

สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ  
MICROSTRIP PATCH ARRAY ANTENNA



โดย  
นายชญานิน ดวงหลักธรรม  
นางสาวชลาลัย สิงห์บุรณา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ  
MICROSTRIP ARRAY ANTENNA

โดย

นายชยานิน ตวงหลักธรรม 52010199

นางสาวชลาลัย สิงห์บุรณา 52010228

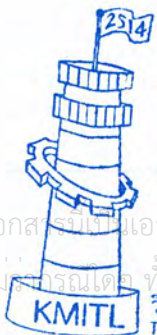
อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพานิชย์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

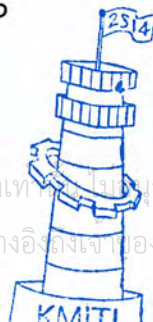
รศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2555



ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(Signature)  
อาจารย์ที่ปรึกษา



ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(Signature)  
กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ

MICROSTRIP PATCH ARRAY ANTENNA

ผู้จัดทำ

1. นายชญานิน ตวงหลักทรัพย์ 52010199
2. นางสาวชลาลัย สิงห์บุรณา 52010228



(รศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือจากหลายท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำ และแนะแนวทางในแก้ไข

คณะผู้จัดทำ ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่อนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ด้วยดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบรรพต เคลือบพวงพิทย์ และบริษัท ไทยคม จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนวัสดุในการสร้างสายอากาศ ทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณนายสิทธิชัย เด่นตรี รวมทั้งรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอก ของห้องปฏิบัติการการสื่อสารไร้สายที่ให้คำแนะนำ กำลังใจ และความช่วยเหลือ ในการดำเนินงานมาโดยตลอด

สุดท้ายของขอบคุณบิดา มารดา ที่ช่วยสนับสนุนทุนทรัพย์ในการดำเนินงาน เป็นกำลังใจ และผลักดันจนโครงการสำเร็จด้วยดี

นายชญาสิน ดวงหลักธรรม  
นางสาวชลาสัย สิงห์บุรณา  
ผู้จัดทำ

สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ

MICROSTRIP PATCH ARRAY ANTENNA

โดย นายชยณิน ตวงหลักธรรม 52010199

นางสาวชลาสัย สิงห์บุรณา 52010228

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษา วิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างสายอากาศไมโครสตริป เพื่อใช้ติดตั้งบนยานพาหนะเคลื่อนที่สำหรับรับสัญญาณจากดาวเทียมโดยวิเคราะห์สายอากาศองค์ประกอบเดียวที่มีคุณสมบัติที่ดี จากนั้นนำมาประกอบรวมกันเป็นแถวลำดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ ให้มีความกว้างลำคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และอัตราขยายที่เหมาะสมสำหรับระบบสื่อสารดาวเทียมซึ่งทำงานในย่านความถี่ KU-BAND ที่ความถี่ตั้งแต่ 11.5 GHz ถึง 11.7 GHz และมีการโพลาไรซ์เชิงเส้น

### ABSTRACT

THIS PROJECT IS TO STUDY, ANALYZE, DESIGN AND FABRICATE THE MICROSTRIP ANTENNA WHICH USING ON THE VEHICLES. THIS ANTENNA WILL RECEIVE SIGNAL FROM THE SATELLITE. THE SINGLE ELEMENT ANTENNA THAT HAS GOOD CHARACTERISTICS WILL BE FIRST CHOSEN. SUBSEQUENTLY, THE CHOSEN ELEMENT WILL BE ARRANGED TO FORM THE ARRAY IN ORDER TO ACHIEVE THE BETTER PERFORMANCES. THE ELEMENT SPACINGS ARE DESIGNED TO OBTAIN THE ACCEPTABLE BEAMWIDTH, DIRECTIVITY, GAIN, AND POLARIZATION. THE ANTENNA RECEIVES SIGNAL FROM THE SATELLITE AT KU-BAND ALONG THE FREQUENCY FROM 11.5 GHz TO 11.7 GHz WITH LINEAR POLARIZATION.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VIII
<b>บทที่ 1</b>	
<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
<b>บทที่ 2</b>	
<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 บทนำ	3
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีสายอากาศ	3
2.3 หลักการทำงานของสายอากาศ	5
2.4 สายอากาศชนิดต่างๆ	6
2.5 พารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศ	12
2.6 สายอากาศไมโครสตริป	30
2.7 สายอากาศแฉวลำดับ	36
2.8 ไมโครสตริป	41
2.9 วงจรแบ่งกำลังและการออกแบบตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง	43
2.10 สรุป	46
<b>บทที่ 3</b>	
<b>การออกแบบและการจำลองผลการทำงานของสายอากาศไมโครสตริป</b>	<b>47</b>
3.1 บทนำ	47
3.2 การออกแบบ	47
3.3 การจำลองผลการทำงานของสายอากาศ	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 สายอากาศไมโครสตริปต้นแบบ	58
3.5 สรุป	62
<b>บทที่ 4</b>	
การออกแบบวงจรแบ่งกำลังและสายอากาศแถวลำดับ	63
4.1 บทนำ	63
4.2 การออกแบบวงจรแบ่งกำลัง	63
4.3 การจำลองผลการทำงานของสายอากาศ	69
4.4 สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ	72
<b>บทที่ 5</b>	
ผลการทดลอง	76
5.1 บทนำ	76
5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	77
5.3 การติดตั้งและทดสอบสายอากาศ	77
5.4 สรุป	84
<b>บทที่ 6</b>	
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	85
6.1 สรุปผล	85
6.2 ข้อเสนอแนะ	85
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>87</b>
<b>ภาคผนวก ROGER 5880</b>	

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบพื้นฐานของการสื่อสารดาวเทียม	4
2.2 กรณีของการเกิดการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแบบเส้นลวด	6
2.3 ตัวอย่างสายอากาศเส้นลวด	7
2.4 ตัวอย่างสายอากาศช่องเปิด	8
2.5 สายอากาศไมโครสตริป	9
2.6 สายอากาศแถวลำดับแบบ	10
2.7 สายอากาศสะท้อน	11
2.8 สายอากาศแบบเลนส์รูปทรงต่าง ๆ	12
2.9 ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	13
2.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว	14
2.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร	15
2.12 ลำคลื่นต่าง ๆ และปริมิตซ์ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบ 3 มิติ	16
2.13 การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ	17
2.14 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของสนามที่ระยะต่างๆ	18
2.15 การโพลารไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง	25
2.16 การโพลารไรซ์เชิงเส้นแนวนอน	25
2.17 การโพลารไรซ์เชิงเส้นแนวเฉียง	26
2.18 การโพลารไรซ์วงกลมแบบหมุนขวา	26
2.19 การโพลารไรซ์วงกลมแบบหมุนซ้าย	27
2.20 สายอากาศส่งในโหมดการส่ง	28
2.21 โครงสร้างไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	30
2.22 แผ่นตัวนำรูปทรงต่าง ๆ	31
2.23 ตัวอย่างวิธีการป้อนกำลัง	33
2.24 สายอากาศแถวลำดับประกอบด้วยสายอากาศสองตัว	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 สายอากาศแถวลำดับประกอบด้วยสายอากาศสองตัว	40
2.26 ไมโครสตริป	42
2.27 วงจรแบ่งกำลังและวงจรรวมกำลัง	44
2.28 วงจรแบ่งกำลังแบบ T-JUNCTION	45
2.29 วงจรแบ่งกำลังแบบ WILKINSON	46
3.1 ความยาวประสิทธิผลของสายอากาศไมโครสตริปรูปลี่เหลี่ยม	48
3.2 ไมโครสตริปสี่เหลี่ยมและวงจรมุมแบบ TRANSMISSION-LINE MODEL	51
3.3 โครงสร้างสายอากาศเริ่มต้นที่ทำการจำลอง	53
3.4 $ S_{11} $ ของสายอากาศเริ่มต้นจากการจำลอง	54
3.5 การเลือกค่าความยาวของแผ่นตัวนำ	55
3.6 การเลือกค่าความกว้างของแผ่นตัวนำ	56
3.7 การเลือกค่าความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยม	57
3.8 $ S_{11} $ ของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง	58
3.9 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง	59
3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง	60
3.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลอง	61
4.1 ความยาวของสายนำสัญญาณ	64
4.2 การปรับค่าอิมพีแดนซ์	65
4.3 การพิจารณาหาค่าอิมพีแดนซ์	68
4.4 ขนาดส่วนต่างๆ ของไมโครสตริปแถวลำดับ	69
4.5 โครงสร้างสายอากาศต้นแบบที่ทำการจำลอง	70
4.6 $ S_{11} $ ของสายอากาศแถวลำดับจากการจำลองก่อนปรับปรุง	71
4.7 $ S_{11} $ ของสายอากาศแถวลำดับจากการจำลองหลังปรับปรุง	72
4.8 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ได้จากการจำลอง	73

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.9	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง	74
4.10	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลอง	75
5.1	สายอากาศแถวลำดับต้นแบบ	77
5.2	การติดตั้งอุปกรณ์	78
5.3	$ S_{11} $ ของสายอากาศ	78
5.4	อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	79
5.5	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	80
5.6	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบการส่งผ่านของสายอากาศ	81
5.7	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 11.6 GHz	82

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริป	
3.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปต้นแบบ	52
3.3 คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริป	57
4.1 พารามิเตอร์ของวงจรแบ่งกำลังก่อนปรับปรุง	61
4.2 พารามิเตอร์ของวงจรแบ่งกำลังต้นแบบ	69
4.3 คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแฉวลำดับ	71
5.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศแฉวลำดับ	75
5.2 คุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ 11.6 GHz	76
	83

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สายอากาศเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการแพร่หรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณข้อมูลไม่สามารถส่งผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศได้โดยตรง จึงมีความจำเป็นต้องมีการแปลงสัญญาณข้อมูลให้มีความถี่ที่สูงขึ้นแล้วจึงส่งผ่านสายอากาศเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังอากาศ ทางด้านรับก็ใช้สายอากาศเป็นอุปกรณ์ในการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากลับมา ทั้งนี้สายอากาศนั้นมีหลายรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งก็มีข้อดี และข้อเสียพร้อมทั้งข้อจำกัดในการใช้งานแตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่แล้วเรามักจะพบสายอากาศไม่กี่ประเภท เช่น สายอากาศเส้นลวด (Wire antennas) สายอากาศช่องเปิด (Aperture antennas) สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antennas) สายอากาศสะท้อนคลื่น (Reflector antennas) เป็นต้น

สายอากาศที่ใช้บนอากาศยาน เช่น เครื่องบิน ยานอวกาศ ดาวเทียม และจรวด จะต้องเป็นสายอากาศชนิดพิเศษ ที่มีจุดเด่นตรงน้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย ไม่ต้านแรงลม โครงสร้างไม่ซับซ้อน มีความแข็งแรง ราคาถูก และมีสมรรถนะสูง ซึ่งสายอากาศแบบไมโครสตริป (Microstrip antennas) เป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสมใช้ในงาน ในปัจจุบันสายอากาศไมโครสตริปมีใช้งานกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบสื่อสารไร้สาย

ไมโครสตริป เป็นสายอากาศที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ และใช้ในการเชื่อมโยงชิ้นส่วนวงจรต่างๆของวงจรไมโครเวฟ เนื่องจากไมโครสตริปมีขนาดเล็ก จึงเหมาะสำหรับทำวงจรรวมของไมโครเวฟ MIC (Microwave integrated circuit) แต่ก็มีข้อจำกัดที่สามารถรับสัญญาณได้ดีต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่น นอกจากนั้นยังมีค่าการลดทอนสัญญาณค่อนข้างสูงด้วย ดังนั้นจึงใช้ในการส่งผ่านและจัดการกับสัญญาณที่มีระดับต่ำและในบริเวณจำกัด เช่น ภายในแผ่นวงจรพิมพ์อันเดียวกัน เป็นต้น เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริป จะประพฤติตัวเหมือนกับสายส่ง (Transmission line) แทนที่จะเป็นตัวแพร่กระจายคลื่น จึงพิจารณาได้ว่าเป็นสายอากาศที่มีประสิทธิภาพต่ำ และมีแบนด์วิดธ์ (Bandwidth) แคบมาก ดังนั้นในการใช้งานจริงทั่วไปจึงนิยมสร้างเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษา วิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างสายอากาศแบบแถวลำดับเพื่อใช้ติดตั้งบนยานพาหนะเคลื่อนที่สำหรับรับสัญญาณจากดาวเทียม โดยจะออกแบบให้สายอากาศมีคุณลักษณะ อันได้แก่ความกว้างลำคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อัตราขยาย โพลาริซ และค่า  $|S_{11}|$  ให้เหมาะสมสำหรับระบบสื่อสารดาวเทียมซึ่งทำงานในย่านความถี่ KU-BAND มีแบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 11.5 GHz ถึง 11.7 GHz มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางเดียวและการโพลาไรซ์เชิงเส้น

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) ศึกษาโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริบ วิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างสายอากาศที่ตอบรับกับลักษณะการใช้งานตามต้องการ
- 2) วิเคราะห์ ออกแบบ และสร้าง Feeding Network
- 3) ทำการออกแบบสายอากาศแถวลำดับ โดยนำ Feeding Network มาเชื่อมต่อกับสายอากาศไมโครสตริบต้นแบบ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

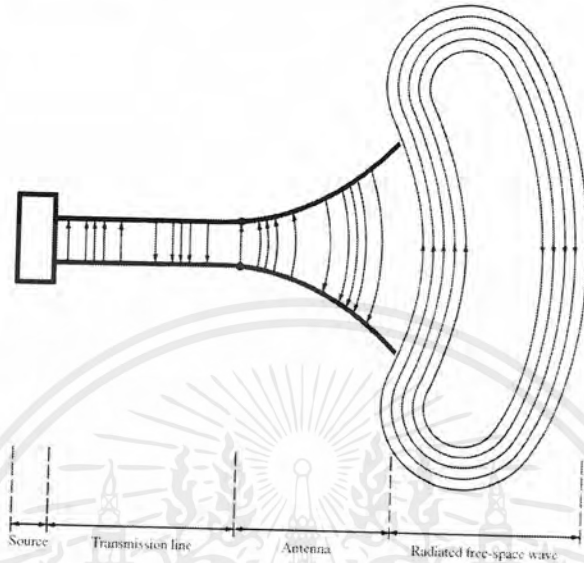
ปัจจุบันการสื่อสารโทรคมนาคมได้พัฒนาไปอย่างมากด้วยความรวดเร็ว ระบบการสื่อสารถือเป็นปัจจัยหลักที่ขาดไม่ได้ในปัจจุบัน การแข่งขันในยุคปัจจุบันยังคงเป็นการแข่งขันทางด้านประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบสื่อสารให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย เพื่อรองรับและตอบสนองต่อความต้องการใช้งานของคนในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาการพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สาย

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงหัวข้อต่างๆ ที่เกี่ยวข้องคือ คือ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีสายอากาศ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศ สายอากาศไมโครสตริบแบบแถวลำดับ และ วงจรแบ่งกำลังและการออกแบบตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง เพื่อนำไปสู่การสร้างสายอากาศแบบแถวลำดับที่มีประสิทธิภาพ เพื่อใช้ในการติดตั้งบนยานพาหนะเคลื่อนที่สำหรับรับสัญญาณจากดาวเทียม

#### 2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีสายอากาศ

หน้าที่หลักที่สำคัญของสายอากาศ (Antenna) คือ การแปลงรูปพลังงานกลับไปกลับมาระหว่างพลังงานในลักษณะคลื่นบังคับวิถีในสายส่ง (Transmission line) และคลื่นแพร่กระจายในช่องว่างอิสระ (Radiated free-space wave) สายอากาศจะเปลี่ยนรูปพลังงานจากลักษณะคลื่นบังคับวิถีไปเป็นคลื่นแพร่กระจายในช่องว่างอิสระแพร่กระจายไปในทิศทางที่ต้องการ เมื่อทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และเป็นสายอากาศรับ สายอากาศจะเปลี่ยนคลื่นที่แพร่กระจายในช่องว่างอิสระที่มาจากทิศทางที่ต้องการเป็นคลื่นบังคับวิถีในสายส่ง และเข้าสู่เครื่องรับในที่สุด นอกจากนี้ยังอาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า สายอากาศคือส่วนที่เป็นภาคเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กทรอนิกส์

(คลื่นบังคับวิถี) กับโฟตอน (คลื่นที่แพร่กระจายในช่องว่างอิสระ) รูปที่ 2.1 แสดงการทำงานของสายอากาศตามที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 2.1 การทำงานของสายอากาศ [1]

จุดเด่นของสายอากาศไม่ได้มีเพียงการมีความสามารถในการรับ หรือแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่านั้น สายอากาศยังต้องสามารถเลือกรับ หรือส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากต้นกำเนิดหรือสู่ปลายทางที่กำหนดได้ ด้วยเหตุผลนี้การออกแบบสายอากาศเพื่อให้ทำงานที่กำหนดได้จึงมีความสำคัญ เมื่อนำผลลัพธ์จากการออกแบบไปวิเคราะห์ ก็จะทราบสมรรถนะของสายอากาศได้ว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ ผลการวิเคราะห์ทำให้สามารถหาทางปรับเปลี่ยนการออกแบบ เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นได้ล่วงหน้า

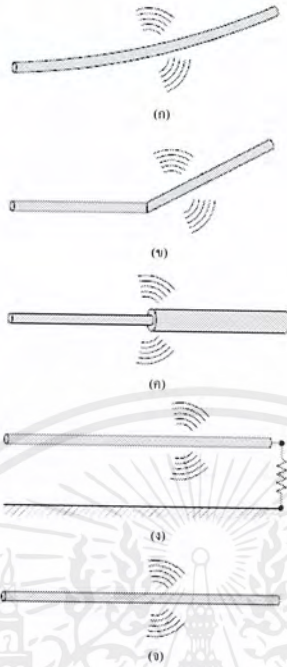
อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะสามารถเริ่มต้นการวิเคราะห์สายอากาศชนิดใดๆก็ตาม จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับธรรมชาติของการทำงานของสายอากาศ สายอากาศชนิดต่าง ๆ ความรู้พื้นฐานทางทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ ทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้าประยุกต์ที่ใช้ทางวิศวกรรมสายอากาศ การจัดสายอากาศให้ทำงานเป็นกลุ่ม ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวิธีการวิเคราะห์สายอากาศ ทั้งนี้เพื่อให้การศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์สายอากาศมีประสิทธิภาพ

## 2.3 หลักการทำงานของสายอากาศ

เมื่อสายอากาศทำงานในภาครับนั้น การทำงานเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปพลังงานจากลักษณะของคลื่นที่แพร่กระจายในช่องว่างอิสระให้เป็นคลื่นบังคับวิธีสามารถเข้าใจได้โดยง่าย ด้วยการพิจารณาว่าคลื่นที่แพร่กระจายในช่องว่างอิสระที่ตกกระทบบนสายอากาศเหนี่ยวนำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศอันเป็นผลสืบเนื่องให้มีการไหลของกระแสของสัญญาณสัญญาณ เมื่อมีการต่อขั้วดังกล่าวเข้ากับอุปกรณ์รับสัญญาณ

ในกรณีที่สายอากาศทำงานในภาคส่งสิ่งที่เกิดขึ้นคือ พลังงานในลักษณะของคลื่นบังคับวิธีได้รับการแปลงรูปไปเป็นพลังงานในลักษณะของคลื่นในช่องว่างอิสระการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นในลักษณะที่มีการเคลื่อนย้ายของพลังงานจากสายอากาศเข้าสู่บริเวณช่องว่างอิสระ โดยปราศจากการนำ หรือการพา และมีใช้การแพร่ เนื่องจากมีการเปลี่ยนรูปพลังงาน ดังนั้นจึงเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวที่เกิดขึ้นว่า “การแพร่กระจายคลื่น”

สิ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่นก็คือ การเกิดขึ้นของปรากฏการณ์ เมื่อพิจารณาการทำงานของสายอากาศเส้นลวด จะพบว่าเมื่อเริ่มต้นด้วยการป้อนกำลังงานคลื่นให้ที่ขั้วของสายอากาศ ในจังหวะนี้เท่ากับมีการกระตุ้นให้อนุภาคมีประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง เมื่ออนุภาคดังกล่าวเคลื่อนที่ไปถึงปลายของเส้นลวดก็จะถูกหน่วงให้หยุด และกระดอนกลับโดยในช่วงที่อนุภาคประจุถูกเร่ง และหน่วงนี้เองจะมีการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงาน ซึ่งผลลัพธ์ก็คือการแพร่กระจายคลื่นออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การถูกเร่งนั้นเกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยแหล่งพลังงานที่ต่ออยู่ที่ขั้วของสายอากาศ ส่วนการหน่วงเป็นผลจากแรงต้านภายในเนื่องจากการเสียดตัวของประจุที่ปลายสายอากาศ ดังนั้นถ้าหากสามารถทำให้อนุภาคมีประจุถูกเร่ง และหน่วงได้ ไม่ว่าจะด้วยการทำให้มีอิมพีแดนซ์ที่ไม่ต่อเนื่องหรือการตัดหรือหักอุปกรณ์สายอากาศให้โค้งงอ ก็ จะส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ รูปที่ 2.2 แสดงกรณีต่าง ๆ ของการเกิดขึ้นของการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแบบเส้นลวด



รูปที่ 2.2 กรณีของการเกิดการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศแบบเส้นลวด [1]

(ก) แบบโด้ง (ข) แบบวง (ค) แบบไม่ต่อเนื่อง (ง) แบบอิมพีแดนซ์ไม่ต่อเนื่อง (จ) แบบแท่งสั้น

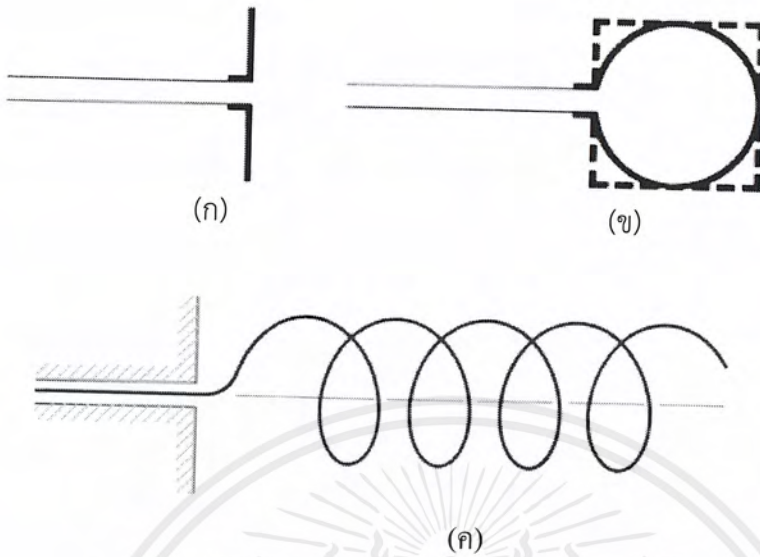
## 2.4 สายอากาศชนิดต่างๆ

ในบรรดาสายอากาศที่มีใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากในระบบต่าง ๆ ในปัจจุบัน หากจัดแบ่งตามโครงสร้างหลักที่ปรากฏ จะสามารถแบ่งได้เป็น

### 2.4.1 สายอากาศเส้นลวด (Wire antenna)

ลักษณะของสายอากาศกลุ่มนี้จะประกอบด้วยเส้นลวดตัวนำในรูปแบบต่างๆ หรืออาจเป็นท่อทรงกระบอกกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าความยาวคลื่นมากๆ สายอากาศชนิดนี้มักเป็นที่นิยมใช้งานในย่านความถี่ต่ำ รูปแบบต่างๆ ของสายอากาศชนิดนี้ได้แก่ สายอากาศขั้วคู่ (Dipole) แบบบ่วง (Loop) แบบเกลียว (Helix) วงกลม (Circular) สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square) วงรี (Ellipse) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3

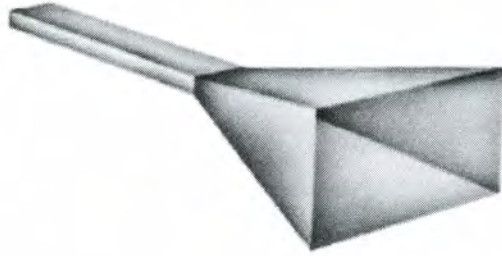
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



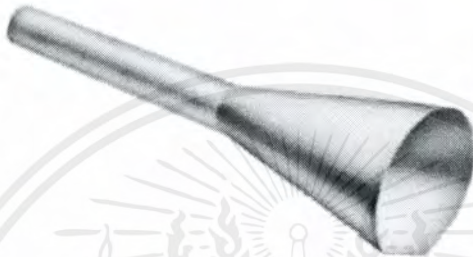
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างสายอากาศเส้นลวด [1]  
 (ก) แบบขั้นคู้ (ข) แบบบ่วงวงกลม และสี่เหลี่ยม (ค) แบบเกลียว

#### 2.4.2 สายอากาศช่องเปิด (Aperture antenna)

สายอากาศกลุ่มนี้เป็นลักษณะปรากฏให้เห็นชัดเจนในสภาพของช่องเปิดที่มีการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าโดยทิศทางของคลื่นพุ่งออกมา มักนิยมใช้งานในย่านความถี่สูง ตัวอย่างของสายอากาศกลุ่มนี้ได้แก่ ท่อนำคลื่น (Waveguide) สายอากาศปากแตร ลักษณะต่าง ๆ (Horn) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



(น)



(ข)



(ค)

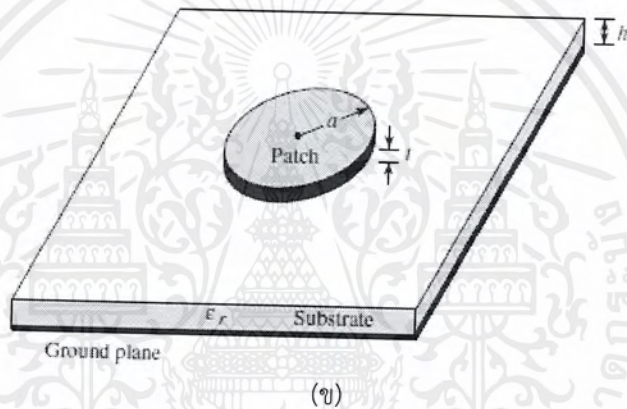
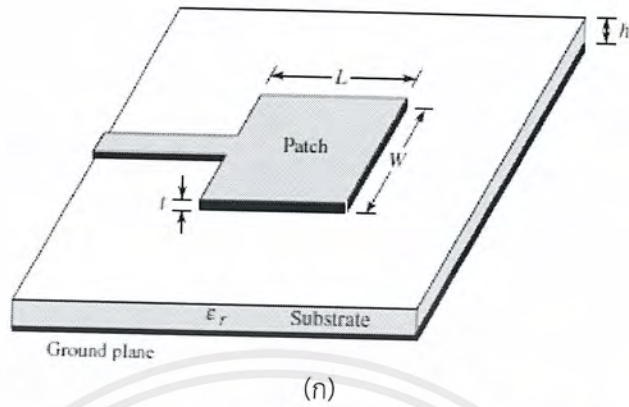
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสายอากาศช่องเปิด [1]

(ก) สายอากาศปากแตรทรงพีระมิด (ข) สายอากาศปากแตรทรงกลม (ค) ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

### 2.4.3 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antenna)

ลักษณะสำคัญของสายอากาศชนิดนี้คือ เป็นแถบโลหะบางที่มีรูปร่างใด ๆ ก็ได้โดยแถบโลหะบางนี้จะวางตัวอยู่บนเนื้อแผ่นกราวนด์ซึ่งมีวัสดุฐานรองคั่นกลางระหว่างแถบโลหะและแผ่นกราวนด์ สายอากาศชนิดนี้มักให้อัตราขยายต่ำ ดังนั้นจึงมักถูกสร้างให้อยู่ในลักษณะกลุ่มสายอากาศ (Array) จุดเด่นของสายอากาศชนิดนี้คือ ขนาดที่กะทัดรัด ความแบนราบซึ่งสามารถติดตั้งบนโครงสร้างต่าง ๆ ได้อย่างง่ายดายโดยปกติแล้วมักใช้ในย่านความถี่ค่อนข้างสูงดังแสดงในรูปที่ 2.5

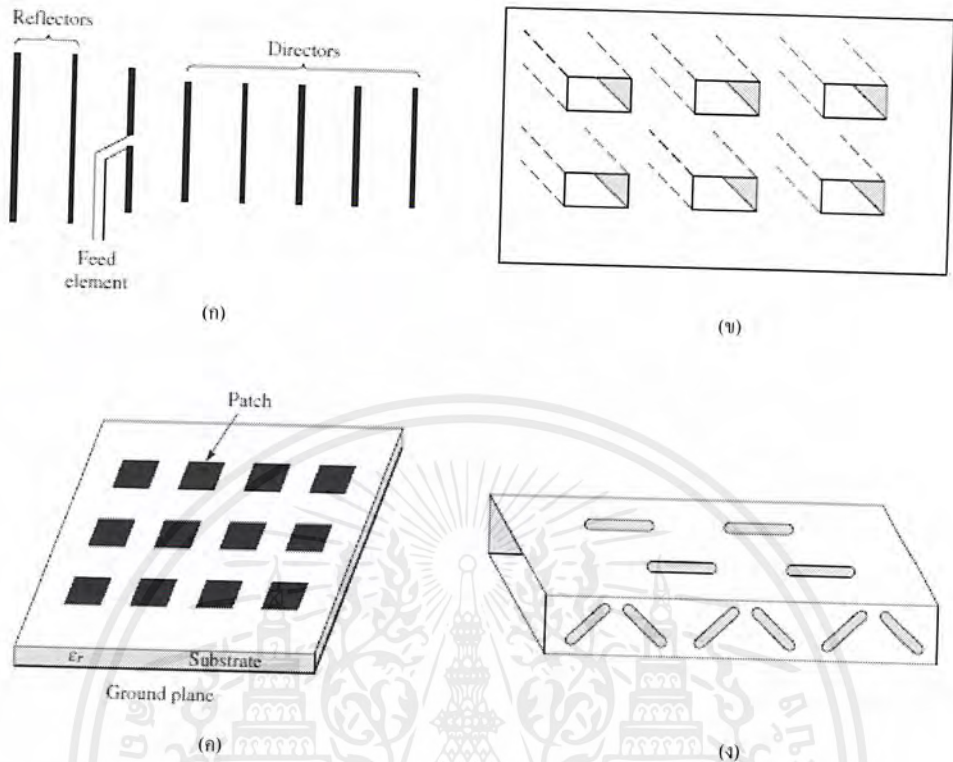
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 สายอากาศไมโครสตริป (ก) แบบสี่เหลี่ยม (ข) แบบวงกลม [1]

#### 2.4.4 สายอากาศแถวลำดับ (Array antenna)

จากสายอากาศชนิดใด ๆ ตัวเดียวที่มีสภาพเจาะจงทิศทาง และอัตราขยายที่ต่ำ เนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีการกระจายตัวออกทางด้านข้างรอบ ๆ ตัว ซึ่งหากนำสายอากาศดังกล่าว จำนวนตั้งแต่สองตัวขึ้นไปมาจัดเรียงกันอย่างเป็นระบบที่เหมาะสม จะเรียกว่า สายอากาศแถวลำดับ (Array antennas) ซึ่งผลลัพธ์จะทำให้ลำคลื่นแคบลงไปในทิศทางที่ต้องการ เป็นผลให้สภาพเจาะจงทิศทาง และอัตราขยายของสายอากาศในทิศทางที่ต้องการเพิ่มสูงขึ้นได้ ตัวอย่างของสายอากาศแถวลำดับแสดงดังรูปที่ 2.6

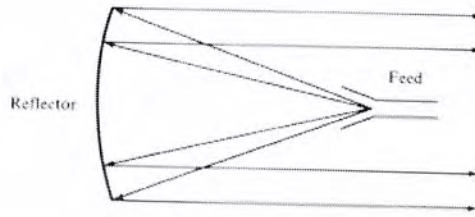


รูปที่ 2.6 สายอากาศแฉวยลำดับแบบ [1]  
 (ก) ยากิอุดะ (ข) ช่องเปิด (ค) ไมโครสตริป (ง) ท่อนำคลื่น

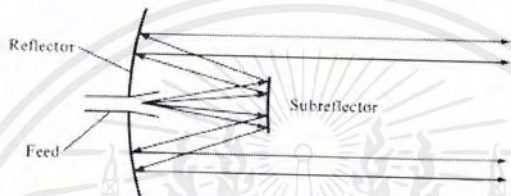
#### 2.4.5 สายอากาศแบบสะท้อน (Reflector antenna)

สำหรับการสื่อสารในระยะไกลมากเช่น การสื่อสารจากอวกาศมาถึงพื้นโลก ซึ่งมีระยะทางที่ไกลมาก ทำให้สัญญาณที่รับนั้นมีลักษณะความเข้มต่ำ สายอากาศที่ต้องการนั้นควรจะสามารถรวมสัญญาณได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เราได้รับสัญญาณที่ชัดเจนยิ่งขึ้น สำหรับสายอากาศสะท้อนแบบพาราโบลา (Parabolic reflector) เป็นหนึ่งในสายอากาศแบบสะท้อนที่พบเห็นได้ทั่วไป อีกทั้งยังมีสายอากาศสะท้อนแบบหักมุม (Corner reflector) ได้ถูกนำมาใช้ในการรับสัญญาณที่มีระยะทางไกล เนื่องจากมีการรับสัญญาณแล้วสะท้อนเข้าสู่จุดโฟกัสเพื่อรวมสัญญาณก่อนที่จะนำไปประมวลผล โดยสายอากาศสะท้อนแบบพาราโบลานั้นสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ๆ คือ แบบพาราโบลาแบบพีดด้านหน้า (Front feed) และพาราโบลาแบบคาสกรน

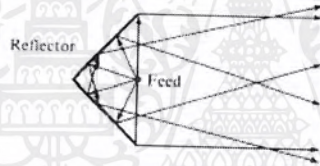
ฟีด (Cassegrain feed) ซึ่งทำการสะท้อนสองครั้งก่อนจะเข้าสู่จุดโฟกัส โดยมีข้อดีแตกต่างกัน ซึ่งตัวอย่างสายอากาศแบบสะท้อนจะแสดงดังรูปที่ 2.7



(ก)



(ข)



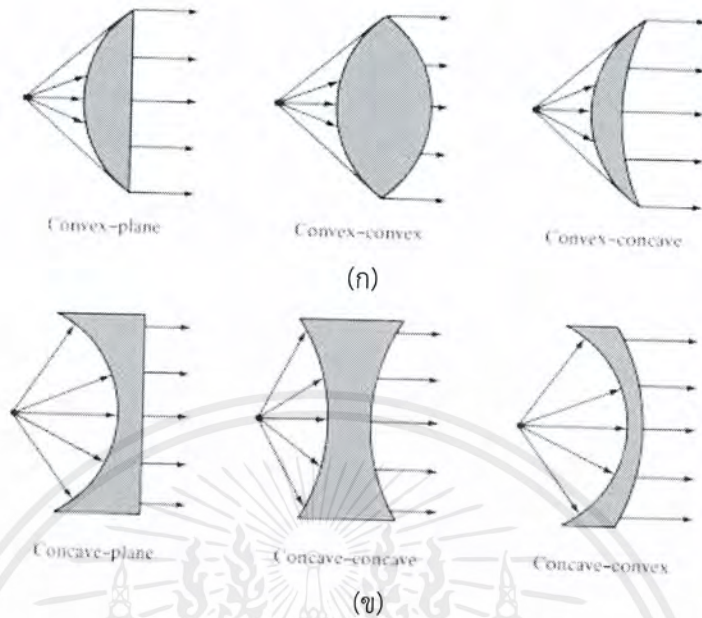
(ค)

รูปที่ 2.7 สายอากาศสะท้อน [1]

(ก) พาราโบลิคแบบฟีดหน้า (ข) พาราโบลิคแบบแคสเกรน (ค) แบบหัทมุม

#### 2.4.6 สายอากาศแบบเลนส์ (Lens antenna)

สายอากาศแบบเลนส์นั้นเริ่มแรกถูกใช้เพื่อทำการจำกัดทิศทางของสัญญาณและพลังงานที่ตกกระทบมาให้มีลักษณะสะท้อนออกไปแบบขนาน เพื่อป้องกันการกระจายแบบไม่มีทิศทางของสัญญาณ ซึ่งสายอากาศแบบเลนส์นั้นสามารถนำไปใช้ได้หลากหลาย คล้ายกับแบบสะท้อนพาราโบลิคโดยเฉพาะในย่านความถี่ที่สูง เนื่องจากขนาด และน้ำหนักของสายอากาศชนิดนี้ค่อนข้างจะมากเมื่อใช้ในย่านความถี่ต่ำ สายอากาศเลนส์นั้นจะถูกจำแนกได้ด้วยวัสดุที่นำมาใช้ และรูปทรงทางเรขาคณิตของสายอากาศ ตัวอย่างของสายอากาศแบบเลนส์แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สายอากาศแบบเลนส์รูปทรงต่าง ๆ [1]

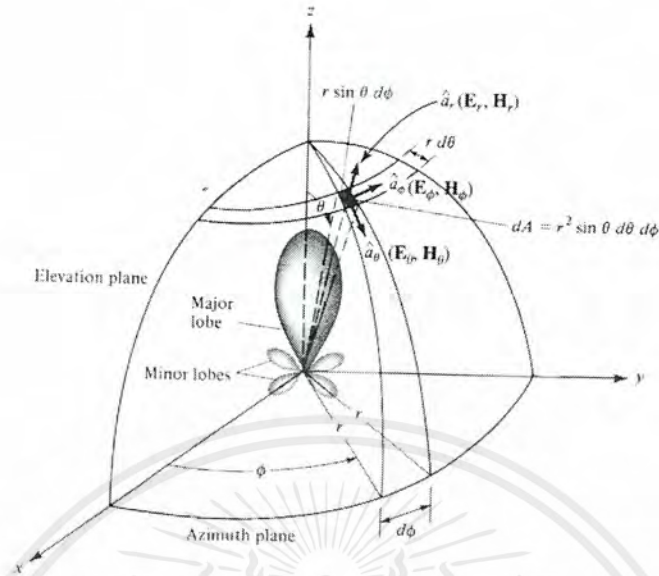
(ก) สายอากาศเลนส์เมื่อมีดัชนีหักเหมากกว่า 1 (ข) สายอากาศเลนส์เมื่อมีดัชนีหักเหน้อยกว่า 1

## 2.5 พารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศ

### 2.5.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation pattern) มีความหมายคือ ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ หรือแสดงโดยเส้นที่สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการแพร่กระจายของสายอากาศตามฟังก์ชันของสเปซโคออร์ดิเนต (Space coordinate) ส่วนมากในกรณีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้จะกำหนดการคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far-field) และแสดงให้เห็นเช่นเดียวกับฟังก์ชันตามทิศทางของโคออร์ดิเนต คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วย กำลังความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux) ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation intensity) ความเข้มของสนาม (Field strength) เฟส (Phase) หรือการโพลาไรซ์ (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



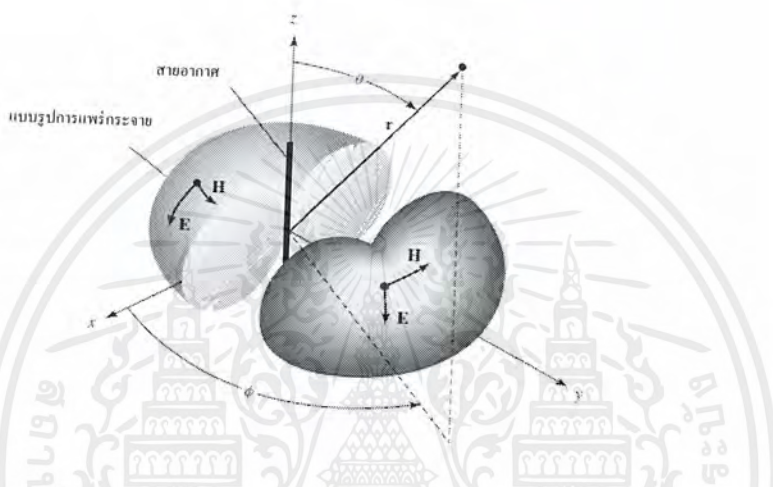
รูปที่ 2.9 ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ [1]

จากรูปที่ 2.9 จะเป็นการแสดงระบบโคออร์ดิเนตที่ใช้ในการแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น สำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่มีชื่อเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่เรียกว่า สนามการแพร่กระจาย (Field pattern) ของสายอากาศนั้น

2.5.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางรอบทิศทางในระนาบเดียว (Isotropic, Directional and Omni-directional Pattern)

สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก คือสายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นให้มีการแพร่กระจายคลื่นเท่า ๆ กันในทุกทิศทาง แม้ว่ามันจะเป็นแค่แนวความคิดและสามารถที่จะเป็นจริงได้ในทางกายภาพ แต่ก็มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ และทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศที่มีแบบรูปการกระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง คือ สายอากาศที่มีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น หรือรองรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะ ทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบรอบ ทิศทางในระนาบเดียว (Omni-directional antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้แสดงได้ดัง รูปที่ 2.10



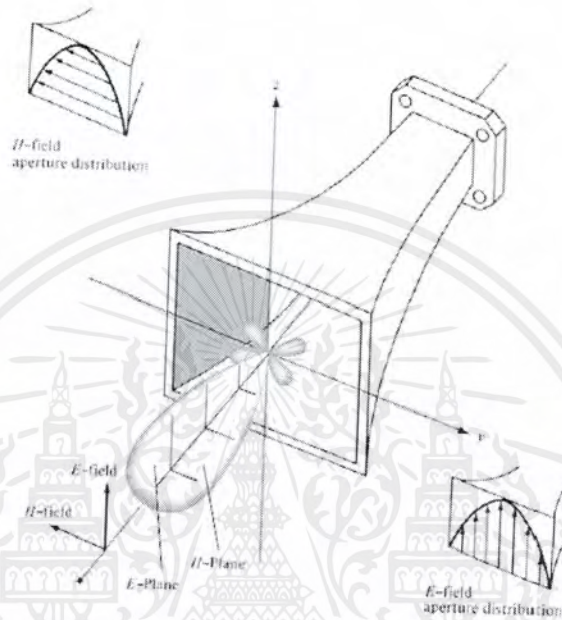
รูปที่ 2.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว [1]

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุท หรือระนาบมุมกวาด (Azimuth plane)  $[f(\phi), \theta = \frac{\pi}{2}]$  แต่เป็นแบบชี้ ทิศทางในระนาบเอเลเวชันหรือมุมยก (Elevation plane)  $[g(\theta), \phi = \text{ค่าคงที่}]$  แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางในระนาบเดียวนี้ เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ ชี้ทิศทาง

### 2.5.1.2 แบบรูปการกระจายคลื่นหลัก (Principal pattern)

เรามักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศ ในเทอมของแบบ รูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก ของสนามไฟฟ้า (E-plane) และสนามแม่เหล็ก (H-plane) สำหรับ สายอากาศที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า จะเป็นระนาบที่

บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด



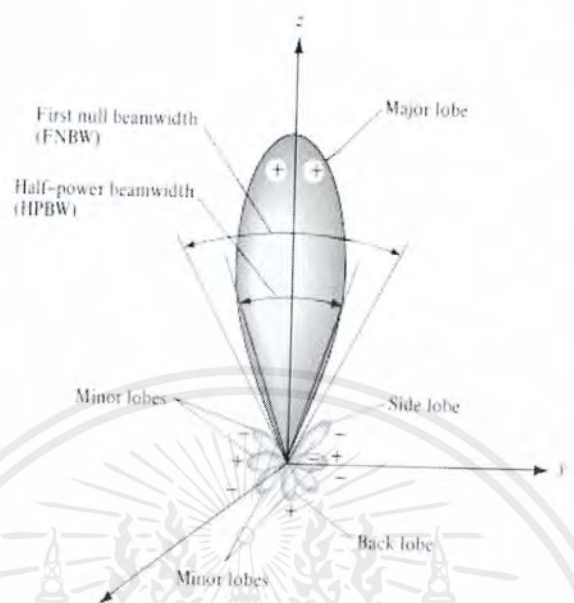
รูปที่ 2.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร [1]

จากรูปที่ 2.11 เป็นการแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก โดยมีระนาบ  $xz$  (ระนาบเอเลเวชัน;  $\phi = 0$ ) เป็นระนาบสนามไฟฟ้าหลัก ส่วนอีกระนาบหนึ่งหรือระนาบ  $xy$  (ระนาบอาซิมุธ;  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ) เป็นระนาบสนามแม่เหล็กหลัก

### 2.5.1.3 ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation lobe)

ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณโดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูปที่ 2.12 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ ซึ่งสามารถแบ่งลำคลื่นเป็นแบบต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ลำคลื่นต่าง ๆ และบีมวิดธ์ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบ 3 มิติ [1]

- 1) ลำคลื่นหลัก (Major lobe หรือ Main lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นที่อยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดตามรูปที่ 2.12 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง  $\theta = 0$  สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่น สายอากาศแยกลำคลื่น (Split-beam antenna)
- 2) ลำคลื่นย่อย (Minor lobe) คือ ลำคลื่นอื่นที่นอกเหนือจากลำคลื่นหลัก
- 3) ลำคลื่นด้านข้าง (Side lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่ติดอยู่กับ ลำคลื่นหลัก และอยู่ในทิศทางของครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก
- 4) ลำคลื่นด้านหลัง (Back lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก

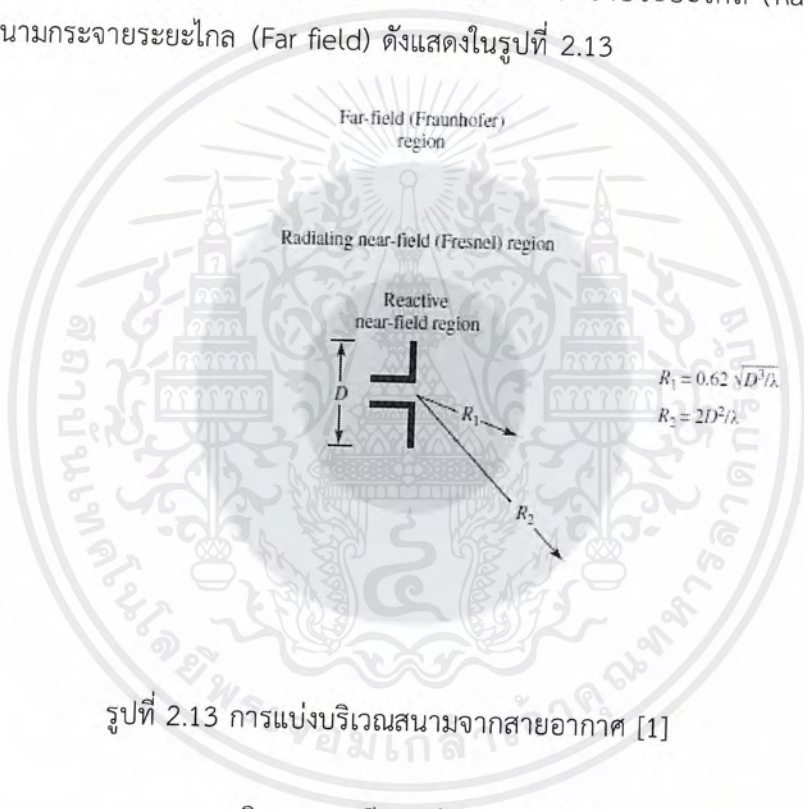
ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศที่ดีจึงต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของลำคลื่นย่อยมักจะแสดงเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนของความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่า ระดับของลำคลื่นด้านข้าง (Side lobe level: SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของลำคลื่นด้านข้างน้อยกว่า  $-20$  dB

#### 2.5.1.4 บริเวณต่าง ๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะเป็นบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-near field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating-near field) และสนามกระจายระยะไกล (Far field) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ [1]

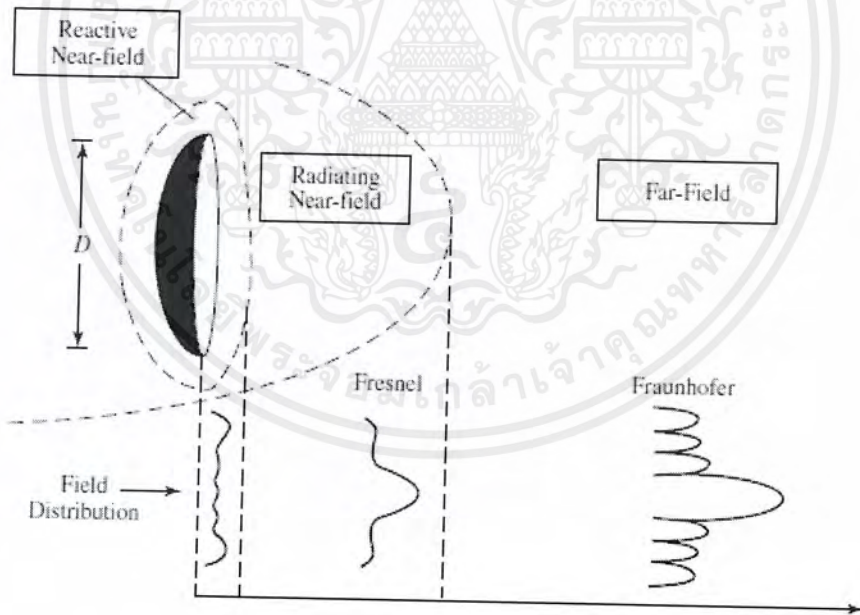
บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive near-field region) เป็นบริเวณที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง  $R < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$  จากผิวของสายอากาศเมื่อ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น และ  $D$  เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

บริเวณแพร่กระจายคลื่นสนามระยะใกล้ (Radiating near-field/Fresnel region) เป็นบริเวณของสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีแอกทีฟที่ระยะใกล้กับบริเวณแพร่กระจายคลื่นสนามระยะไกล โดยมีสนามที่แพร่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่การกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง  $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R < \frac{2D^2}{\lambda}$

บริเวณสนามระยะไกล (Far-field/Fraunhofer region) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ  $D$  บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง  $R$  มากกว่า  $\frac{2D^2}{\lambda}$  จากสายอากาศซึ่งในบริเวณนี้สนามมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางขอบในบริเวณดังกล่าวมีค่า  $R$  เท่ากับ  $\frac{2D^2}{\lambda}$  และขอบนอกมีค่าเป็นอนันต์



รูปที่ 2.14 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของสนามที่ระยะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 ความหนาแน่นกำลังงานการแพร่กระจายคลื่น (Radiation power density)

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลางถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงาน และกำลังงานไฟฟ้า โดยใช้ตัวความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้แก่ พอยติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (Instantaneous Poynting vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.1)$$

เมื่อ

- $\vec{W}$  คือ พอยติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- $\vec{E}$  คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลานั้น ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- $\vec{H}$  คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กชั่วขณะ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

เนื่องจากพอยติงเวกเตอร์มีความหมายแสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นผิวจะสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตส่วนของพอยติงเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวทั้งหมดซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$P = \iint_s \vec{W} \cdot d\vec{s} = \iint_s \vec{W} \cdot \vec{n} da \quad (2.2)$$

เมื่อ

- $P$  คือ กำลังงานทั้งหมดชั่วขณะเวลานั้น ( $W$ )
- $\vec{n}$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิว
- $da$  คือ พื้นที่จวบวนพื้นที่ปิด ( $\text{m}^2$ )

ในกรณีของสนามที่แปรผันกับเวลานั้น มักจะหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นกำลังงานได้โดยการอินทิเกรตค่าพอยติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้นตลอดหนึ่งคาบ แล้วหารด้วยคาบเหล่านั้นสำหรับสนามที่แปรผันกับเวลา ซึ่งกระจายเป็นฮาร์โมนิกในรูป  $e^{j\omega t}$  เมื่อกำหนด

สนามไฟฟ้า (E-plane) และสนามแม่เหล็ก (H-plane) เป็นสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กเชิงซ้อน แล้วจะหาความสัมพันธ์กับค่า  $\bar{E}$  และ  $\bar{H}$  ช่วงระยะเวลาใด ๆ ได้จาก

$$\bar{E}(x, y, z; t) = \text{Re}[E(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.3)$$

$$\bar{H}(x, y, z; t) = \text{Re}[H(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.4)$$

จากสมการ(2.3), (2.4) โดยอาศัย  $\text{Re}[Ee^{j\omega t}] = \frac{1}{2}[Ee^{j\omega t} + E^*e^{-j\omega t}]$

และสมการ (2.1) จะสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\bar{W} = \bar{E} \times \bar{H} = \text{Re}[E \times H^*] + \frac{1}{2} \text{Re}[E \times H e^{j2\omega t}] \quad (2.5)$$

เทอมแรกของสมการที่ (2.5) ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลา และเทอมที่สองมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพอยดิงเวกเตอร์จึงสามารถที่จะหาได้เป็น

$$W_{av}(x, y, z) = [W(x, y, z)]_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[E \times H^*] \quad (2.6)$$

ตัวประกอบของ  $\frac{1}{2}$  ในสมการที่ (2.5) และ (2.6) เกิดขึ้นเพราะสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นค่าสูงสุดจากสมการที่ (2.6) กำลังงานเฉลี่ยที่แพร่กระจายในอากาศจะเขียนได้เป็น

$$P_{rad} = P_{av} = \iint_s W_{rad} \cdot ds = \iint_s W_{av} \cdot nda = \frac{1}{2} \iint_s \text{Re}[E + H^*] \cdot ds \quad (2.7)$$

### 2.5.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation intensity)

คำจำกัดความของคำว่าความเข้มของการแพร่กระจายในทิศทางที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้คือ กำลังงานที่แผ่ออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นเป็น พารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศเกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นสามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น และผลจากการยกกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.8)$$

เมื่อ

$U$  คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

$W_{rad}$  คือ ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (W/m<sup>2</sup>)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับ สนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= \frac{r^2}{2\eta} |E(r, \theta, \phi)|^2 \\ &= \frac{r^2}{2\eta} \left[ |E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \right] \\ &= \frac{1}{2\eta} \left[ |E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \end{aligned} \quad (2.9)$$

เมื่อ

$E$  คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$E_\theta, E_\phi$  คือ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$\eta$  คือ อินทรินสิคิมพีแดนซ์ (Intrinsic impedance) ของตัวกลาง

#### 2.5.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (Maximum directivity)

ค่าการชี้ทิศทางในทิศทางที่กำหนดคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งใช้สำหรับ อ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้ไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic point source)

ค่าการชี้ทิศทางสูงสุดคือ ค่าการชี้ทิศทางในทิศทางที่มีค่ามากที่สุดหรือค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของต้นกำเนิดที่ไม่เป็นไอโซทรอปิกคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์ส เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.10)$$

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$D_g$  คือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (ไม่มีหน่วย)

$D_0$  คือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (ไม่มีหน่วย)

$U$  คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

$U_{max}$  คือ ค่าสูงสุดของความเข้มของการแพร่กระจาย (W/หน่วยมุมตัน)

$U_0$  คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์ส (W/หน่วย

มุมตัน)

$P_{rad}$  คือ กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (W)

จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) จะทราบค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่มีค่าเป็นหนึ่ง เพราะว่ามันมีการแพร่กระจายกำลังงานออกไปทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากันคือ  $U$   $U_0$  และ  $U_{max}$  ต่างมีค่าเท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากกว่าหนึ่งเสมอ และค่าของสภาพเจาะจงทิศทางจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และน้อยกว่าหรือเท่ากับสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด ( $0 \leq D_g \leq D_0$ )

### 2.5.5 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วยในขณะที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

อัตราขยาย (Power gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้นั้นมีค่าเท่ากับ  $4\pi$  คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อทิศทางกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วจะคิดค่ากำลังขยายในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

$$Gain = 4\pi \frac{\text{radiation intensity}}{\text{total input (accepted) power}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_m} \quad (2.12)$$

โดยทั่วไปแล้วมักจะพูดถึงอัตราขยายสัมพันธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศนั้นต้องเท่ากับสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศ ไดโพล สายอากาศปากแตร แต่โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_m} \quad (2.13)$$

### 2.5.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna efficiency)

ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ  $e$ , จะใช้ได้เมื่อเราคำนึงถึงการสูญเสียต่าง ๆ ที่ขั้ว และภายในโครงสร้างของสายอากาศด้วย การสูญเสียต่าง ๆ นั้นอาจเนื่องมาจาก

- 1) การสะท้อนกลับเนื่องมาจากความเข้ากันไม่ได้ (Mismatch) ระหว่างสายส่งกับสายอากาศ

2) การสูญเสียทั้งในตัวนำและฉนวน ( $I^2R$ ) โดยทั่วไปแล้ว ประสิทธิภาพทั้งหมดคำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.14)$$

เมื่อ

- $e_t$  คือ ค่าประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)
- $e_r$  คือ ค่าประสิทธิภาพที่เกี่ยวกับการสะท้อนกลับ (ไม่มีหน่วย)
- $e_c$  คือ ค่าประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)
- $e_d$  คือ ค่าประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)

โดยที่

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (2.15)$$

เมื่อ

- $\Gamma$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของศักดาไฟฟ้าที่หัวของสายอากาศ
- $Z_{in}$  คือ ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ
- $Z_o$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Characteristic impedance) ของสายส่ง

ปกติ  $e_c$  และ  $e_d$  คำนวณได้ยาก ส่วนมากมักหาได้จากการทดลอง แต่ถึงกระนั้นก็ แยก  $e_c$  จาก  $e_d$  ไม่ออก ดังนั้นเพื่อความสะดวก มักจะเขียนสมการ (2.14) ใหม่เป็น

$$e_t = e_r e_{cd} = e_{cd} (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.16)$$

เมื่อ  $e_r$  คือ ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

## 2.5.7 การโพลาไรซ์ (Polarization)

การโพลาไรซ์ได้ถูกกำหนดให้เป็นคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อธิบายทิศทางและขนาดสัมพัทธ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะเป็นรูปที่แสดงการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งหนึ่งๆเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ในการสังเกตลักษณะการกวาดสนามไฟฟ้านี้จะมองตามหลังคลื่นที่เดินทางออกไป เราอาจสรุปได้อีกนัยหนึ่งว่าการโพลาไรซ์จะเป็นรูปรูปกราฟที่วาดขึ้น จากการกวาดของปลายลูกศรที่แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าขณะหนึ่ง

การโพลาไรซ์แบ่งเป็น 3 แบบ ด้วยกัน คือ

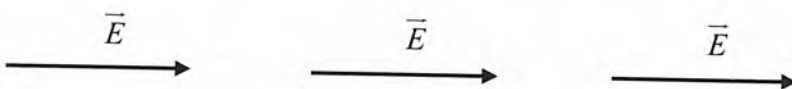
2.5.7.1 การโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear polarization: LP) คือ คลื่นเดินทางไปโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศของสนามไฟฟ้าตลอดการเดินทาง

1) การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง (Vertical polarization: VP) ทิศของสนามไฟฟ้าจะมีทิศทางแนวตั้งตลอดการเดินทาง ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง

2) การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอน (Horizontal polarization: HP) ทิศของสนามไฟฟ้า จะมีทิศทางในแนวนอนตลอดการเดินทาง ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวเฉียง (Slant polarization: SP) ที่ศ  
ของสนามไฟฟ้า จะเอียงทำมุมใดๆ ตลอดการเดินทาง ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวเฉียง

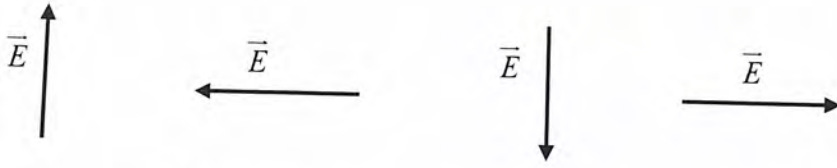
2.5.7.2 การโพลาไรซ์วงกลม (Circular polarization: CP) คือ คลื่น  
เดินทางไปโดยมีการเปลี่ยนแปลงทิศของสนามไฟฟ้า ตลอดเวลาโดยรักษาขนาดของ  
สนามไฟฟ้าไว้คงที่

1) การโพลาไรซ์วงกลมแบบหมุนขวา (Right-hand Circular  
polarization: RHCP) หรือเรียกว่า การโพลาไรซ์ตามเข็มนาฬิกา (Clockwise  
polarization: CCP) ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การโพลาไรซ์วงกลมแบบหมุนขวา

2) การโพลาไรซ์วงกลมแบบหมุนซ้าย (Left-hand circular  
polarization: LHCP) หรือเรียกว่าการโพลาไรซ์ทวนเข็มนาฬิกา (Anti-Clockwise  
Polarization: AWCP) ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การโพลาไรซ์วงกลมแบบหมุนซ้าย

2.5.7.3 การโพลาไรซ์วงรี (Elliptical polarization: EP) คือคลื่นเดินทางไป โดยมีการเปลี่ยนแปลงในทั้งทิศและขนาดของสนามไฟฟ้าตลอดการเดินทางแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

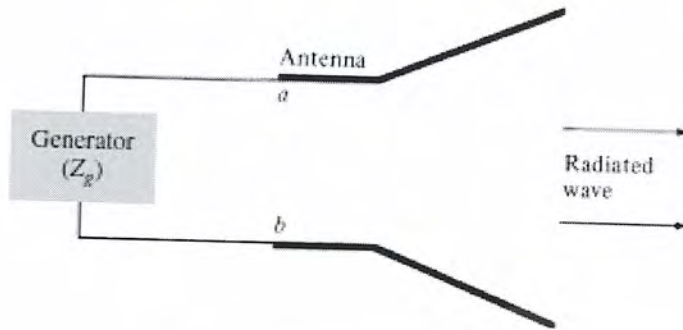
1) การโพลาไรซ์แบบหมุนขวา (Right-hand elliptical polarization: RHEP) หรือเรียกว่าการโพลาไรซ์ตามเข็มนาฬิกา (Clockwise polarization: CWEP)

2) การโพลาไรซ์แบบหมุนซ้าย (Left-hand elliptical polarization: LHEP) หรือเรียกว่าการโพลาไรซ์ทวนเข็มนาฬิกา (Anti-clockwise polarization: AWEP)

### 2.5.8 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance)

อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้น อาจเป็นอัตราส่วนระหว่างศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศนั้น หรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใด ๆ ในรูปที่ 2.20 ที่ขั้ว a และ b เป็นขั้วของสายอากาศ อัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนี้ เมื่อไม่ได้ต่อโหลดจะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งมีค่า

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.20 สายอากาศส่งในโหมดการส่ง [1]

โดยที่

- $Z_A$  คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Antenna impedance)
- $R_A$  คือ ความต้านทานของสายอากาศ (Antenna resistance)
- $X_A$  คือ ความต้านทานในขดลวดของสายอากาศ (Antenna reactance)

โดยทั่วไปความต้านทานในสมการ (2.18) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.18)$$

เมื่อ

- $R_r$  คือ ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ
- $R_L$  คือ ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

### 2.5.9 ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Antenna radiation efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศซึ่งสืบเนื่องมาจากการสูญเสียจากการสะท้อน ความนำ และความเป็นฉนวนซึ่งความสูญเสียอันเนื่องมาจากตัวนำ และฉนวนนั้นยากที่จะคำนวณ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะได้จากการวัด ซึ่งแม้จะวัดค่าออกมาแล้วก็ยากที่จะแยกระหว่างความสูญเสียจาก

ตัวนำ และฉนวนจึงเป็นที่มาของค่าประสิทธิผล  $e_{cd}$  โดยความต้านทาน  $R_L$  มักถูกใช้เป็นตัวแทนของความสูญเสียเนื่องจากตัวนำ และฉนวน ประสิทธิภาพตัวนำและฉนวนนั้นถูกนิยามไว้เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังที่จ่ายให้กับ  $R_r$  ต่อกำลังที่จ่ายให้กับ  $R_r$  และ  $R_L$  โดยเราสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.19 ดังนี้

$$e_{cd} = \left[ \frac{R_r}{R_r + R_L} \right] \quad (2.19)$$

### 2.5.10 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศ ถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจจะเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น อินพุตอิมพีแดนซ์ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น การโพลาไรซ์ ระดับของลำคลื่นด้านข้าง ค่าอัตราขยาย ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบจนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนดหรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้างมักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ ด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำ ยกตัวอย่างเช่น แบนด์วิดท์ 10:1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูง มีค่ามากกว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำอยู่ 10 เท่า สำหรับสายอากาศแบนด์แคบ แบนด์วิดท์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ) แล้วหารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น เช่น แบนด์วิดท์ 5% แสดงว่าผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงาน ของสายอากาศเป็น 5% ของความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

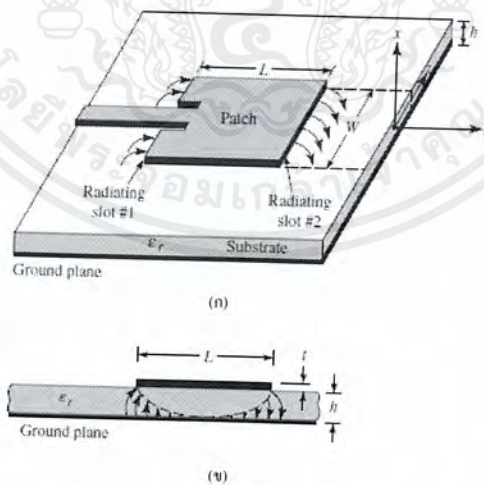
เนื่องจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศที่กล่าวมา จะไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้น จึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่ง จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่าง ปกติแล้วคุณสมบัติของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นกับอินพุตอิมพีแดนซ์ จะมักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

## 2.6 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antenna)

แนวความคิดในการใช้ไมโครสตริปซึ่งมีรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก ในการแพร่กระจายคลื่น ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Deschamps ในปี ค.ศ.1953 และหลังจากนั้น 20 ปี จึงมีการสร้างเป็นสายอากาศใช้งานจริง โดยมีการพัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎี และทางเทคนิค Photo-etch ของฐานรองที่เป็น ทองแดง (Copper) หรือ Gold-clad และมีคุณสมบัติทางอุณหภูมิจึง และทางกลศาสตร์ที่ดีขึ้น มีค่า Loss tangent ที่ต่ำ สายอากาศไมโครสตริปถูกสร้างขึ้นมาครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ.1970 โดย Robert E. Munson และ John Q. Howell จากนั้นก็มีการวิจัย และพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว และกว้างขวาง นำไปสู่การใช้งานที่แตกต่างกัน

### 2.6.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

โดยทั่วไปสายอากาศชนิดนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน 4 ประการคือ แผ่นตัวนำ (Patch) แผ่นกราวนด์ (Ground plane) ชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate) และระบบป้อนกำลัง (Feed) ดังรูป 2.21 องค์ประกอบทั้งสิ้นนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

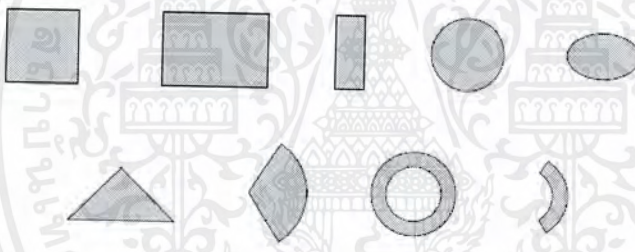


รูปที่ 2.21 โครงสร้างไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1.1 แผ่นตัวนำ (Patch)

แผ่นตัวนำนั้นทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะแบนบาง และมีค่าความต้านทานต่ำ ทนต่อสภาวะแวดล้อม และการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้ดี สามารถยึดติดกับผิวของชั้นวัสดุฐานรองได้ดี โดยทั่วไปทำจากทองแดง ทองคำ หรืออลูมิเนียม แผ่นตัวนำอาจมีลักษณะต่าง ๆ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม วงรี และอื่น ๆ ดังรูปที่ 2.22 วัสดุที่ใช้ทำแผ่นตัวนำนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ และความยากง่ายในการผลิต นอกจากนี้ขนาด และรูปร่างของแผ่นตัวนำยังเป็นปัจจัยที่กำหนดความถี่ใช้งาน และส่งผลต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอิมพีแดนซ์ขาเข้า ปัจจุบันแผ่นตัวนำที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแผ่นตัวนำรูปวงกลม และสี่เหลี่ยมเนื่องจากการผลิต การปรับแต่งสามารถทำได้ง่าย และลักษณะสมบัติไม่ต่างจากแผ่นตัวนำรูปอื่นมากนัก



รูปที่ 2.22 แผ่นตัวนำรูปทรงต่าง ๆ [1]

### 2.6.1.2 ชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate)

ชนิดและขนาดของชั้นวัสดุฐานรอง เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบ และเป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกลของสายอากาศ ไมโครสตริป การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะลดลงเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาของชั้นวัสดุฐานรองมีค่าคงที่ การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความหนาต่อความยาวคลื่นแพร่กระจายในช่องว่างอิสระมีค่าประมาณ 0.05 การแพร่กระจายคลื่นจะมีปริมาณลดลง พลังงานที่สะสมในชั้นวัสดุฐานรองมีค่าเกือบคงที่ (ประมาณ 0.02%) ซึ่งสามารถละเลยได้

การเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นชั้นวัสดุฐานรองนอกจากจะต้องคำนึงถึงสมบัติทางกล สมบัติทางเคมี ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ความสามารถในการยึดติดกับผิวโลหะได้ดี ความเรียบและแบนของผิวซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกับโลหะและสามารถผลิตเป็นชั้นวัสดุฐานรองขนาดใหญ่สำหรับสายอากาศได้ นอกจากนี้คุณสมบัติทางไฟฟ้ายังเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเลือกวัสดุ โดยมีค่าปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

1. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) วัสดุที่ใช้ควรเป็นสารเนื้อเดียวเพื่อให้ค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่ในเนื้อสาร ขนาดของแผ่นตัวนำจะมีค่าแปรผกผันกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเป็นปัจจัยที่กำหนดคุณสมบัติของสายอากาศเช่นเดียวกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ซึ่งควรจะมีค่าต่ำเนื่องจากวัสดุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้สายอากาศที่มีสมรรถนะสูง
2. แทนเจนต์การสูญเสีย ( $\tan \delta$ ) ควรมีค่าต่ำกว่า 0.001 เพื่อลดพลังงานสูญเสียเนื่องจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศสูงขึ้น
3. ความสามารถในการดูดซับน้ำและความชื้นต่ำ เพราะน้ำและความชื้นจะทำให้เกิดพลังงานสูญเสียในวัสดุฐานรองขึ้นและค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์มีค่าเปลี่ยนไป

ชั้นวัสดุฐานรองที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ เทปลอนไฟเบอร์กลาส (Polytetrafluoroethylene) ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  ประมาณ 2.4 – 2.6 และมีการผลิตในรูปของเทปลอนที่ฉาบด้วยโลหะทั้งสองด้านซึ่งง่ายต่อการผลิตโดยใช้กรรมวิธีการทำแผ่นวงจรพิมพ์

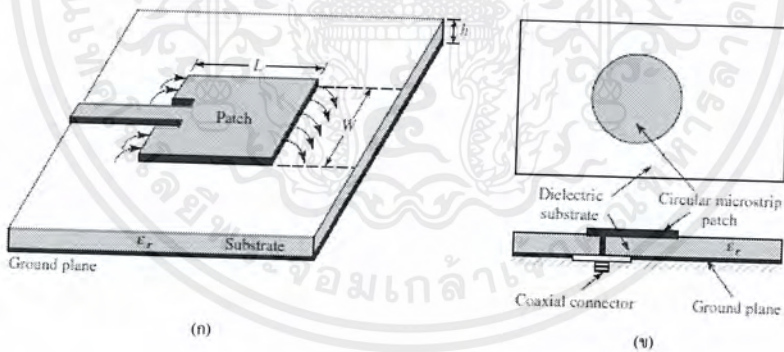
### 2.6.1.3 แผ่นกราวด์ (Ground plane)

เป็นแผ่นโลหะขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับแผ่นตัวนำ ซึ่งส่วนใหญ่จะทำด้วยโลหะชนิดเดียวกัน ขนาดของแผ่นกราวด์นี้จะส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเนื่องจากคลื่นเลี้ยวเบนที่บริเวณขอบของแผ่นกราวด์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศด้วย เนื่องจากในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศส่วนใหญ่มีข้อสมมติว่าแผ่นกราวด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำมากจนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนันต์ ขนาดที่จำกัดของแผ่นกราวด์จะมีผลกระทบต่อลำคลื่นหลักน้อยมาก แต่จะทำให้เกิดลำคลื่นด้านหลังของ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น การรวมผลของแผ่นกราวด์จะมีความจำเป็นก็ต่อเมื่อผู้ออกแบบสนใจลำคลื่นด้านหลังของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเท่านั้น

2.6.1.4 ระบบป้อนกำลัง (Feed)

ทำหน้าที่ในการจ่ายกำลังความถี่คลื่นวิทยุ (RF power) ให้แก่สายอากาศไมโครสตริป ระบบป้อนกำลังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความยากง่ายในการสร้างและลักษณะสมบัติของสายอากาศโดยเฉพาะในแผ่นสายอากาศไมโครสตริปเนื่องจากการจัดวางตัวของระบบป้อนกำลังพลังงานที่สูงสูญเสียในระบบป้อนกำลัง การผิดเพี้ยนเชิงขนาดและเฟสของกระแสกระตุ้น และปรากฏการณ์การควบกำลังคลื่นร่วมระหว่างระบบป้อนกำลังกับแผ่นตัวนำ จะส่งผลต่อลักษณะสมบัติของสายอากาศไม่ว่าจะเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น การโพลาไรซ์ และประสิทธิภาพของสายอากาศ ระบบป้อนกำลังนี้สามารถทำได้หลายลักษณะเช่น การจ่ายกระแสผ่านสายนำสัญญาณที่ต่อจากแผ่นตัวนำ โดยการใช้กรรมวิธีการทำแผ่นวงจรรพิมพ์ ระบบการจ่ายกระแสผ่านด้านหลังทะลุแผ่นกราวด์ผ่านสายชนิดแกนร่วม (Probe feed via hole) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ตัวอย่างวิธีการป้อนกำลัง [1]

(ก) Inset Feed (ข) Coaxial Cable (Probe Feed)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริป จะมีข้อได้เปรียบหลายประการ เมื่อเทียบกับสายอากาศที่ใช้ในย่านไมโครเวฟแบบอื่นๆ โดยสายอากาศไมโครสตริปสามารถใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ไปจนถึง 50 GHz

### 2.6.2.1 ข้อดีของสายอากาศไมโครสตริป

- น้ำหนักเบา (Lightweight) ขนาดเล็ก (Small size)
- ทำให้เป็นแผ่นบางๆ ได้ เพราะไม่มีผลทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic)
- สัณฐานต่ำ (Low profile)
- สามารถผลิตได้ง่าย และราคาถูก (Low fabrication cost)
- มีความสะดวกในการติดตั้งบนวัตถุที่เคลื่อนที่ได้ เช่น จรวด ดาวเทียม ยานพาหนะ ต่าง ๆ
- มีการโพลาไรซ์ทั้งเชิงเส้นและวงกลม

### 2.6.2.2 ข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป

- มีช่วงความถี่ที่ใช้รับและส่งสัญญาณแคบเกินไป (Narrow bandwidth)
- มีอัตราการสูญเสีย (Loss)
- มีอัตราขยายค่อนข้างต่ำ (Low gain) ในทางปฏิบัติ อัตราขยายสูงสุดจะถูกจำกัดประมาณ 20 dB
- มีการแพร่กระจายคลื่นต่ำ

## 2.6.3 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริป

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบสายอากาศ เนื่องจากกรวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสามารถประหยัดเวลาในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และช่วยลดต้นทุนในการออกแบบและผลิตสายอากาศได้เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบแผงสายอากาศขนาดใหญ่ วิธีการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพนั้นนอกจากจะต้องให้คำตอบที่มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดแล้วยังจะต้องใช้เวลาและหน่วยความจำในการประมวลผลอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย ในปัจจุบันได้มีการใช้วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปหลายวิธีเพื่อนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมช่วยในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่มีประสิทธิภาพ วิธีการต่างๆในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติสายอากาศสามารถจำแนกได้เป็นสองกลุ่มคือ

### 2.6.3.1 วิธีการเชิงวิเคราะห์

วิธีนี้อาศัยแบบจำลองทางกายภาพลักษณะต่างๆเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถให้ภาพเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสายอากาศได้ชัดเจนกว่าวิธีเชิงตัวเลข ใช้เวลาและหน่วยความจำโปรแกรมในการประมวลผลต่ำ แบบจำลองที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่

#### 1) แบบจำลองชนิดสายส่ง (Transmission-line model)

แบบจำลองแบบนี้แทนส่วนที่เกิดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นวงจรของสายส่ง แต่การวิเคราะห์จำกัดเฉพาะแผ่นตัวนำพื้นฐานบางแบบได้แก่ แผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมและรูปวงกลม นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด คือมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูง และความหนาของชั้นวัสดุฐานรองจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.02 เท่าของความยาวคลื่นแพร่กระจายในช่องว่างอิสระ

#### 2) แบบจำลองชนิดโพรง (Cavity model)

แบบจำลองนี้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นด้วยโพรงกำธรรและทฤษฎีสนามสมมูล สามารถวิเคราะห์แผ่นตัวนำรูปพื้นฐานต่างๆได้ด้วยวิธีนี้ แต่ความหนาแน่นของชั้นวัสดุฐานรองที่ใช้จะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.02 เท่าของความยาวคลื่นในปริภูมิเสรีเพื่อความแม่นยำของผลเฉลย

### 2.6.3.2 วิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method)

เป็นการแก้ปัญหาค่าขอบเขตทางทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีการเชิงตัวเลขแบบต่าง ๆ วิธีการเชิงตัวเลขนี้สามารถใช้กับแผ่นตัวนำรูปใด ๆ ก็ได้ และสามารถให้ผลเฉลยที่มีความแม่นยำสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การแบ่งจำนวนชิ้นส่วนย่อยให้มีขนาดใหญ่มาก จำนวนชิ้นส่วนย่อยน้อย ผลเฉลยที่ได้จะมีความผิดพลาดสูง เมื่อแบ่งชิ้นส่วนย่อยให้มีขนาดเล็กลง จำนวนชิ้นส่วนย่อยมากขึ้น ผลเฉลยที่ได้จะมีความแม่นยำสูงขึ้น แต่ผลเฉลยที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลขนี้อาจมีผลเฉลยปลอมเกิดขึ้น ก่อให้เกิดความผิดพลาดหากไม่มีการกำจัดผลเฉลยปลอมนั้น นอกจากนี้เวลาและหน่วยความจำที่ใช้ในการประมวลผลสูงกว่าวิธีเชิงวิเคราะห์มาก สำหรับวิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้มากในปัจจุบันได้แก่ ระเบียบวิธีโมเมนต์

## 2.7 สายอากาศแถวลำดับ (Array antenna)

สายอากาศตัวเดียวจะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราขยายต่ำ เนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการกระจายออกเกือบรอบตัว ถ้าเรานำสายอากาศชนิดใด ๆ จำนวนตั้งแต่สองตัวขึ้นไปมาจัดเรียงกันอย่างเป็นระบบที่เหมาะสม ซึ่งจะเรียกว่า สายอากาศแถวลำดับ (Array antenna) จะทำให้ลำคลื่นแคบลงไปในทิศทางหนึ่งที่ต้องการ เป็นผลให้สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) และอัตราขยายของสายอากาศ (Gain) ในทิศทางที่ต้องการเพิ่มสูงขึ้นได้ ในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึงวิธีการจัดลำดับของสายอากาศโดยเริ่มต้นวิเคราะห์จากสายอากาศแบบไดโพลจำนวนสองตัวเนื่องจากมีสมการสนามที่ง่าย เหมาะต่อการวิเคราะห์เริ่มต้น [2]

### 2.7.1 สายอากาศแถวลำดับที่ประกอบด้วยสายอากาศสองตัว

วิธีการที่ง่ายที่สุดในการจัดแถวลำดับก็คือ การใช้สายอากาศสองตัวที่เหมือนกันมาวางในระบบและทำการป้อนสัญญาณที่มีทั้งขนาดและเฟสเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.24 เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ เราจะทำกรวิเคราะห์ด้วยสายอากาศไดโพลโดยสมมติให้สายอากาศทั้งสองมีการกระจายคลื่นออกรอบตัว วางบนแกน  $z$  และมีระยะห่างเท่ากับ  $d$  และมีขนาดของสนามไฟฟ้ารวมเป็นดังนี้

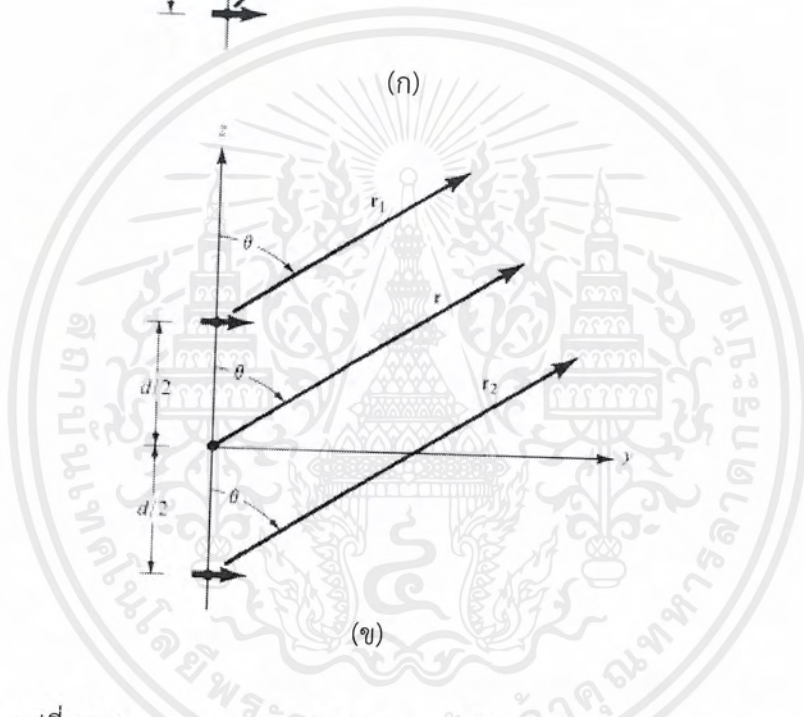
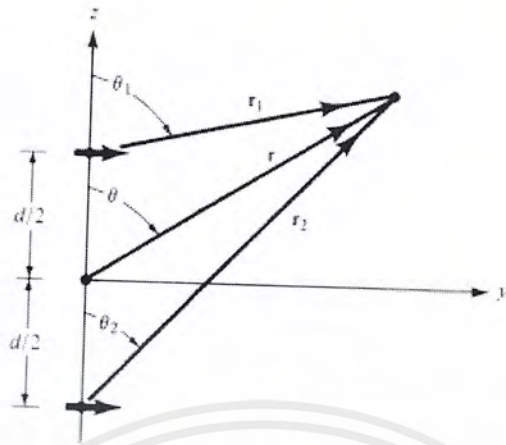
$$E_t = E_1 + E_2 = a_\theta j \eta \frac{kl_0 d}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-j \left[ kr_1 - \left( \frac{\beta}{2} \right) \right]}}{r_1} \cos \theta_1 + \frac{e^{-j \left[ kr_2 + \left( \frac{\beta}{2} \right) \right]}}{r_2} \cos \theta_2 \right\} \quad (2.19)$$

ซึ่งหากเมื่อพิจารณาที่ระยะสนามไกล (Far field) เราจะสามารถลดรูปได้ดังสมการ

$$E_t = a_\theta j \eta \frac{kl_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta \left\{ 2 \cos \left[ \frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \right\} \quad (2.20)$$

จะพบว่าสนามไฟฟ้าลัพท์จะมีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้าเนื่องจากสายอากาศหนึ่งตัวที่จุดอ้างอิง คูณกับเทอมซึ่งเรียกว่าตัวประกอบแถวลำดับ (Array factor) หรือเขียนสมการสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศแถวลำดับได้ดังนี้

$$E(\text{total}) = [E(\text{single element at reference point})] \times [\text{Array factor}] \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.24 สายอากาศแฉกลำดับประกอบด้วยสายอากาศสองตัว [1]  
 (ก) Two infinitesimal dipoles (ข) Far-field observations

### 2.6.2 สายอากาศแฉกลำดับที่ประกอบด้วยสายอากาศ $N$ ตัว

ถ้ามีสายอากาศจำนวน  $N$  ตัว วางอยู่บนแกน  $z$  ดังแสดงในรูปที่ 2.24 โดยสายอากาศแต่ละตัวถูกป้อนสัญญาณที่มีขนาดเท่ากัน ส่วนเฟสของสัญญาณของสายอากาศที่อยู่ติดกันจะต่างกัน  $\beta$  กล่าวคือสายอากาศตัวที่อยู่ด้านบนจะมีเฟสหน้าตัวที่อยู่ด้านล่างและอยู่ติดกันเท่ากับ  $\beta$  หรือการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแต่ละตัวเป็นแบบเฟสก้าวหน้า

(Progressive phase) และถ้าสมมติให้สายอากาศแต่ละตัวเป็นแบบกระจายคลื่นรอบตัว (Isotropic antenna) แบบรูปของสายอากาศแถวลำดับก็คือแบบรูปของตัวประกอบแถวลำดับนั่นเอง แต่หากสายอากาศแต่ละตัวเป็นแบบอื่นๆ แบบรูปของสายอากาศแถวลำดับที่ได้ก็คือผลคูณของแบบรูปของสายอากาศตัวหนึ่งกับแบบรูปของตัวประกอบแถวลำดับตามสมการ(2.21) ซึ่งค่าตัวประกอบแถวลำดับสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 AF &= 1 + e^{j(kd \cos \theta + \beta)} + e^{j2(kd \cos \theta + \beta)} + \dots + e^{j(N-1)(kd \cos \theta + \beta)} \\
 &= \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)} \\
 &= \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\Psi}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

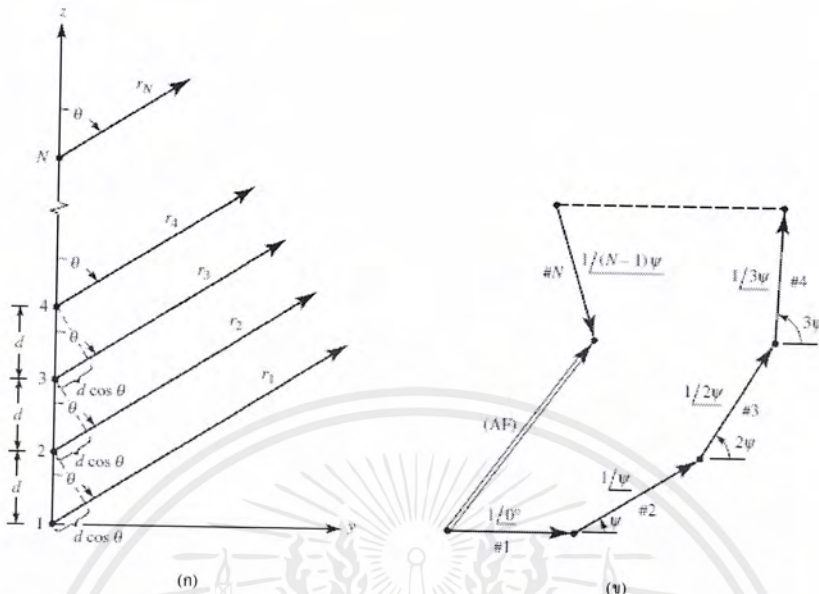
เมื่อ

$$\Psi = kd \cos \theta + \beta \tag{2.23}$$

รูปที่ 2.24 (ข) แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ของค่าตัวประกอบแถวลำดับ ซึ่งจะพบว่าเราสามารถควบคุมทิศทางของตัวประกอบแถวลำดับ ซึ่งก็คือทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับได้ด้วยการปรับเฟส  $\Psi$  ให้เหมาะสมตามที่ต้องการ

เมื่อคูณทั้งสองด้านของสมการ(2.22) ด้วย  $e^{j\Psi}$  จะได้

$$(AF)e^{j\Psi} = e^{j\Psi} + e^{j2\Psi} + e^{j3\Psi} + \dots + e^{j(N-1)\Psi} + e^{jN\Psi} \tag{2.24}$$



รูปที่ 2.25 สายอากาศแถวลำดับที่ประกอบด้วยสายอากาศจำนวน  $N$  ตัว [1]

(ก) Geometry (ข) Phasor Diagram

นำสมการ (2.23) ลบออกจากสมการ (2.24) จะได้

$$(AF)(e^{j\Psi} - 1) = (-1 + e^{jN\Psi}) \quad (2.25)$$

สมการ (2.25) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$AF = \left[ \frac{e^{jN\Psi} - 1}{e^{j\Psi} - 1} \right] = e^{j\left[\frac{N-1}{2}\right]\Psi} \left[ \frac{e^{j\left(\frac{N}{2}\right)\Psi} - e^{-j\left(\frac{N}{2}\right)\Psi}}{e^{j\left(\frac{1}{2}\right)\Psi} - e^{-j\left(\frac{1}{2}\right)\Psi}} \right] = e^{j\left[\frac{N-1}{2}\right]\Psi} \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\Psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\Psi\right)} \right] \quad (2.26)$$

และถ้าสายอากาศที่ใช้อ้างอิงเฟสอยู่ตำแหน่งตรงกลางของสายอากาศแถวลำดับ สมการ (2.26) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\Psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\Psi\right)} \right] \quad (2.27)$$

สำหรับกรณีที่ค่า  $\Psi$  มีค่าน้อยๆจะได้ว่า

$$AF = \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\Psi\right)}{\frac{\Psi}{2}} \right] \quad (2.28)$$

เนื่องจากสมการ(2.27) หรือ (2.28) มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $N$  เราสามารถทำการนอร์มัลไลซ์เพื่อให้ค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่งได้ดังนี้

$$(AF)_n = \frac{1}{N} \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\Psi\right)}{\sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)} \right] \quad (2.29)$$

และ

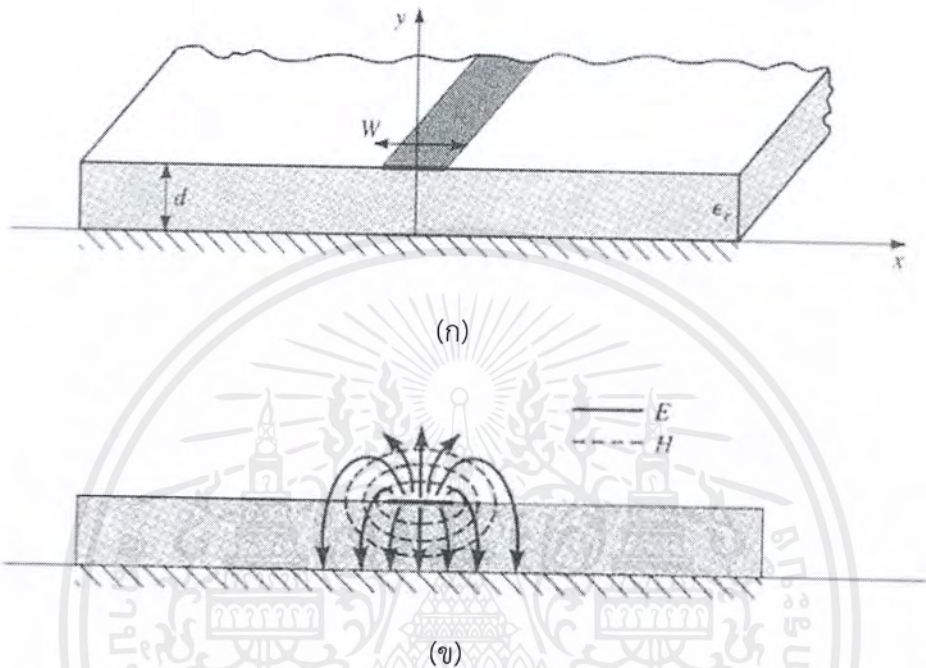
$$(AF)_n \cong \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\Psi\right)}{\frac{N}{2}\Psi} \right] \quad (2.30)$$

## 2.8 ไมโครสตริป (Microstrip)

ไมโครสตริปเป็นหนึ่งในสายส่งแบบระนาบที่เป็นที่นิยมมากที่สุด เพราะว่ามันสามารถสร้างขึ้นด้วยกระบวนการถ่ายทอดลวดลายวงจรด้วยแสง (Photolithographic processes) และยังใช้ร่วมกับอุปกรณ์ไมโครเวฟแบบ Passive และ Active ได้อย่างง่ายดาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 2.26(ก) และเส้นสนามไฟฟ้า (field lines) แสดงดังรูปที่ 2.26(ข) [3]



รูปที่ 2.26 ไมโครสตริป [3]

(ก) องค์ประกอบของไมโครสตริป (ข) เส้นสนามไฟฟ้าและเส้นสนามแม่เหล็ก

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของวัสดุ สามารถหาค่าประมาณ ได้โดย

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (2.31)$$

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลคือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ผ่านตัวกลางอากาศและไดอิเล็กตริกของไมโครสตริป ในลักษณะเดียวกัน โดยที่ความเร็วเฟสและค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่นสามารถหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (2.32)$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \quad (2.33)$$

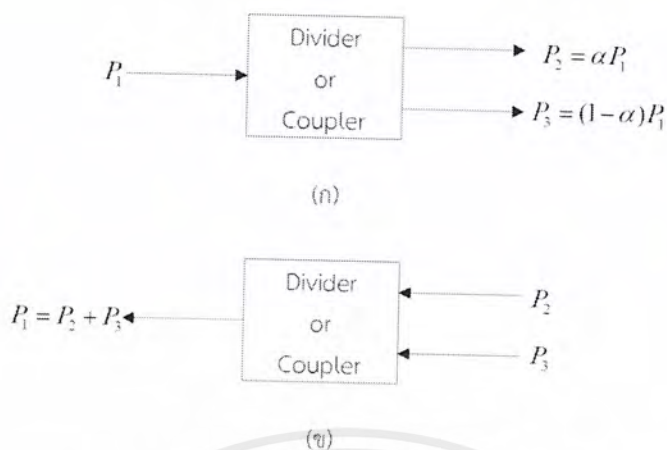
โดยที่  $\epsilon_{\text{reff}}$  ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล บางส่วนของเส้นสนามไฟฟ้าอยู่ในบริเวณไดอิเล็กตริก และบางส่วนก็อยู่ในอากาศ ความสัมพันธ์ของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลแสดงได้โดย

$$1 < \epsilon_{\text{reff}} < \epsilon_r \quad (2.34)$$

## 2.9 วงจรแบ่งกำลังและการออกแบบตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง (Power divider and Directional couplers)

วงจรแบ่งกำลังและการออกแบบตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง (Directional couplers) เป็นอุปกรณ์ไมโครเวฟ Passive ที่ใช้สำหรับการแบ่งกำลังงานหรือการรวมกำลังงาน สำหรับวงจรแบ่งกำลังสัญญาณอินพุตจะถูกแบ่งโดยคัปเปิลเลอร์เป็นสองสัญญาณ (หรือมากกว่า) ที่มีกำลังงานน้อยลง การคัปเปิลเลอร์ อาจจะเป็น 3-port ดังแสดงในรูปที่ 2.27 อาจจะมีการสูญเสีย หรือไม่มีการสูญเสีย หรืออาจจะเป็น 4 พอร์ต ถ้าเป็น 3-port network จะเข้ารูปแบบ T-junctions และรูปแบบอื่นๆ ของวงจรแบ่งกำลังได้ ขณะที่ 4-port network จะเข้าสู่รูปแบบของ การออกแบบตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง และไฮบริด

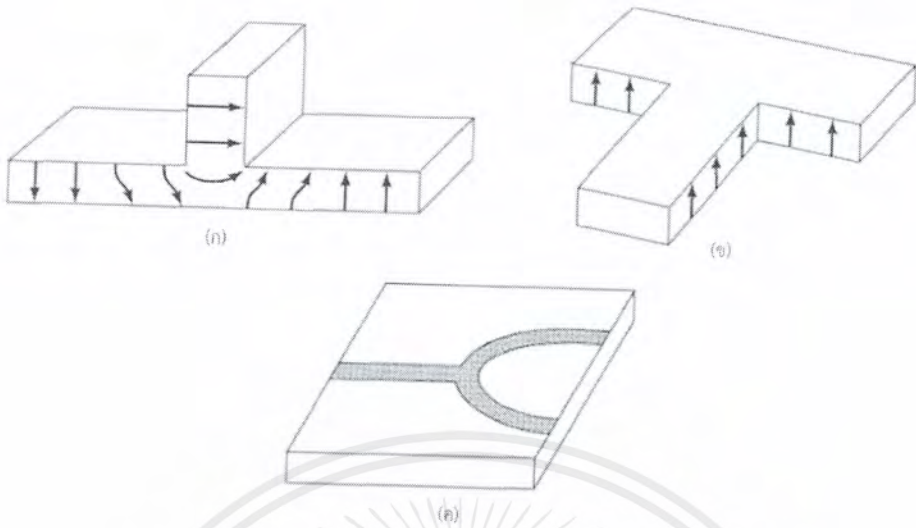
วงจรแบ่งกำลังส่วนใหญ่จะเป็นวงจรแบ่งกำลังเท่ากัน (Equal-division (3dB)) แต่ถ้าต้องการ วงจรแบ่งกำลังที่แบ่งไม่เท่ากันก็สามารถจะออกแบบได้เช่นเดียวกัน ตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง สามารถออกแบบสำหรับ Arbitrary directional ได้ ขณะที่ Hybrid junction มีทั้งแบบเปลี่ยนเฟส 90 องศา (Quadrature) หรือ 180 องศา (Magic-T) ระหว่างพอร์ทเอทพุต [3]



รูปที่ 2.27 วงจรแบ่งกำลังและวงจรรวมกำลัง (ก) วงจรแบ่งกำลัง (ข) วงจรรวมกำลัง

### 2.9.1 วงจรแบ่งกำลังแบบ T-Junction

วงจรแบ่งกำลังแบบ T-junction เป็น 3-port network แบบธรรมดา ที่สามารถใช้เป็นวงจรแบ่งกำลังหรือรวมกำลังได้ และสามารถทำเป็นตัวกลางส่งผ่านชนิดใดก็ได้อย่างแท้จริง ในรูปที่ 2.28 จะแสดงถึงรูปแบบทั่วไปของ T-junction แบบท่อนำคลื่นและแบบไมโครสตริป หรือรูปแบบ สตริปไลน์ T-junction ที่แสดงในด้านล่าง ไม่สามารถสรุปได้ว่าเป็นแบบ Loss หรือแบบ Lossless junction ดังนั้นจึงมีการโต้แย้งกันจนสรุปได้ว่าบาง Junction ไม่สามารถแมตช์ทุกพอร์ตพร้อมกันได้ สามารถปรับแก้ได้ตามหลักการของ Resistive divider ซึ่งจะสามารถแมตช์ได้ทุกพอร์ตแต่จะมีการสูญเสีย

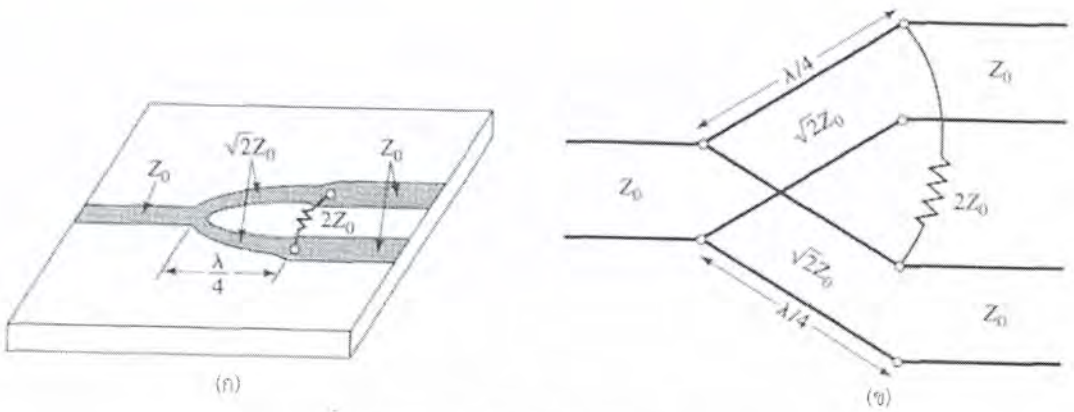


รูปที่ 2.28 วงจรแบ่งกำลังแบบ T-junction [3]

(ก) E-plane waveguide T (ข) H-plane waveguide T (ค) Microstrip T-Junction

### 2.9.2 วงจรแบ่งกำลังงานแบบ Wilkinson (The Wilkinson power divider)

สำหรับวงจรแบ่งกำลังแบบ T-junction ที่มีการสูญเสีย จะมีปัญหาคือไม่สามารถทำการแมตซ์ซึ่งทุกพอร์ตได้ ยิ่งไปกว่านั้นยังไม่สามารถทำการ Isolation ระหว่างพอร์ตเอาต์พุต แต่ Resistive divider สามารถแมตซ์ได้ทุกพอร์ต ถึงแม้ว่ามันจะมีการสูญเสีย เพราะไม่สามารถทำการ Isolation ได้ แต่อย่างไรก็ตาม 3-port network ที่มีการสูญเสีย จะสามารถทำให้ทุกพอร์ตแมตซ์กับ Isolation ระหว่างพอร์ตเอาต์พุต วงจรแบ่งกำลังงานแบบ Wilkinson เป็นโครงข่ายหนึ่งที่ไม่มีการสูญเสีย เมื่อเอาต์พุตพอร์ตสามารถทำการแมตซ์ได้



รูปที่ 2.29 วงจรแบ่งกำลังแบบ Wilkinson [3]

(ก) Equal-split Wilkinson power divider in microstrip form (ข) วงจรสมมูล

## 2.10 สรุป

การสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบแถวลำดับเพื่อใช้ติดตั้งบนยานพาหนะเคลื่อนที่สำหรับรับสัญญาณจากดาวเทียม จำเป็นต้องอาศัยปัจจัยหลายๆ อย่าง มาประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อให้จะได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ และตรงตามความต้องการของผู้ใช้มากที่สุด

สำหรับสายอากาศไมโครสตริป ด้วยข้อดีของมันนั่นก็คือ มีน้ำหนักเบา (Light weight) ขนาดเล็ก (Small size) สามารถทำให้เป็นแผ่นบางๆ ได้ เพราะไม่มีผลทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic) โครงสร้างไม่ซับซ้อน (Low profile) สามารถผลิตได้ง่าย และราคาถูก (Low fabrication cost) ด้วยความกะทัดรัดและความแบนราบนี้เองซึ่งส่งผลให้มีความสะดวกในการติดตั้งบนวัตถุที่เคลื่อนที่ได้ เช่น จรวด ดาวเทียม ยานพาหนะ ต่าง ๆ ในที่นี้ใช้ในย่านความถี่ค่อนข้างสูง จึงทำการสร้างเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้เหมาะสมและสามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยต้องอาศัยการวิเคราะห์และคำนวณที่มีประสิทธิภาพเช่นกันเพื่อที่จะสามารถประหยัดเวลาในการออกแบบ และช่วยลดต้นทุนในการออกแบบและผลิตสายอากาศไมโครสตริปแบบแถวลำดับนี้

## บทที่ 3

### การออกแบบและการจำลองผลการทำงานของสายอากาศไมโครสตริบ

#### 3.1 บทนำ

จากบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าสายอากาศไมโครสตริบมีหลายรูปทรง ซึ่งเราเลือกออกแบบสายอากาศไมโครสตริบรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular patch) ที่เป็นรูปทรงนิยมออกแบบ เนื่องจากการวิเคราะห์แบบจำลองสายนำสัญญาณ (Transmission line model) และแบบจำลองโพรงคลื่น (Cavity model) นั้นค่อนข้างง่าย อีกทั้งยังเป็นรูปทรงสร้างได้ง่าย

#### 3.2 การออกแบบ

##### 3.2.1 การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริบรูปสี่เหลี่ยม

การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริบมีด้วยกันหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองสายนำสัญญาณ (Transmission line model) แบบจำลองโพรงคลื่น (Cavity model) และการวิเคราะห์เต็มคลื่น (Full wave analysis) เป็นต้น เนื่องจากวิธีการใช้แบบจำลองสายนำสัญญาณเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด และให้ผลการวิเคราะห์เป็นที่ยอมรับ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะอธิบายวิธีการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริบสี่เหลี่ยมด้วยวิธีการใช้แบบจำลองสายนำสัญญาณ [4]

สำหรับกรณีที่เราทราบค่าความถี่เรโซแนนท์และวัสดุฐานรองที่ใช้ เราจะสามารถคำนวณหาค่าความกว้างของสายอากาศไมโครสตริบรูปสี่เหลี่ยมได้ดังสมการที่ 3.1

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.1)$$

การออกแบบไมโครสตริบนั้นมียัตถุประสงค์หลัก คือการกำหนดค่าความกว้างของไมโครสตริบและความหนาของวัสดุฐานรองเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ตามลักษณะที่ต้องการ ซึ่งในแผ่นตัวนำนั้น จะมีปรากฏการณ์ Fringing effect ที่สนามไฟฟ้า ณ ขอบของแผ่นตัวนำ จะมีสนามไฟฟ้าแผ่วนเกินแผ่นตัวนำ ทำให้พบว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกนั้นไม่สามารถใช้ได้กับวัสดุฐานรอง จึงต้องเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective dielectric;  $\epsilon_{\text{reff}}$ ) ในการคำนวณหาขนาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งค่าไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของระบบนั้น จะรวมผลของสารไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองและอากาศเข้าด้วยกัน และเนื่องจากสารไดอิเล็กตริกทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ หรือมีดิสเพอร์ชันเชิงวัสดุ ดังนั้น  $\epsilon_{\text{reff}}$  ที่หาได้ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไปด้วย ซึ่งค่า  $\epsilon_{\text{reff}}$  นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3.2)$$

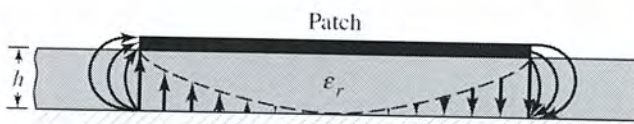
เมื่อ

$$\frac{W}{h} > 1$$

สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมนั้นเราจะสังเกตที่ขอบด้านกว้างทั้งสอง มีสนามที่ขอบ (Fringing field) ปรากฏอยู่ หมายความว่าความยาวทางไฟฟ้าของไมโครสตริปจะต้องยาวกว่าความยาว  $L$  นั่นคือความยาวประสิทธิผล (Effective length) ของแผ่นตัวนำ โดยแผ่นตัวนำที่ใช้ในการคำนวณควรมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งสองด้านเท่ากับ  $\Delta L$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1



(ก) Top view



(ข) Side view

รูปที่ 3.1 ความยาวประสิทธิผลของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยม [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถคำนวณหาค่า  $\Delta L$  ได้ตามสมการที่ 3.3

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.3)$$

จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความยาวประสิทธิผลของไมโครสตริปจากผลของ Fringing effect ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (3.4)$$

จากสมการที่ 3.4 ค่าความยาวของแผ่นตัวนำจะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.5

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (3.5)$$

สำหรับโหมดของคลื่น  $TM_{010}$  (Dominant mode) ค่าความถี่เรโซแนนท์ของสายอากาศไมโครสตริปจะเป็นฟังก์ชันของความยาวดังสมการที่ 3.6

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{c}{2L \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสงในอากาศ มีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s

อย่างไรก็ตามค่าความถี่เรโซแนนท์ในสมการ (3.6) นั้นยังไม่คิดผลของสนามที่ขอบ และถ้าเราคิดผลของสนามที่ขอบสมการ (3.6) จะต้องถูกปรับปรุงใหม่ดังสมการที่ 3.7

$$\begin{aligned} (f_{rc})_{010} &= \frac{1}{2L_{\text{eff}} \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{2(L + \Delta L) \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \\ &= q \frac{1}{2L \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = q \frac{c}{2L \sqrt{\epsilon_r}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $q = \frac{(f_{rc})_{010}}{(f_r)_{010}}$  (3.8)

ค่า  $q$  จะเรียกว่า ตัวประกอบสนามที่ขอบ (Fringe factor) ซึ่งเมื่อความหนาของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสนามที่ขอบก็เพิ่มขึ้นตาม เป็นผลให้ระยะห่างระหว่างขอบของร่องที่แพร่กระจายคลื่นห่างกันมากขึ้นและค่าความถี่เรโซแนนท์ลดลง

แบบจำลองสายนำสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปสามารถแสดงในรูปที่ 3.2 เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมจะแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ร่องที่ด้านกว้างทั้งสองข้าง ดังนั้นจึงแทนค่าความนำของช่องเปิดสี่เหลี่ยมด้วย  $G$  และค่ารีแอกแตนซ์ของช่องเปิดสี่เหลี่ยมด้วย  $B$  ในแบบจำลองโดยที่

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (3.9)$$

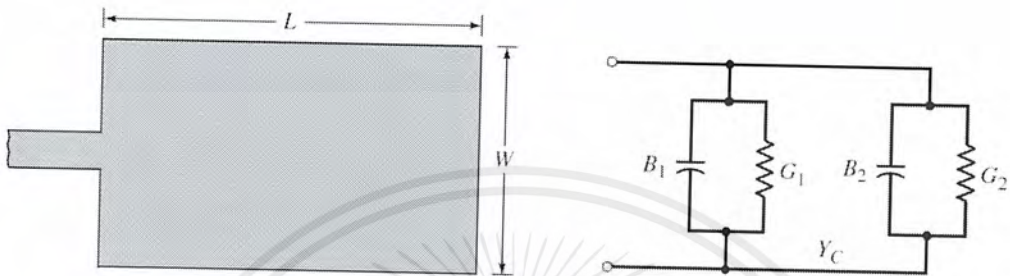
เมื่อ

$$I_1 = \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta \quad (3.10)$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin\theta) \sin^3 \theta d\theta \quad (3.11)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$



รูปที่ 3.2 ไมโครสตริปสี่เหลี่ยมและวงจรสมมูลแบบ transmission-line model [1]

สำหรับการป้อนสัญญาณโดยใช้เส้นป้อนสัญญาณ (Inset feed) สามารถหาความต้านทานของอินพุตที่ความถี่เรโซแนนซ์ ได้จากสมการที่ 3.13

$$R_m = \frac{1}{2(G_1 + G_2)} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (3.13)$$

ในที่นี้กำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์ให้มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นจากสมการ (3.13) จึงถูกใช้เพื่อคำนวณหาความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $y_0$ )

การคำนวณความกว้างของสายนำสัญญาณ

$$W_0 = \frac{2h}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (3.14)$$

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เรานำไปคำนวณเพื่อออกแบบได้ โดยทำการออกแบบสายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่ KU-BAND มีแบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 11.5 GHz ถึง 11.7 GHz และ

เลือกใช้วัสดุฐานรอง RT/duriod 5880 หนา 1.575 mm ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.2 และ กำหนดความยาวของสายนำสัญญาณเป็นหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น

ผลที่ได้จากการคำนวณที่ความถี่กลาง 11.6 GHz ทำให้พารามิเตอร์ดังนี้

ความกว้างของแผ่นตัวนำ ( $W$ )	มีค่าเท่ากับ 10.000 mm
ความยาวของแผ่นตัวนำ ( $L$ )	มีค่าเท่ากับ 7.474 mm
ความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_0$ )	มีค่าเท่ากับ 1.587 mm
ความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $y_0$ )	มีค่าเท่ากับ 3.414 mm

ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นสำหรับปรับเปลี่ยนขนาด เพื่อให้ได้ค่าคุณลักษณะที่ดี เพื่อสร้างสายอากาศก่อนนำมาจัดเรียงเพื่อสร้างสายอากาศแถวลำดับต่อไป

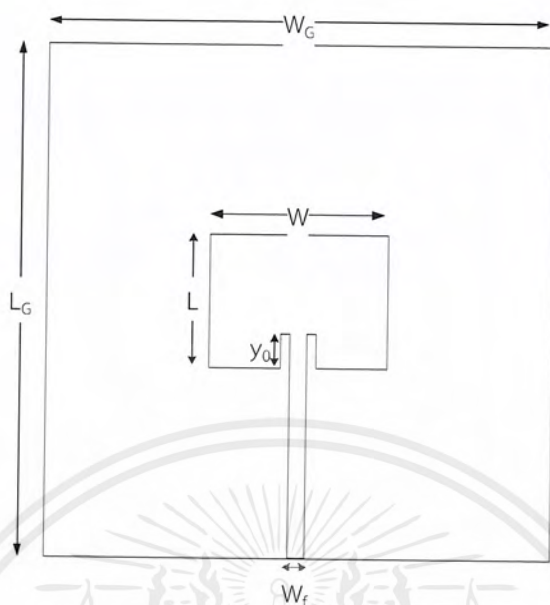
### 3.3 การจำลองผลการทำงานของสายอากาศ

ในการวิเคราะห์สายอากาศนั้น จะมีพารามิเตอร์ที่จำเป็นที่ต้องนำมาพิจารณา เช่น  $|S_{11}|$  ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยการจำลองนั้น จะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้คำนวณมาจากข้างต้น โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio จำลองการทำงานของสายอากาศเริ่มต้นดังรูปที่ 3.3 เพื่อพิจารณาค่าคุณลักษณะต่างๆ ก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบต่อไป

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริป

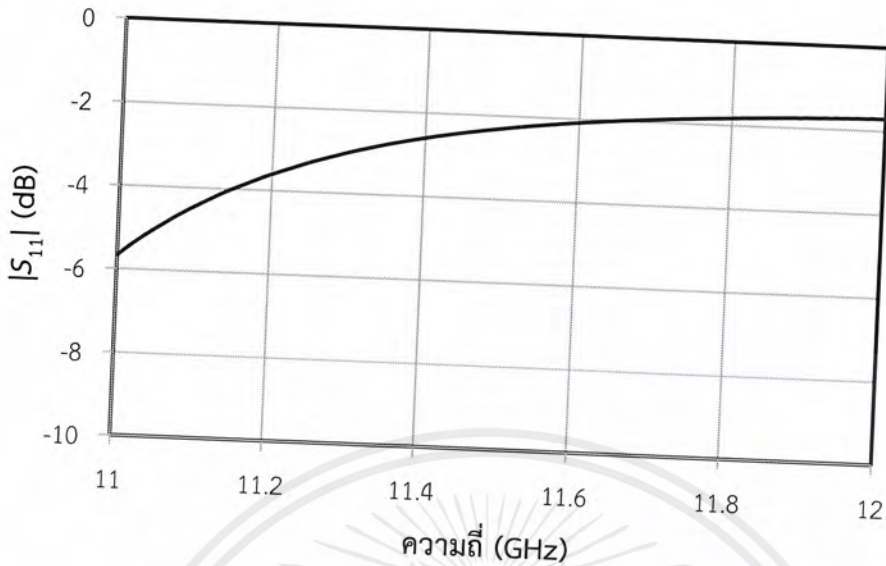
พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
ความกว้างของแผ่นตัวนำ ( $W$ )	10.000
ความยาวของแผ่นตัวนำ ( $L$ )	7.474
ความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_0$ )	1.587
ความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $y_0$ )	3.414

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 โครงสร้างสายอากาศเริ่มต้นที่ทำการจำลอง

เมื่อทำการจำลองสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ โดยการวิเคราะห์ผลจะให้ความสำคัญของ  $|S_{11}|$  มาใช้ในประกอบการพิจารณาในการออกแบบสายอากาศ โดยในการพิจารณานั้นสายอากาศจะต้องมี  $|S_{11}|$  น้อยกว่า  $-10$  dB ซึ่งที่ความถี่กลาง 11.6 GHz มี  $|S_{11}|$  อยู่ที่  $-4.22$  dB ยังไม่สามารถใช้งานได้ เราจึงจำเป็นต้องปรับพารามิเตอร์ใหม่เพื่อให้ได้ค่าคุณลักษณะของสายอากาศครอบคลุมที่ย่านความถี่ที่ใช้งานมากที่สุดโดยแสดงการปรับพารามิเตอร์ดังรูปที่ 3.4



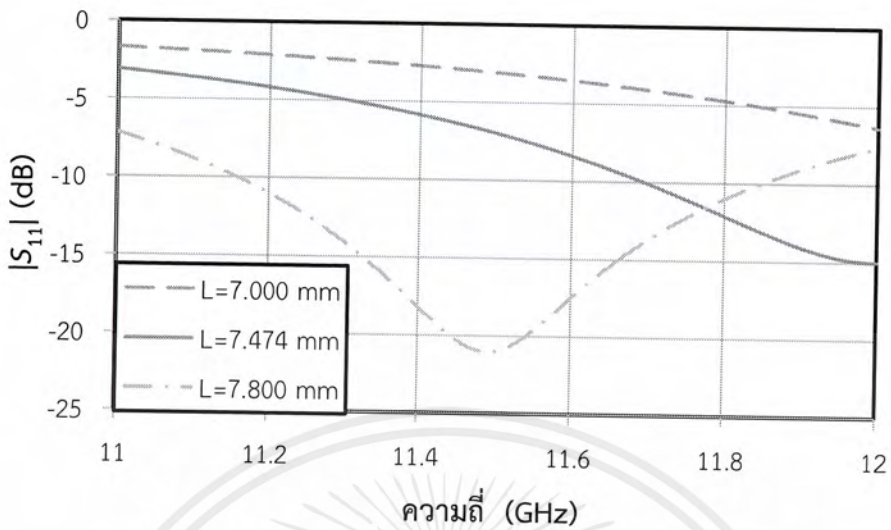
รูปที่ 3.4  $|S_{11}|$  ของสายอากาศเริ่มต้นจากการจำลอง

### 3.3.1 การปรับค่าพารามิเตอร์

เป็นการเปลี่ยนค่าของพารามิเตอร์ตัวที่เราจะพิจารณา โดยที่ค่าความถี่ของพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ยังคงค่าเดิม แล้วทำการเปรียบเทียบซึ่งทำให้เห็นแนวโน้มของพารามิเตอร์ตัวนั้นๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุด

#### 3.3.1.1 การปรับเปลี่ยนค่าความยาว

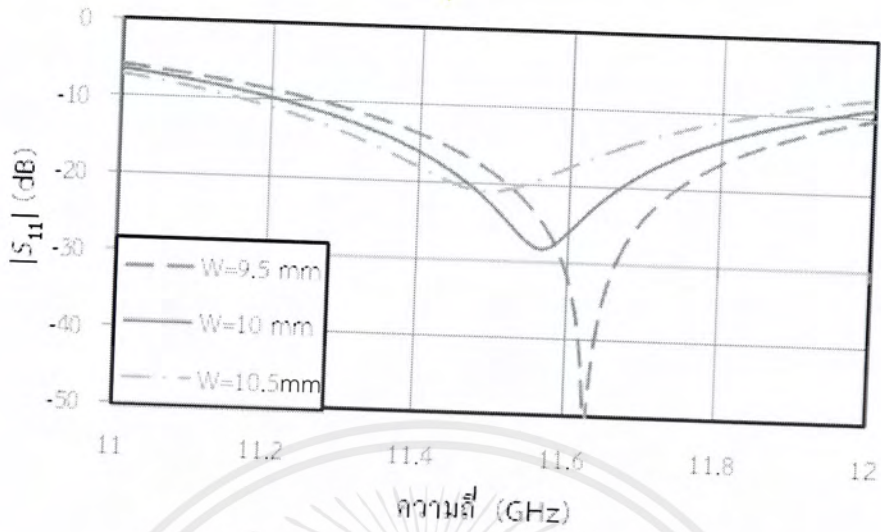
จากการคำนวณข้างต้นค่าความยาวของแผ่นตัวนำมีค่าเท่ากับ 7.474 mm ซึ่งใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการปรับเปลี่ยนค่าความยาว ซึ่งจะเห็นว่าความยาวเท่ากับ 7.8 mm จะมีแนวโน้มที่ให้ค่า  $|S_{11}|$  ที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ที่ความยาวนี้ แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การเลือกค่าความยาวของแผ่นตัวนำ

### 3.3.1.2 การปรับเปลี่ยนค่าความกว้าง

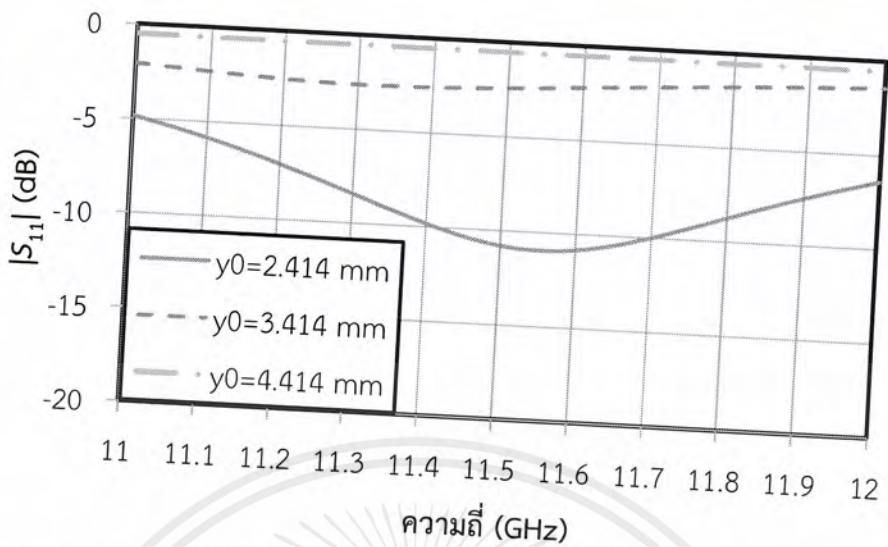
จากการคำนวณข้างต้นค่าความกว้างของแผ่นตัวนำมีค่าเท่ากับ 10 mm ซึ่งใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการปรับเปลี่ยนค่าความกว้าง จนได้ค่าที่มีแนวโน้มที่ให้  $|S_{11}|$  ที่ดีที่สุด เลือกใช้ค่าความกว้างของแผ่นตัวนำเท่ากับ 9.5 mm แสดงให้เห็นได้ดังรูป 3.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความกว้างมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์เล็กน้อย



รูปที่ 3.6 การเลือกค่าความกว้างของแผ่นตัวนำ

### 3.2.1.3 การปรับเปลี่ยนค่าความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยม

จากการคำนวณข้างต้นค่าความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 3.414 mm ซึ่งใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการปรับเปลี่ยนค่าความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยม จนได้ค่าที่มีแนวโน้มที่ให้  $|S_{11}|$  ที่ดีที่สุด เลือกใช้ค่าความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยมเท่ากับ 2.414 mm แสดงให้เห็นได้ดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 การเลือกค่าความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยม

หลังจากปรับแต่ละพารามิเตอร์แล้ว ก็ปรับค่าโดยรวมทั้งหมดอีกครั้งเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ผลที่ได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์ เพื่อให้สายอากาศทำงานที่ความถี่กลาง 11.6 GHz ได้ค่าพารามิเตอร์ที่จะถูกนำไปสร้างสายอากาศจริงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริป

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
ความกว้างของแผ่นตัวนำ ( $W$ )	10.85
ความยาวของแผ่นตัวนำ ( $L$ )	7.7
ความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_0$ )	0.9
ความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $y_0$ )	2
ความยาวของสายนำสัญญาณ ( $L_f$ )	6.5
ความกว้างของระนาบกราวด์ ( $W_G$ )	30
ความยาวของระนาบกราวด์ ( $L_G$ )	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

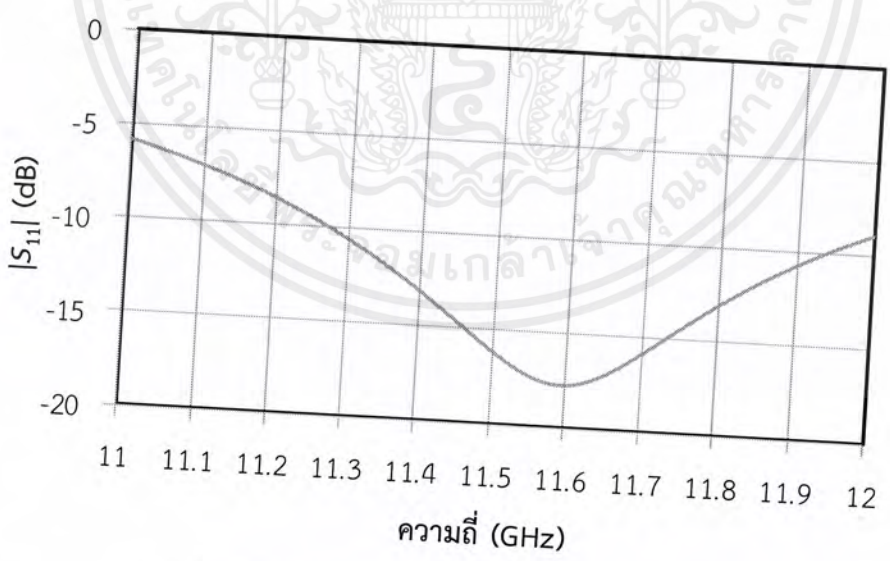
### 3.4 สายอากาศไมโครสตริปต้นแบบ

การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศนั้น จะมีพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากในการที่จะต้องนำมาพิจารณา เช่น อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การทดลองออกแบบนั้นจะใช้ค่าต่างๆ ที่คำนวณได้จากหัวข้อที่ 3.1 นั้นมาทำการจำลองการสร้างสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เพื่อทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนที่จะนำไปสร้างและทดสอบจริงต่อไป

#### 3.4.1 พิจารณา $|S_{11}|$

$|S_{11}|$  จะต้องทำให้มีค่าน้อยกว่า -10 dB จึงจะทำให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นออกมาได้ โดยพิจารณาในย่านความถี่ 11.5 GHz ถึง 11.7 GHz แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.8 เมื่อพิจารณาดูแล้วในย่านความถี่ข้างต้นมีค่า  $|S_{11}|$  น้อยกว่า -10 dB ซึ่งสายอากาศมีแบนด์วิดธ์ 11.275 GHz ถึง 11.937 GHz

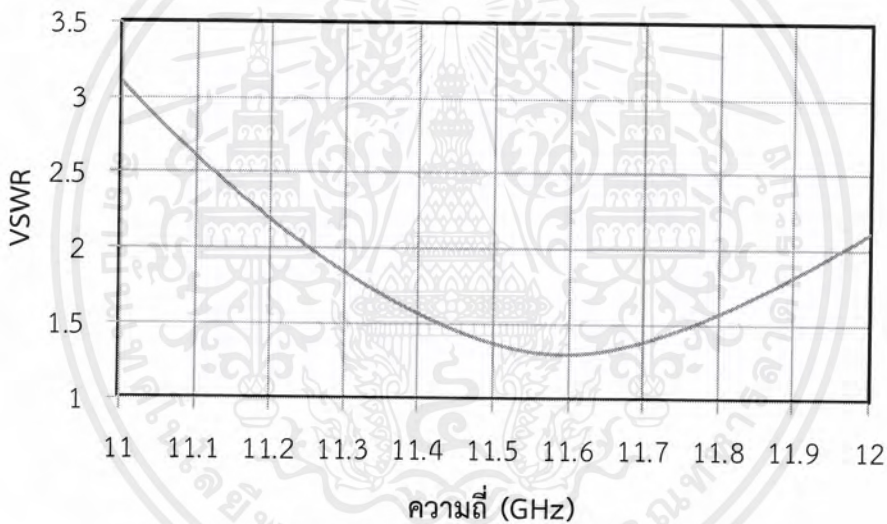


รูปที่ 3.8  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง

### 3.4.2 พิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน คือค่าแรงดันที่มากที่สุด และค่าแรงดันที่น้อยที่สุดของคลื่น ที่ได้มาจากการรวมกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนที่มีเฟสตรงกันและมีเฟสตรงกันข้ามกันตามลำดับ โดยที่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งนี้ไม่ควรมีค่าเกิน 2 แต่ถ้าจะให้ดีควรจะอยู่ระหว่าง 1 ถึง 1.5

รูปที่ 3.9 ที่ความถี่ที่พิจารณา คือ 11.6 GHz นั้น พบว่าค่า VSWR มีค่า 1.298 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 1.5 ทำให้สามารถนำสายอากาศนี้ไปใช้งานได้จริง



รูปที่ 3.9 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง

### 3.4.3 พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์

การพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์จำเป็นต้องปรับพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม เนื่องจากอุปกรณ์เชื่อมต่อโดยส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นมาเป็นมาตรฐานฉะนั้นเพื่อให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณน้อยที่สุดจึงต้องทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงที่สุด

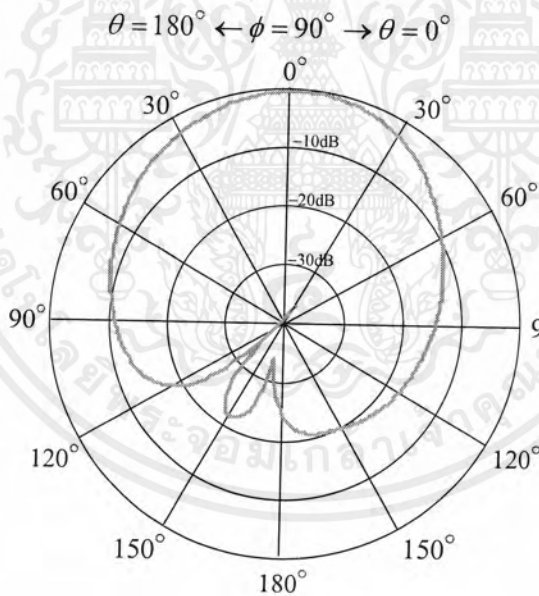
โดยพิจารณาหาค่าอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ 11.6 GHz จะมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ประมาณ  $38.69-j2.123$  โอห์ม

### 3.4.4 พิจารณาอัตรายายของสายอากาศ

อัตรายายของสายอากาศที่ได้จากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO พบว่าที่ความถี่ 11.6 GHz จะมีค่าอัตรายาย 8.327 dBi

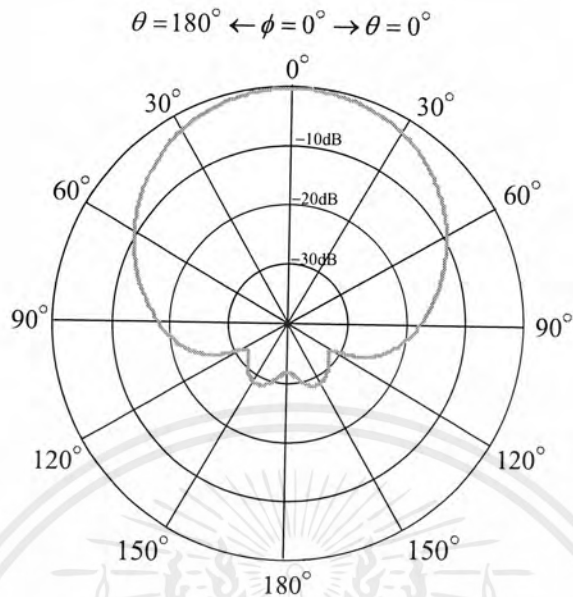
### 3.4.5 พิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในระนาบสนามไฟฟ้าพิจารณาที่ความถี่ 11.6 GHz ลำคลื่นหลักมีขนาด 8.3 dBi ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 73.2 deg. ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง

รูปที่ 3.11 แสดงสนามแม่เหล็กพิจารณาที่ความถี่ 11.6 GHz ลำคลื่นหลักมีขนาด 8.3 dBi ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 77.4 deg. และมีระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างมีค่าเท่ากับ  $-24.6\text{ dB}$



รูปที่ 3.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลอง

หลังจากจำลองคุณลักษณะจนได้ผลตามต้องการ จะได้สายอากาศที่มีพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.2 และมีคุณลักษณะดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริป

คุณลักษณะ	ค่าที่ได้จากการจำลอง
$ S_{11} $ ที่ความถี่ 11.6 GHz	-17.74
อัตราขยาย	8.327
ช่วงกว้างความถี่	11.275 GHz - 11.937 GHz
การโพลาไรซ์	Linear polarization
ระนาบสนามไฟฟ้า	
- ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	73.2 deg
- ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง	-
ระนาบสนามแม่เหล็ก	
- ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	77.4 deg
- ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง	-24.6 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 สรุป

สายอากาศไมโครสตริปถูกออกแบบด้วยแบบจำลองโพรงคลื่น (Cavity model) แล้วนำมาจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะก่อนนำมาสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยการจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรมก่อนนั้น จะทำให้ลดความเสี่ยงของสายอากาศต้นแบบที่สร้างแล้วไม่แมตช์ (ใช้งานไม่ได้) และสะดวกต่อการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของสายอากาศ



## บทที่ 4

### การออกแบบวงจรแบ่งกำลังและสายอากาศแถวลำดับ

#### 4.1 บทนำ

จากบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปมีหลายรูปทรง ซึ่งเราเลือกออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular patch) ที่เป็นรูปทรงนิยมออกแบบ เนื่องจากการวิเคราะห์แบบจำลองสายนำสัญญาณ (Transmission line model) และแบบจำลองโพรงคลื่น (Cavity model) นั้นค่อนข้างง่าย อีกทั้งยังเป็นรูปทรงสร้างได้ง่าย

#### 4.2 การออกแบบวงจรแบ่งกำลัง

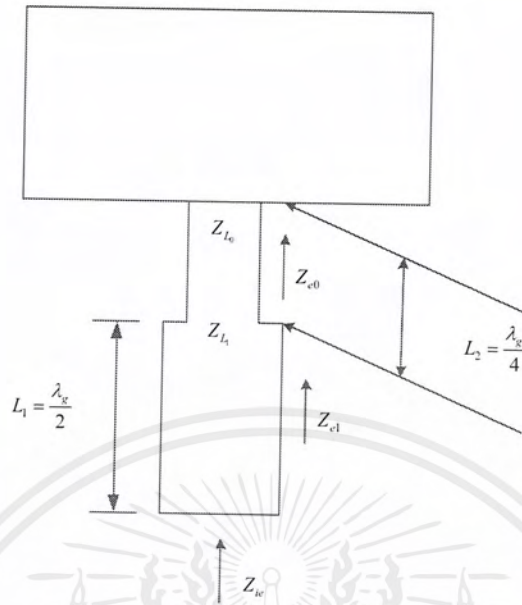
หลังจากคำนวณหาขนาดของแผ่นตัวนำได้แล้ว ต่อไปจะทำการคำนวณสายนำสัญญาณ (Feed line) ซึ่งเราจะออกแบบให้เป็น 2 ช่วงคือ ในช่วงแรกที่อยู่กับสาย Coaxial มีความยาวเท่ากับ  $\frac{\lambda_g}{2}$  และในช่วงที่สองจะเป็นช่วงที่อยู่กับแผ่นตัวนำ (Patch) ช่วงที่สองนี้จะมีความยาวเท่ากับ  $\frac{\lambda_g}{4}$  ดังรูปที่ 4.1 [5] โดยที่  $\lambda_g$  คือความยาวคลื่นในสายนำสัญญาณ โดยหาได้จาก

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่นมีค่าเท่ากับ  $\frac{c}{f}$  (m)

$\epsilon_{\text{reff}}$  คือค่าไดอิเล็กตริกประสิทธิผลหาได้จากสมการที่ 3.2

ซึ่ง  $\lambda_g$  มีค่าเท่ากับ 18.907 mm



รูปที่ 4.1 ความยาวของสายนำสัญญาณ

ดังนั้น

ความยาวของสายนำสัญญาณในส่วนที่ 1 ( $L_1$ ) 9.454mm

ความยาวของสายนำสัญญาณในส่วนที่ 2 ( $L_2$ ) 4.727 mm

จากสมการของสายนำสัญญาณ จะได้ว่า

$$Z_m = Z_o \frac{Z_L + jZ_o \tan(\beta L)}{Z_o + jZ_L \tan(\beta L)} \quad (4.2)$$

โดยที่

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$L$  = ความยาวของตัวป้อนสัญญาณ (Feed)

- พิจารณาหาอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ความยาวของสายนำสัญญาณในช่วงที่ 1  $L_1 = \frac{\lambda_g}{2}$

จากสมการที่ 4.2 จะได้เป็น

$$Z_m = Z_{o1} \frac{Z_{L1} + jZ_{o1} \tan(\beta L)}{Z_{o1} + jZ_{L1} \tan(\beta L)}$$

$$Z_m = Z_{o1} \frac{Z_{L1} + jZ_{o1} \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} \cdot \frac{\lambda_g}{2}\right)}{Z_{o1} + jZ_{L1} \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} \cdot \frac{\lambda_g}{2}\right)}$$

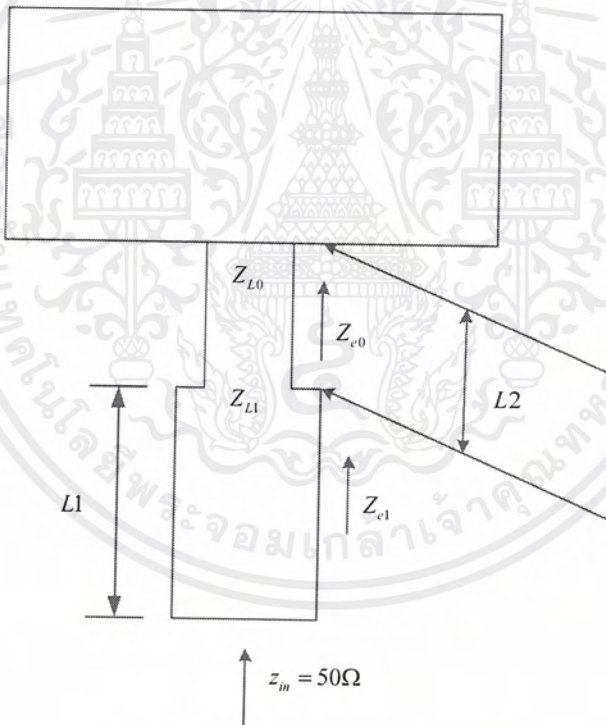
$$Z_m = Z_{o1} \frac{Z_{L1} + jZ_{o1} \tan(\pi)}{Z_{o1} + jZ_{L1} \tan(\pi)}$$

$$Z_m = Z_{o1} \frac{Z_{L1}}{Z_{o1}}$$

$$Z_m = Z_{L1}$$

(4.3)

จะพบว่า ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance) จะเท่ากับค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Output impedance) ดังรูปที่ 4.2 ในที่นี้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$



รูปที่ 4.2 การปรับค่าอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะพบว่า  $Z_{L_1}$  เป็นเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Output impedance = 50 Ohm) ของการพิจารณาในช่วงความยาวที่ 1 และยังเป็นอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance = 50 Ohm) ของการพิจารณาในช่วงที่ 2 ด้วย

- พิจารณาหาอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ความยาวของสายนำสัญญาณช่วงที่ 2  $L_2 = \left(\frac{\lambda_g}{4}\right)$

จากสมการที่ 4.2 จะได้เป็น

$$Z_{L_1} = Z_{o0} \frac{Z_{L_0} + jZ_{o0} \tan(\beta L)}{Z_{o0} + jZ_{L_0} \tan(\beta L)}$$

$$Z_{L_1} = Z_{o0} \frac{Z_{L_0} + jZ_{o0} \tan\left(\frac{2\pi \cdot \lambda_g}{\lambda_g} \cdot \frac{\lambda_g}{4}\right)}{Z_{o0} + jZ_{L_0} \tan\left(\frac{2\pi \cdot \lambda_g}{\lambda_g} \cdot \frac{\lambda_g}{4}\right)}$$

$$Z_{L_1} = Z_{o0} \frac{Z_{L_0} + jZ_{o0} \tan\left(\frac{\pi}{2}\right)}{Z_{o0} + jZ_{L_0} \tan\left(\frac{\pi}{2}\right)}$$

เมื่อ  $\tan \frac{\pi}{2} = \infty$  จะได้เป็น  $\frac{\infty}{\infty}$

ทำการหาค่าใหม่ โดยการคูณทั้งสองข้างด้วย  $\frac{\tan \frac{\pi}{2}}{\tan \frac{\pi}{2}}$

จะได้เป็น

$$Z_{L_1} \left[ \frac{\tan \frac{\pi}{2}}{\tan \frac{\pi}{2}} \right] = (Z_{o0}) \frac{\frac{Z_{L_0} + jZ_{o0} \tan\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi}{2}\right)} + \frac{jZ_{o0} \tan\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi}{2}\right)}}{\frac{Z_{o0}}{\tan\left(\frac{\pi}{2}\right)} + \frac{jZ_{L_0} \tan\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi}{2}\right)}}$$

$$Z_{L_1} = Z_{o0} \frac{0 + jZ_{o0}}{0 + jZ_{L_0}}$$

$$Z_{L_1} = Z_{o0} \frac{Z_{o0}}{Z_{L_0}}$$

ดังนั้น

$$Z_{L_1} = \frac{Z_{o0}^2}{Z_{L_0}} \quad (4.4)$$

จากที่พิจารณาสมการที่ 4.3 และ 4.4 จะพบว่าการปรับให้อิมพีแดนซ์ (Impedance) เท่ากันนั้นจะเริ่มปรับที่ช่วงที่ 2 ของสายนำสัญญาณ ( $L_2$ ) แต่ช่วงแรกของสายนำสัญญาณ ( $L_1$ ) ไม่มีการปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้แมตช์ (Match) ระหว่างสายอากาศกับแผ่นตัวนำเลย พิจารณาสมการที่ 4.4 จะพบว่าถ้าต้องการจะปรับค่าอิมพีแดนซ์ (Matching impedance) จำเป็นต้องทราบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance) ของแผ่นตัวนำ (Patch) ด้วย ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.9 - 3.12 ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance) ของแผ่นตัวนำ (Patch) จะหาได้จากสมการ (4.5)

$$Z_m = \frac{1}{2(G_1 + G_2)} \quad (4.5)$$

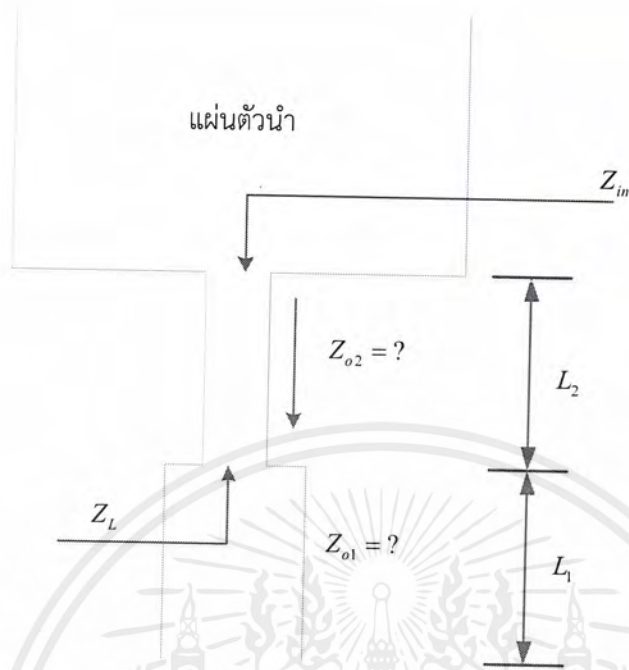
เมื่อทราบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance) ของแผ่นตัวนำ (Patch) แล้วต้องหาค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ที่จะทำให้เกิดการแมตช์ (Matching) โดยพิจารณาสมการการแมตช์สายนำสัญญาณที่  $\frac{\lambda}{4}$

$$Z_m = \frac{Z_o^2}{Z_L}$$

$$Z_o = \sqrt{Z_m Z_L}$$

(4.5)

พิจารณารูปที่ 4.3 เพื่ออธิบายการหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำให้สายเกิดการแมตช์ (Matching impedance)



รูปที่ 4.3 การพิจารณาหาค่าอิมพีแดนซ์

หาค่าอิมพีแดนซ์  $Z_{o1}$  และ  $Z_{o2}$  จากสมการที่ 4.5 แล้วกำหนดความกว้างของสายนำสัญญาณด้วยสมการที่ 3.14 จะได้ค่าความกว้างของสายนำสัญญาณ

$$\text{ความกว้างช่วงที่ 1 } W_1 = 4.853 \text{ mm}$$

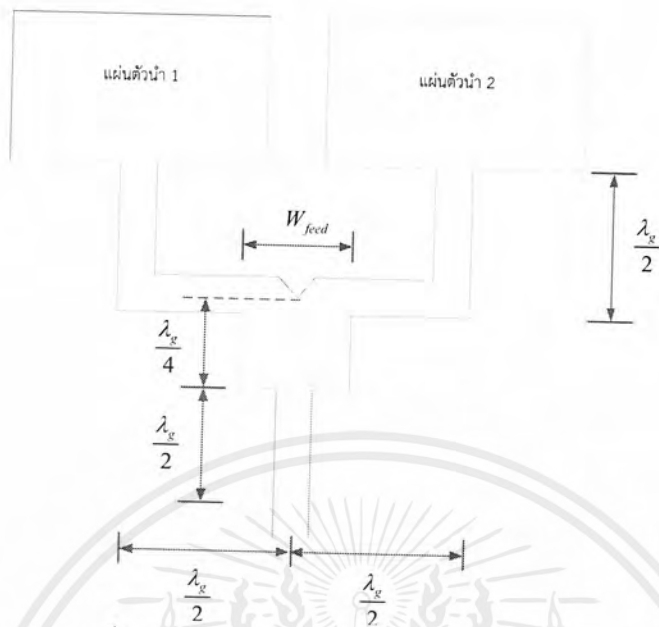
$$\text{ความกว้างช่วงที่ 2 } W_2 = 0.3676 \text{ mm}$$

ออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแกลวลำดับ โดยออกแบบวงจรถ่วงกำลังแบบ T-Junction แล้วจึงนำมาต่อกับสายอากาศไมโครสตริป 1 องค์ประกอบที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 การออกแบบ T-Junction สามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการข้างต้น [6] จะทำให้ได้

$$\text{ความยาวของ T-Junction } \left( L_{T\text{-Junction}} = \frac{\lambda_g}{4} \right) \quad L_{T\text{-Junction}} = 4.624 \text{ mm}$$

$$\text{ความกว้างของ T-Junction} \quad W_{T\text{-Junction}} = 2.772 \text{ mm}$$

เมื่อได้ค่าขนาดกว้างและยาวของส่วนต่างๆดังรูปที่ 4.4 และขนาดพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.1 แล้ว จึงนำไปสร้างจริงและทำการทดสอบต่อไป



รูปที่ 4.4 ขนาดส่วนต่างๆ ของไมโครสตริปแกลวลำดับ

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของวงจรแบ่งกำลังก่อนปรับปรุง

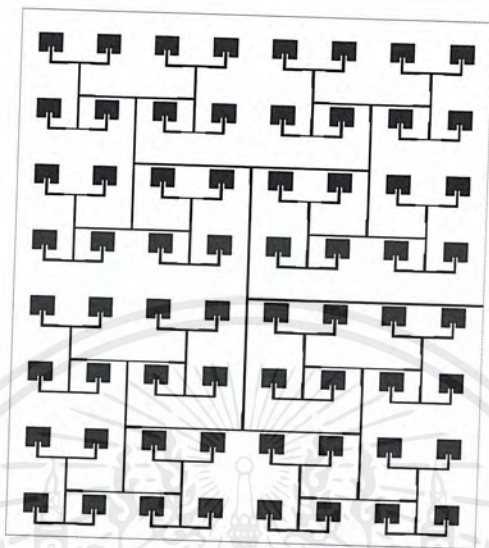
พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
ความกว้างของแผ่นตัวนำ ( $W$ )	10.85
ความยาวของแผ่นตัวนำ ( $L$ )	7.7
ความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_0$ )	0.9
ความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $y_0$ )	2
ความยาวของสายนำสัญญาณ ( $L_f$ )	6.5
ความยาวของ T-Junction	4.624
ความกว้างของ T-Junction	2.772

### 4.3 การจำลองผลการทำงานของสายอากาศ

ในการวิเคราะห์สายอากาศนั้น จะมีพารามิเตอร์ที่จำเป็นที่ต้องนำมาพิจารณา เช่น  $|S_{11}|$  ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยการจำลองนั้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้คำนวณมาจากข้างต้น โดยใช้โปรแกรม

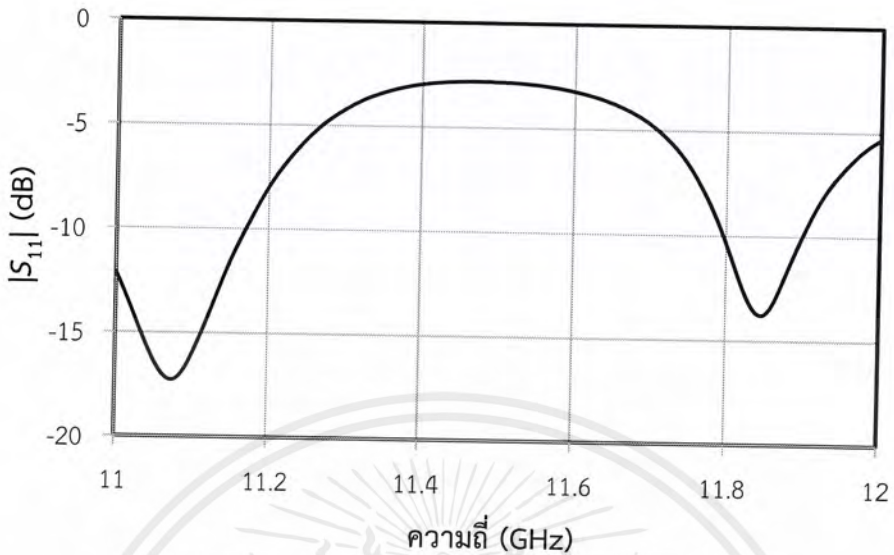
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST Microwave Studio จำลองการทำงานของสายอากาศ เพื่อพิจารณาค่าคุณลักษณะต่างๆ ก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบต่อไป



รูปที่ 4.5 โครงสร้างสายอากาศต้นแบบที่ทำการจำลอง

เมื่อทำการจำลองสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณและโครงสร้างดังรูปที่ 4.5 โดยการวิเคราะห์ผลจะให้ความสำคัญของ  $|S_{11}|$  ดังรูปที่ 4.6 มาใช้ในประกอบการพิจารณาในการออกแบบสายอากาศ โดยในการพิจารณานั้นสายอากาศจะต้องมี  $|S_{11}|$  น้อยกว่า  $-10$  dB ซึ่งที่ความถี่กลาง  $11.6$  GHz มี  $|S_{11}|$  เท่ากับ  $-3.22$  dB ยังไม่สามารถใช้งานได้ เราจึงจำเป็นต้องปรับพารามิเตอร์ใหม่เพื่อให้ได้ค่าคุณลักษณะของสายอากาศครอบคลุมที่ย่านความถี่ที่ใช้งานมากที่สุดโดยแสดงการปรับพารามิเตอร์



รูปที่ 4.6  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแถวลำดับจากการจำลองก่อนปรับปรุง

เป็นการเปลี่ยนค่าของพารามิเตอร์ตัวที่เราจะพิจารณา โดยที่ค่าความถี่ของพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ยังคงค่าเดิม แล้วทำการเปรียบเทียบซึ่งทำให้เห็นแนวโน้มของพารามิเตอร์ตัวนั้นๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุด

ผลที่ได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์ เพื่อให้สายอากาศทำงานที่ความถี่กลาง 11.6 GHz ได้ค่าพารามิเตอร์ที่จะถูกนำไปสร้างสายอากาศจริงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของวงจรแบ่งกำลังต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
ความกว้างของแผ่นตัวนำ ( $W$ )	9.5
ความยาวของแผ่นตัวนำ ( $L$ )	7.7
ความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_0$ )	0.92
ความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $y_0$ )	2
ความยาวของสายนำสัญญาณ ( $L_f$ )	6.5
ความยาวของ T-Junction	6.466
ความกว้างของ T-Junction	0.707

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

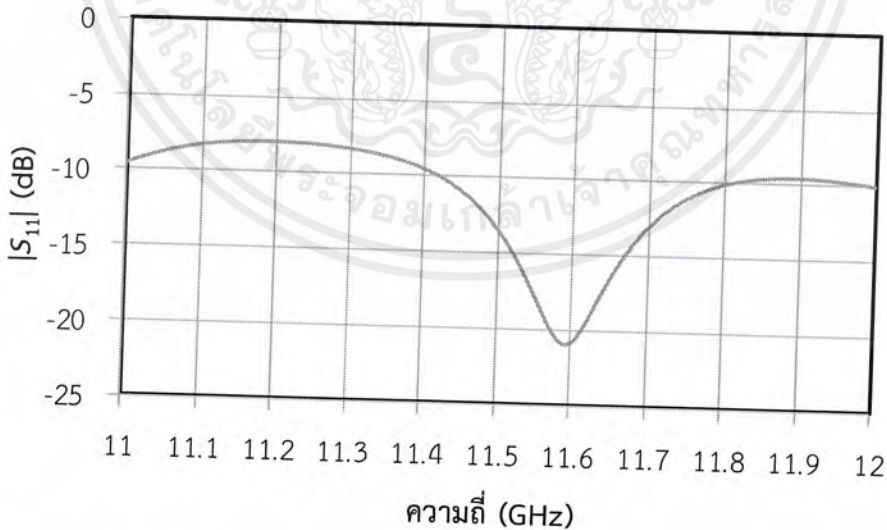
#### 4.4 สายอากาศไมโครสตริปแกลวลำดับ

การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศนั้น จะมีพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากในการที่ต้องนำมาพิจารณา เช่น อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การทดลองออกแบบนั้นจะใช้ค่าต่างๆ ที่คำนวณได้จากหัวข้อที่ 3.1 นั้นมาทำการจำลองการสร้างสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO เพื่อทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนที่จะนำไปสร้างและทดสอบจริงต่อไป

##### 4.4.1 พิจารณา $|S_{11}|$

$|S_{11}|$  จะต้องทำให้มีค่าน้อยกว่า 11.6 GHz จึงจะทำให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นออกมาได้ โดยพิจารณาในย่านความถี่ 11.5 GHz ถึง 11.7 GHz แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.7 โดยค่า  $|S_{11}|$  ที่ความถี่ 11.6 GHz มีค่า -20.868 dB สายอากาศที่จำลองได้มีแบนด์วิดธ์ 11.42 GHz - 11.807 GHz ซึ่งครอบคลุมความถี่ที่ใช้งาน

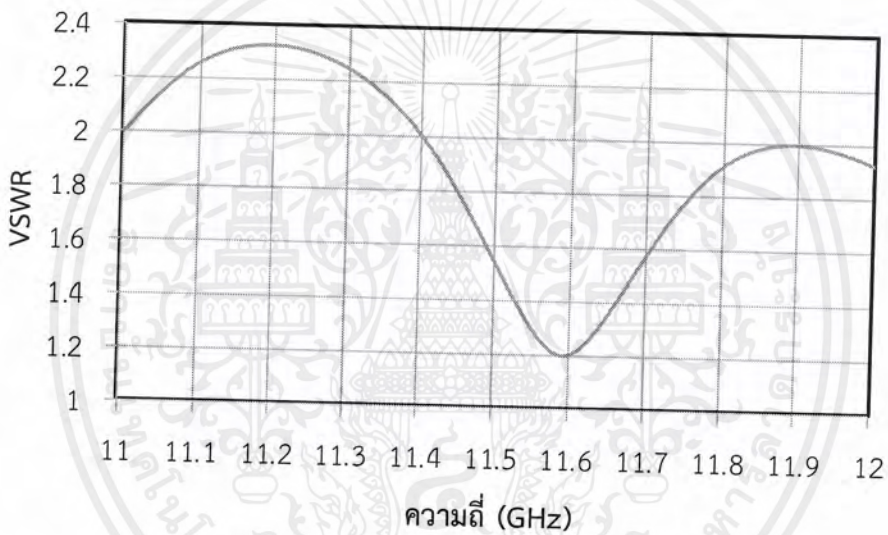


รูปที่ 4.7  $|S_{11}|$  ของสายอากาศแกลวลำดับจากการจำลองหลังปรับปรุง

#### 4.4.2 พิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน คือค่าแรงดันที่มากที่สุด และค่าแรงดันที่น้อยที่สุดของคลื่น ที่ได้มาจากการรวมกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนที่มีเฟสตรงกันและมีเฟสตรงกันข้ามกันตามลำดับ โดยที่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งนี้ไม่ควรเกิน 2 แต่ถ้าจะให้ดีควรจะอยู่ระหว่าง 1 ถึง 1.5

รูปที่ 4.8 ที่ความถี่ที่พิจารณา คือ 11.6 GHz นั้น พบว่าค่า VSWR มีค่า 1.198 ซึ่ง มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 1.5 ทำให้สามารถนำสายอากาศนี้ไปใช้งานได้จริง



รูปที่ 4.8 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ได้จากการจำลอง

#### 4.4.3 พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์

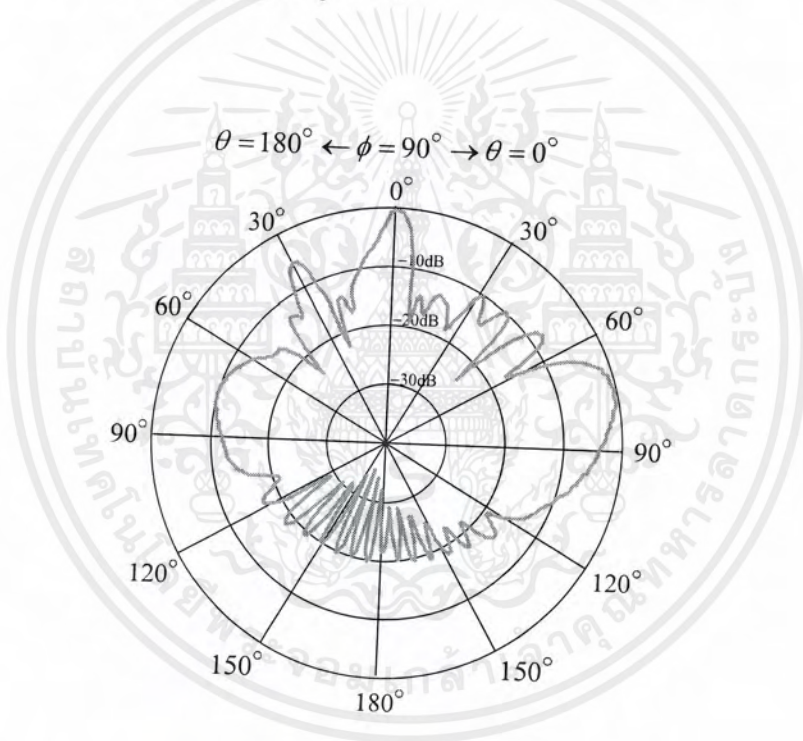
การพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์จำเป็นต้องปรับพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม เนื่องจากอุปกรณ์เชื่อมต่อโดยส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นมาเป็นมาตรฐานฉะนั้นเพื่อให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณน้อยที่สุดจึงต้องทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงที่สุด โดยพิจารณาหาค่าอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ 11.6 GHz จะมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ประมาณ 42.19 โอห์ม ซึ่ง จะเห็นได้ว่ามีค่าอยู่ในช่วง 45 – 55 โอห์ม

#### 4.4.4 พิจารณาอัตราขยายของสายอากาศ

ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO พบว่าที่ความถี่ 11.6 GHz จะมีค่าอัตราขยาย 14.48 dBi

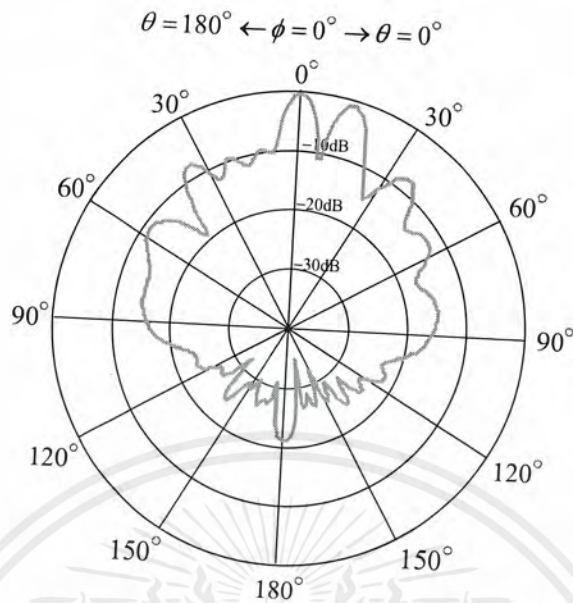
#### 4.4.5 พิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในระนาบสนามไฟฟ้าพิจารณาที่ความถี่ 11.6 GHz ลำคลื่นหลักมีขนาด 14.5 dBi ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 7.9 deg. ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง

รูปที่ 4.10 แสดงสนามแม่เหล็กพิจารณาที่ความถี่ 11.6 GHz ลำคลื่นหลักมีขนาด 14.1. dBi ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 6.4 deg. และมีระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างมีค่าเท่ากับ -7.7 dB



รูปที่ 4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลอง

หลังจากจำลองผลการทำงานจนได้ผลตามต้องการ จะได้สายอากาศต้นแบบจะมีพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.2 และมีคุณลักษณะดังตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.3 คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแกลวลำดับ

คุณลักษณะ	ค่าที่ได้จากการจำลอง
$ S_{11} $ ที่ความถี่ 11.6 GHz	-20.868 dB
อัตราขยาย	14.48 dBi
ช่วงกว้างความถี่	11.42 GHz – 11.807 GHz
การโพลาไรซ์	Linear polarization
ระนาบสนามไฟฟ้า	
- ทิศทางลำคลื่นหลัก	0 deg
- ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	7.9 deg
- ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง	-7.8 dB
ระนาบสนามแม่เหล็ก	
- ทิศทางลำคลื่นหลัก	0 deg
- ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	6.4 deg
- ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง	-7.7 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบ

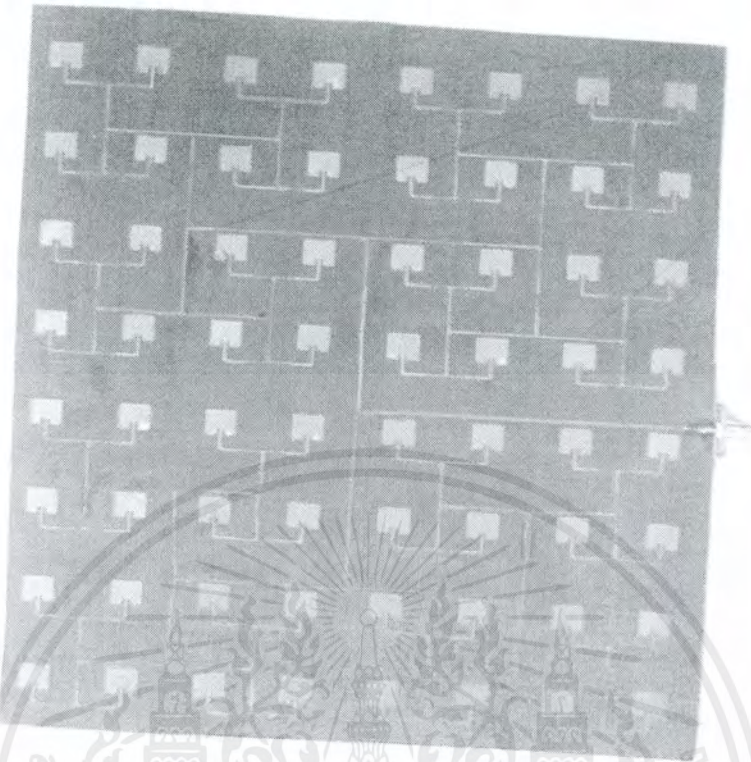
#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศแฉวลำดับใช้ติดตั้งบนยานพาหนะเคลื่อนที่สำหรับรับสัญญาณจากดาวเทียมทำงานในย่านความถี่ KU-BAND มีแบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 11.5 GHz ถึง 11.7 GHz ทำการเปรียบเทียบ  $|S_{11}|$  อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จากที่ทำการจำลอง และค่าที่ได้จากการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบและผลจากการจำลอง

สายอากาศต้นแบบสร้างจากแผ่นพิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองเป็น RT/duriod 5880 ดังรูปที่ 5.1 มีพารามิเตอร์ดังนี้

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศแฉวลำดับ

พารามิเตอร์	ขนาด (mm)
ความกว้างของแผ่นตัวนำ ( $W$ )	9.5
ความยาวของแผ่นตัวนำ ( $L$ )	7.7
ความกว้างของสายนำสัญญาณ ( $W_0$ )	0.92
ความลึกของช่องเปิดสี่เหลี่ยม ( $y_0$ )	2
ความยาวของสายนำสัญญาณ ( $L_f$ )	6.5
ความยาวของ T-Junction	6.466
ความกว้างของ T-Junction	0.707
ความกว้างของระนาบกราวด์ ( $W_G$ )	200
ความยาวของระนาบกราวด์ ( $L_G$ )	200



รูปที่ 5.1 สายอากาศแถวลำดับต้นแบบ

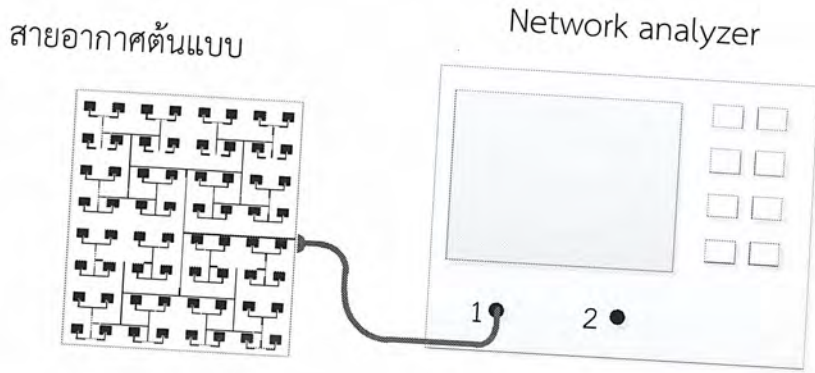
## 5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่อง Network Analyzer รุ่น HP 8720C 50MHz - 20GHz
- 2) ชุดคาร์ิเบรท 85022 B. 3.5 mm
- 3) SMA Connector
- 4) สายอากาศต้นแบบ

## 5.3 การติดตั้งและทดสอบสายอากาศ

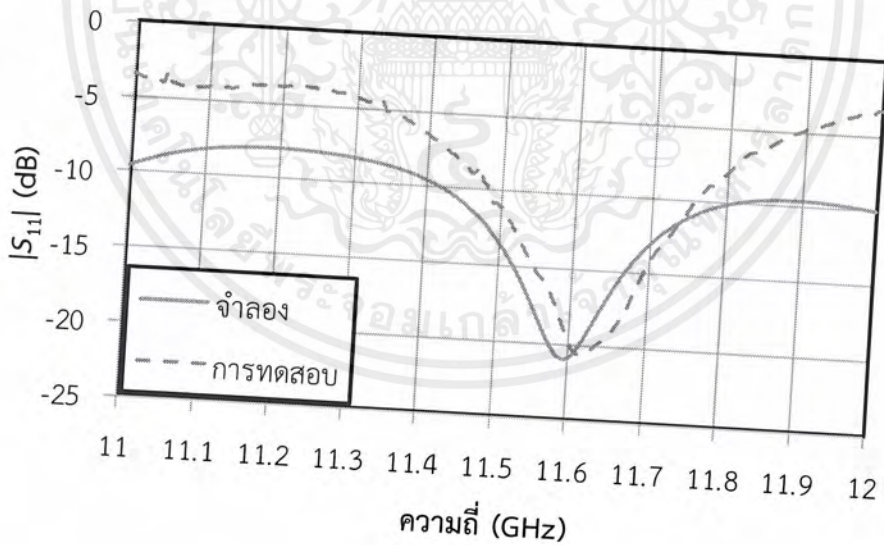
### 5.3.1 การทดสอบหาค่า $|S_{11}|$

ในการทดสอบหาค่า  $|S_{11}|$  อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะต้องใช้เครื่อง Network Analyzer ซึ่งใช้รุ่น HP 8720C 50 MHz – 20 GHz โดยจะติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การติดตั้งอุปกรณ์

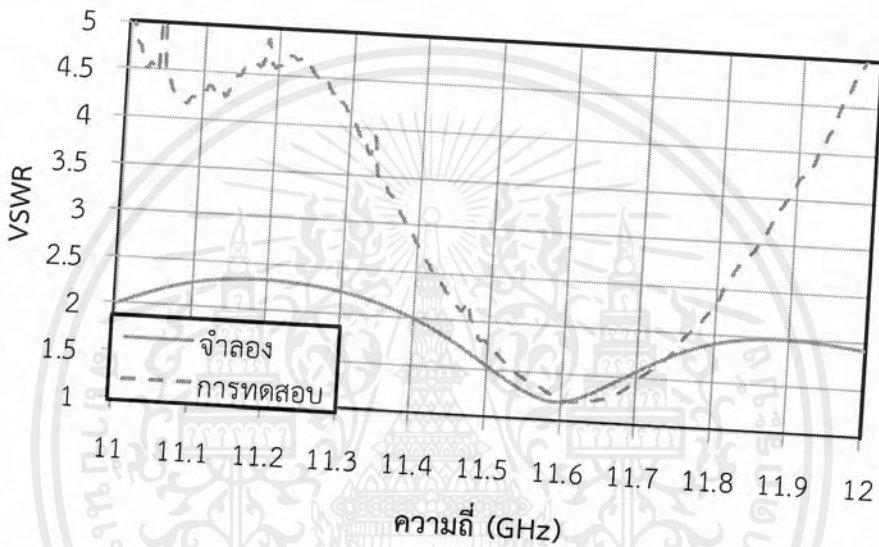
ในการทดสอบหาค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ ค่าความถี่ 11.6 GHz ผลที่ได้มาจากการทดสอบมีค่าเป็น -19.859 dB ที่ โดยสายอากาศที่จะสามารถนำไปใช้งานได้จำเป็นที่จะต้องมียค่า  $|S_{11}|$  ที่ต่ำกว่า -10 dB สายอากาศมีแบนด์วิดท์ 11.485 GHz ถึง 11.755 GHz ซึ่งมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมในการนำไปใช้งานและมีเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์เท่ากับ 0.023% ซึ่งผลจากการทดสอบนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3

รูปที่ 5.3  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

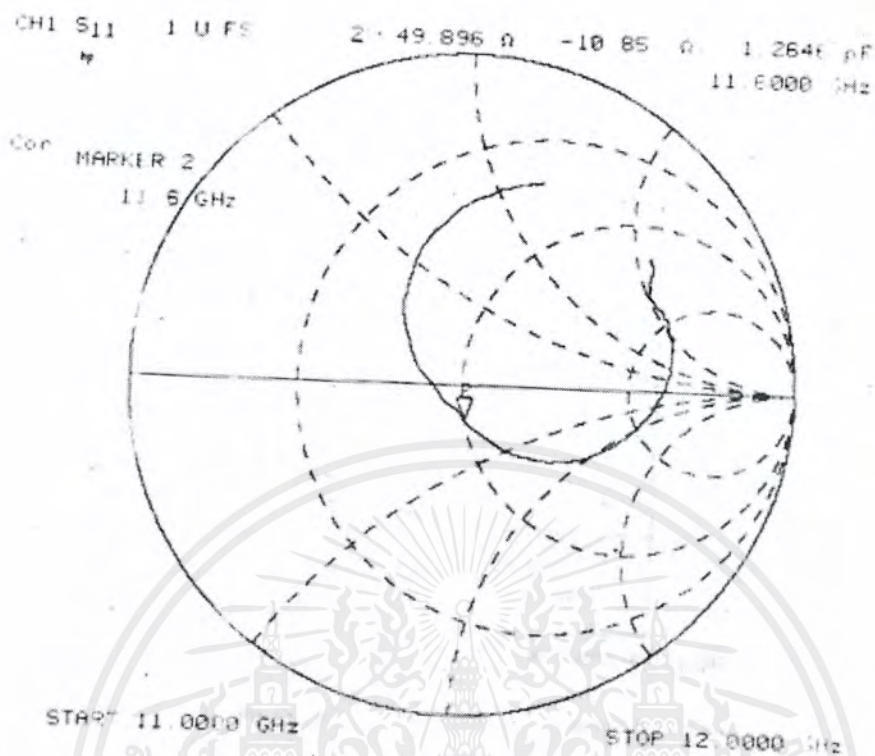
ในการทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศนี้ จะได้ค่าเป็น 1.226 ที่ค่าความถี่ 11.6 GHz โดยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต้องการนี้ จะสามารถนำมาใช้งานได้ก็ต่อเมื่อสายอากาศมีค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่มีค่าต่ำกว่า 2:1 แต่ถ้าจะให้ใช้งานได้ดีกว่าต้องให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต่ำกว่า 1.5:1 ซึ่งในการทดสอบนี้พบว่า ที่ความถี่ดังกล่าวสามารถนำสายอากาศไปใช้งานได้



รูปที่ 5.4 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

### 5.3.3 การทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์

ในการทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป แถวลำดับนี้ สามารถหาได้จากการอ่านค่าในกราฟสมิตชาร์ตที่ได้จากการวิเคราะห์ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP รุ่น 8720C มีค่าเท่ากับ  $49.896-j10.85\Omega$  โดยเป็นการทดสอบที่ความถี่ 11.6 GHz ในความเป็นจริงค่าในส่วนของจำนวนจริงจะต้องมีค่าเท่ากับ  $50\Omega$  หรือมีค่าใกล้เคียง และในส่วนของจำนวนจินตภาพจะต้องมีค่าเป็นศูนย์ เพื่อที่จะได้เข้าใกล้ความเป็นอุดมคติของสายอากาศ โดยค่าอิมพีแดนซ์นี้จะส่งผลต่อการทดสอบค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ



รูปที่ 5.5 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

#### 5.3.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ต้องทดสอบในสถานที่ที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถทำในห้องไร้การสะท้อนที่เป็นห้องสำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยจะทดสอบสายอากาศที่สนามระยะไกล ซึ่งเป็นระยะการแพร่ของสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่ใช้วัดในมุมต่าง ๆ โดยเริ่มจากการคำนวณที่สนามระยะไกลตามสมการที่ 5.1

$$\text{Far-field Distance}(R) \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (5.1)$$

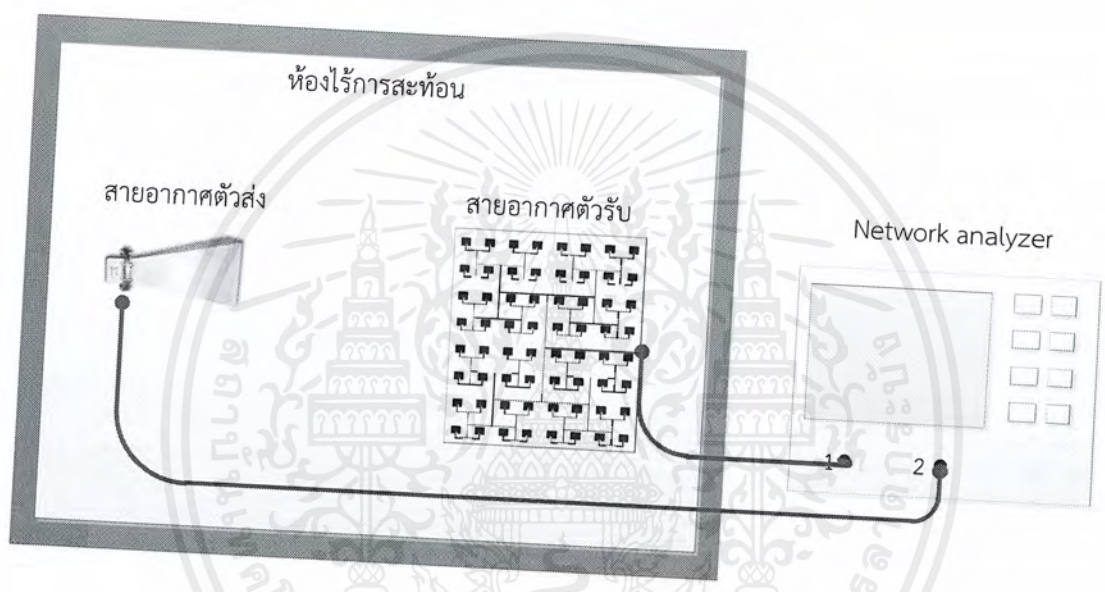
โดยที่

$R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ กับสายอากาศส่ง (m)

$D$  คือ มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ (m)

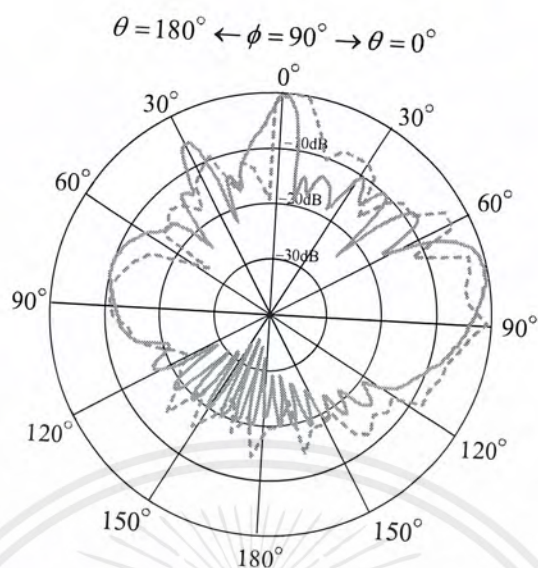
จากการคำนวณระยะที่ใช้ในการทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ความถี่ 11.6 GHz มีสนามระยะไกลอยู่ที่ 5.89 m

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะต้องใช้เครื่อง Network Analyzer ในการวัดกำลังส่งและกำลังรับของสายอากาศที่ถูกติดตั้งอยู่ในห้องไร้การสะท้อน โดยสายอากาศตัวรับและตัวส่งจะวางห่างกันเป็นระยะ 6 m และตั้งสูงจากพื้น 1.67 m จะติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.6

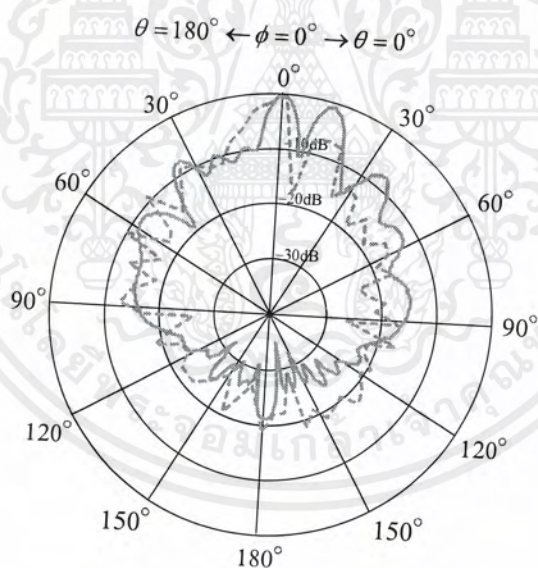


รูปที่ 5.6 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบการส่งผ่านของสายอากาศ

ซึ่งในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะทำการทดสอบสองระนาบด้วยกัน คือ ระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบได้ดังรูปที่ 5.7



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 11.6 GHz

จากรูปที่ 5.7 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ พิจารณาที่ความถี่ 11.6 GHz รูปที่ 5.7 (ก) ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 7. deg. ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-6.76 dB และ รูปที่ 5.7 (ข) ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 9.2. deg. ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง -9.02 dB ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบในทั้งสองระนาบสามารถให้ลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่คล้ายคลึงกับผลที่ได้จากการจำลอง

### 5.3.5 การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ

การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งที่นี่ได้ใช้สายอากาศตัวรับ และตัวส่งเป็นสายอากาศปากแตร(Feed horn antenna) โดยนำมาวางที่ระยะที่ห่างกว่าระยะสนามระยะไกลแล้วใช้เครื่อง วิเคราะห์โครงข่าย ช่วยในการวิเคราะห์และการคำนวณ ซึ่งสัญญาณที่ได้รับนั้นจะมีค่าเท่ากับ  $\frac{P_r}{P_t}$  และค่าในเทอมของ  $\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)$  เป็นค่าของการสูญเสียในอากาศ (Free Space Loss)

และเมื่อทราบค่าอัตราขยายของสายอากาศตัวใดตัวหนึ่ง จะสามารถหาค่าอัตราขยายของสายอากาศอีกตัวหนึ่งได้ โดยสามารถคำนวณได้จาก Friss's formula

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (5.2)$$

เมื่อ  $G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง

$G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ

$P_t$  คือ กำลังงานด้านส่ง

$P_r$  คือ กำลังงานด้านรับ

$R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง สายอากาศรับ ที่มากกว่าหรือเท่ากับบริเวณสนามระยะไกล (m)

เมื่อกำหนดค่าความถี่ที่ใช้งานคือ 11.6 GHz โดยใช้สนามระยะไกลมีค่า 6 m และ  $10 \log \frac{P_r}{P_t} = -54.23$  dB จะสามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศเป็น 13.01 dBi

## 5.4 สรุป

ในการทดสอบสายอากาศไมโครสตริปแกลวลำดับจะเห็นว่าได้ว่าคุณลักษณะที่ทดสอบได้มีแนวโน้มเดียวกันกับคุณลักษณะที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 คุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ 11.6 GHz

คุณลักษณะ	ค่าที่ได้จากการทดสอบสายอากาศแกลวลำดับ
$ S_{11} $ ที่ความถี่ 11.6 GHz	-19.859 dB
อัตราขยาย	13.01 dBi
-ช่วงกว้างความถี่	11.485 GHz ถึง 11.755 GHz
การโพลาไรซ์	Linear polarization
ระนาบสนามไฟฟ้า	
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	7 deg
ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง	-6.76 dB
ระนาบสนามแม่เหล็ก	
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	9.2 deg
ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง	-9.06 dB

## บทที่ 6

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผล

จากการออกแบบวงจรแบ่งกำลังและเชื่อมต่อกับสายอากาศไมโครสตริปต้นแบบ เพื่อสร้างสายอากาศแถวลำดับ 64 องค์ประกอบบนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/duriod 5880 ใช้ติดตั้งบน ยานพาหนะเคลื่อนที่สำหรับรับสัญญาณจากดาวเทียม ซึ่งทำงานในย่านความถี่ KU-BAND มี แบนวิดธ์ตั้งแต่ 11.5 ถึง 11.7 GHz และมีโพลาริซเซชัน ซึ่งรวมถึงการศึกษาคุณสมบัติ และ พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ที่สามารถสรุปผลของการทดสอบได้ดังนี้

อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance) ของสายอากาศ ที่มีคุณสมบัติของการ ดูดซับพลังงานที่ป้อนเข้าสู่สายอากาศ ก่อนที่จะทำการส่งออก ซึ่งค่าที่ได้มาจากการทดสอบของ สายอากาศนี้มีค่าเท่ากับ  $49.896-j10.85\Omega$

ค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศซึ่งเป็นอัตราส่วนของกำลังงานที่สะท้อนกลับต่อกำลังงานที่ ตกกระทบ โดยหาก  $|S_{11}|$  มีค่าน้อย แสดงว่าสายอากาศได้รับกำลังงานไว้ได้มากโดยมี  $|S_{11}|$  ที่ต่ำมาก โดยปกติค่าของ  $|S_{11}|$  ควรจะมีค่าที่ต่ำกว่า  $-10$  dB ซึ่งที่ความถี่กลาง  $11.6$  GHz มีค่า  $|S_{11}|$  เท่ากับ  $-19.859$  dB และมีแบนด์วิดธ์  $11.485$  GHz ถึง  $11.755$  GHz

อัตราส่วนคลื่นนิ่งซึ่งค่าที่ได้มาจากการทดสอบของสายอากาศนี้มีค่าเท่ากับ  $1.226$  แสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อป้อนสัญญาณเข้าไปในสายอากาศจะมีการสะท้อนมากหรือน้อย เพียงใด ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสัญญาณที่ส่งออกด้วย

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและการสร้างสายอากาศ ทำให้พบปัญหาและข้อผิดพลาดในหลาย ประการ ทำให้ทราบถึงแนวทางในแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงมีข้อเสนอเป็นแนวทางในการแก้ไขและ พัฒนาสายอากาศ สามารถสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเลือกใช้วัสดุและเทคนิคการสร้างเป็นส่วนสำคัญประการหนึ่ง เพราะวัสดุแต่ละชนิดมีค่าของความนำไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของวัสดุ ซึ่งการเลือกใช้วัสดุต่างชนิดก็จะส่งผลในการทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันออกไป

- การที่จะทำการสร้างสายอากาศตามที่ได้ออกแบบ จะต้องมีความแม่นยำ แน่นอนทั้งการวัดขนาด การเจาะช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับป้อนสัญญาณ เพราะความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นมีผลกระทบอย่างมากต่อการทดสอบ

- การเลือกชนิดของ SMA connector และติดตั้ง SMA connector เข้ากับสายอากาศก็ เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้คุณลักษณะของสายอากาศเปลี่ยนไป ดังนั้นจึงควรเลือก SMA connector ที่สามารถรองรับความถี่ที่ใช้งานได้ และบัดกรีด้วยความรวดเร็วเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากความร้อนของหัวแร้ง



## บรรณานุกรม

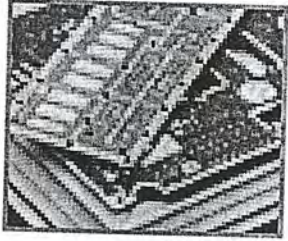
- [1] Balanis, C.A. *Antenna Theory*. 3<sup>rd</sup> ed. Hoboken, NJ : John Wiley&Sons, 2005.
- [2] โมไนย ไกรฤกษ์. *ทฤษฎีสายอากาศ*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2537.
- [3] Pozar, D.M. *Microwave Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. (n.p.): John Wiley&Sons, 2005
- [4] Edwards, T.C. and Steer, M.B. *Foundations of Interconnect and Microstrip Design*. 3<sup>rd</sup> ed. West Sussex: John Wiley&Sons, 2000.
- [5] Adel A. A. Abdel-Raheem and Ehab K. I. Hamad . *Design of Compact-efficient Array of Patch Antenna Based on Metamaterial T-Junction* . Cairo. IEEE APS, Middle East Conference on Antennas and Propagation, 2010
- [6] Visser, H.J. *Array and Phased Array Antenna Basics*. Wiltshire: John Wiley&Sons.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



High Frequency  
Circuit Materials

**Rogers Corporation**  
**Microwave Materials Division**  
100 S. Roosevelt Avenue  
Chandler, AZ 85226 U.S.A.  
Tel: 480 961-1382  
Fax: 480 961-4533  
Website: [http://www.rogers-corp.com/mwu/](http://www.rogers-corp.com/mwu/litmwu@rogers-corp.com)  
litmwu@rogers-corp.com

DATA  
RT1.5880

## RT/duroid® 5880

Glass Microfiber Reinforced  
Polytetrafluoroethylene Composite

RT/duroid® 5880 glass microfiber reinforced PTFE composite is designed for exacting stripline and microstrip circuit applications.

Glass reinforcing microfibers are randomly oriented to maximize benefits of fiber reinforcement in the directions most valuable to circuit producers and in the final circuit application.

The dielectric constant of RT/duroid 5880 laminates is uniform from panel to panel and is constant over a wide frequency range. Its low dissipation factor extends the usefulness of RT/duroid 5880 to Ku-band and above.

RT/duroid 5880 laminate is easily cut, sheared and machined to shape. It has excellent dimensional stability and is resistant to all solvents and reagents, hot or cold, normally used in etching printed circuits or in plating edges and holes.

Normally supplied as a laminate with electrodeposited copper of 1/4 to 2 ounces/ft.<sup>2</sup> on both sides, RT/duroid 5880 composites can also be clad with rolled copper foil for more critical electrical applications. Cladding with aluminum, copper or brass plate may also be specified.

When ordering RT/duroid 5880 laminates, it is important to specify dielectric thickness, tolerance, rolled or electrodeposited copper foil, and weight of copper foil required.

(See reverse for product data)

**ROGERS**  
SINCE 1832

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**RT/duroid 5880 Properties:**

PROPERTY	TYPICAL VALUE			DIRECTION	UNITS	CONDITION	TEST METHOD
Dielectric Constant, $\epsilon_r$	2.20 2.20 $\pm$ 0.02 spec.			Z	---	C24/23/50 C24/23/50	1 MHz PC-TM-650 2.5.5.3 10 GHz IPC-TM-650 2.5.5.5
Dissipation Factor, $\tan \delta$	0.0004 0.0009			Z	---	C24/23/50 C24/23/50	1 MHz IPC-TM-650 2.5.5.3 10 GHz IPC-TM-650 2.5.5.5
Volume Resistivity	$2 \times 10^7$			Z	Mohm cm	C93/35/90	ASTM D257
Surface Resistivity	$3 \times 10^8$			Z	Mohm	C93/35/90	ASTM D257
Tensile Modulus	Test at 23 C	Test at 100 C		X Y	MPa (kpsi)	A	ASTM D638
	1070 (156) 860 (125)	450 (65) 380 (55)					
ultimate stress	29 (4.2) 27 (3.9)	20 (2.9) 18 (2.6)		X Y	MPa (kpsi)		
ultimate strain	6.0 4.9	7.2 5.8		X Y	%		
Compressive Modulus	710 (103) 710 (103) 940 (136)	500 (73) 500 (73) 670 (97)		X Y Z	MPa (kpsi)	A	ASTM D695
	ultimate stress	27(3.9) 52 (7.5)	22 (3.2) 21 (3.1) 43 (6.3)		X Y Z	MPa (kpsi)	
ultimate strain	8.5 7.7 12.5	8.4 7.8 17.6		X Y Z	%		
Deformation Under Load	Test at 150 C 1.0			Z	%	24 hr/14 MPa (2kpsi)	ASTM D621
Water Absorption Thickness = 0.8 mm (0.031) Thickness = 1.6 mm (0.062)	0.9 (0.02) 13 (0.015)				mg (%)	D24/23	ASTM D570
Specific Gravity	2.2						
Heat Distortion Temperature	>260 (>500)			X,Y	C ( F)	1.82 MPa (264 psi)	ASTM D792
Specific Heat	0.96 (0.23)				J/g/K (BTU/lb/ F)		ASTM D648
Thermal Conductivity	0.20			Z	W/m/K		Calculated
Thermal Expansion	X	Y	Z	<<<	mm/m	-100 C	ASTM D3386 (10K/min)
	-6.1	-8.7	-18.7				
	-0.9	-1.8	-6.9				
	-0.5	-0.9	-4.5				
	1.1	1.5	8.7				
	2.3	3.2	28.3				
	3.8	5.5	69.5				

[1] SI unit given first with other frequently used units in parentheses.  
 [2] References: Internal TR's 1430, 2224, 2854. Test were at 23°C unless otherwise noted.  
 Typical values should not be used for specification limits.

RT/duroid® and DUROID® are licensed trademarks of ROGERS Corporation for its microwave laminates.

The above data represents typical values, not statistical minimums. It is not intended to and does not create any warranties, express or implied, including any warranty of merchantability or fitness for a particular purpose. The relative merits of materials for a specific application should be determined by your evaluation.

These products may require a validated export license issued by the United States Department of Commerce for export of these materials from the United States or Canada.

**ROGERS**  
SINCE 1832

Rogers Corporation  
 Microwave Materials Division  
 100 S. Roosevelt  
 Chandler, AZ 85226-3415 U.S.A.  
 Tel: 480 961-1382  
 FAX: 480 961-4533  
 Toll Free: 877 643-7701  
 Website: <http://www.rogers-corp.com/mwu/>  
 ISO 9002 CERTIFIED

©1991, 1994, 1995, 1999 Rogers Corporation

Printed in U.S.A.

Revised 2/99 2258-029-10.0-0N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้