conference Series Materials Science and Engineering, pp. 1-6, February 2018.
- [4] H. Yao, X. Liu, H. Zhu, H. Li, G. Dong and K. Bi, "Dual-Band Microstrip Antenna Based on Polarization Conversion Metasurface Structure," Frontiers in Physics, vol. 8, pp. 1-6, September 2020.
- [5] A. Z. Manouare, S. Ibnyaich, A. E. Idrissi and A. Ghammaz, "A Compact Dual-Band CPW-Fed Planar Monopole Antenna for 2.62-2.73 GHz Frequency Band, WiMAX and WLAN Applications," Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, vol. 16, no. 2, pp. 567-576, June 2017.
- [6] A. Khaleghi, "Dual Band Meander Line Antenna for Wireless LAN Communication," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 55, no. 3, pp. 1004-1009, September 2007.
- [7] W. Ren, "Compact Dual-Band Slot Antenna for 2.4/5 GHz WLAN Applications," Progress In Electromagnetics Research B, vol. 8, pp. 319-327, 2008.
- [8] Y. Li, Z. Zhao, Z. Tang and Y. Yin, "Differentially Fed, Dual-Band Dual-Polarized Filtering Antenna with High Selectivity for 5G Sub-6 GHz Base Station Applications," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 68, no. 4, pp. 3231-3236, April 2020.
- [9] Y. Y. Liu, X. Y. Zhang and S. J. Yang, "Compact Dual-Band Dual-Polarized Filtering Antenna for 5G Base Station Applications," 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Osaka, Japan, April 2021.
- [10] C. Wang, Z. Han, H. Liu, X. Zhang and L. Wang, "2020 9th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)," 2020 9th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xiamen, China, November 2020.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] M. Abioghli, “Miniaturized Dual-Band Antenna for 2.4/5.8GHz WLAN Operation in the Notebook Computer,” Australian Journal of Basic and Applied Sciences, vol. 5, no. 12, pp. 1636-1640, 2011.
- [12] M. Md. Shukor, M. Z. A. Abd. Aziz, B. H. Ahmad, M. K. Suaidi and M. A. Othman, “Design of Dual Band Antenna for WLAN Application,” Jurnal Teknologi , Sciences & Engineering, vol. 67, no. 3, pp. 71–77, 2014.
- [13] S. C. Basaran, “Compact Dual-Band Split-Ring Antenna for 2.4/5.2 GHz WLAN Applications,” Turk J Elec Eng & Comp Sci, vol.20, no.3, pp. 347-352, 2012.
- [14] U. Deepaka, T. K. Roshnaa and P. Mohanan, “A Dual Band SIR Coupled Dipole Antenna for 2.4/5.2/5.8 GHz Applications,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 4, pp. 1514 - 1520, April 2015.
- [15] S. Kawdungta and C. Phongcharoenpanich, “MFOA-integrated Modified Inverted F-based Adaptive Array Antenna for 2.4 GHz Band Applications,” International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, vol. 26, no. 9, pp. 784-795, November 2016.
- [16] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005.
- [17] CST Microwave Studio Suite, (User’s Manual), 2017.
- [18] K.-L. Wong, “Compact and Broadband Microstrip Antennas,” John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- [19] Classification of Polarization. [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html>
- [20] Magnetic Resonance Imaging: MRI). [Online]. Available: <https://www.bangkokhospital.com/content/cardiovascular-mri>
- [21] หลักเกณฑ์การใช้คลื่นความถี่ย่าน-5-กิกะเฮิรตซ์. [Online]. Available: https://www.nbtc.go.th/spectrum_management

