

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบ และสร้างสายอากาศแถบกว้างสำหรับ วิทยุแถบกว้างยิ่ง  
A DESIGN AND FABRICATION BROADBAND ANTENNA FOR ULTRA –  
WIDEBAND RADIO



นาย ปกรณ์ เปรมสมบัติ  
นาย พงศ์กฤษ อยู่ประจำ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 62639  
วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ค. 2549

b..... 11622414
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A DESIGN AND FABRICATION BROADBAND ANTENNA FOR ULTRA –  
WIDEBAND RADIO**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHERLOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING  
FACULY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อปริญญาบัตร** การออกแบบ และสร้างสายอากาศแถบกว้างสำหรับ วิทยูแถบกว้างยิ่ง

**รหัสนักศึกษา** นาย ปกรณ์ เปรมสมบัติ รหัสนักศึกษา 46015669  
นาย พงศ์กฤช อยู่ประจำ รหัสนักศึกษา 46015672


**อาจารย์ที่ปรึกษา** อ. สถาพร พรหมวงศ์  
อ. สมภพ แก้วมีชัย

**ระดับการศึกษา** ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

**ภาควิชา** วิศวกรรมศาสตร์

**ปีการศึกษา** 2548

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
นับปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

  
(อาจารย์ สถาพร พรหมวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

  
(อาจารย์ สมภพ แก้วมีชัย)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลิขสิทธิ์ของ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>หัวข้อปริญญานิพนธ์</b>	การออกแบบ และสร้างสายอากาศแถบกว้าง สำหรับวิทยุแถบกว้างยิ่ง		
<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นาย ปกรณ์ เปรมสมบัติ	รหัสนักศึกษา	46015669
	นาย พงศ์กฤษ อยู่ประจำ	รหัสนักศึกษา	46015672
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	อ. สถาพร พรหมวงษ์		
	อ. สมภพ แก้วมีชัย		
<b>ระดับการศึกษา</b>	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
	สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ		
<b>ภาควิชา</b>	วิศวกรรมศาสตร์		
<b>ปีการศึกษา</b>	2548		

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษา ออกแบบ และสร้าง สายอากาศแถบกว้าง สำหรับวิทยุแถบกว้าง ยิ่งในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึง 11 GHz ซึ่งในการออกแบบได้ใช้วิธีการคำนวณตามหลักทฤษฎี และได้สร้างบนวัสดุที่หาได้ตามท้องตลาด ซึ่งสายอากาศที่จะได้จัดทำในโครงการนี้จะได้แก่ สายอากาศจานกรวย (Discone Antenna) สายอากาศกรวยคู่ (Biconical Antenna) และสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Antenna) นอกจากนี้แล้วยังได้ทำการวัดและทดสอบ คุณสมบัติของ สายอากาศแถบกว้างสำหรับวิทยุแถบกว้างยิ่ง ที่ได้สร้างขึ้นแต่ละชนิดด้วย ผลที่ได้จากการทดสอบ จะแสดงไว้อย่างละเอียดในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	A design and fabrication broadband antenna for Ultra - Wideband radio		
<b>Student</b>	Mr. Pokrat	Premsoambut	ID 46015669
	Mr. Phongkrit	Yupracham	ID 46015672
<b>Advisor</b>	Mr. Sathaporn	Promwong	
	Mr. Sompob	Keawmechai	
<b>Graduate Level</b>	Bachelor Degree of Information Engineering		
<b>Department</b>	Information Engineering		
<b>Academic</b>	2005		

### Abstract

This project is a study, design and fabrication broadband antenna for Ultra - Wideband radio from 3 GHz to 11 GHz. Which designing will use calculating from theory and fabrication on material easy to find. In this project antennas namely to create

- Discone Antenna
- Biconical Antenna
- Trapezoidal Antenna

Except analysis to find frequency and side of antenna each type in order to find efficiency broadband antenna for Ultra - Wideband radio to be suitable for use this project.

## กิตติกรรมประกาศ

ในการสร้างโครงการนี้ทางผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือให้คำปรึกษาแนวทางในการดำเนินงานต่าง ๆ และได้รับความดูแลเสมอมาจากท่าน อ.สถาพร พรหมวงศ์, อ.สมภพ แก้วมีชัย, อ.พิชญ์ สุพรรณกุล รวมถึงอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สารสนเทศที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำเกี่ยวกับรายละเอียดของโครงการจนกระทั่งสำเร็จเป็นโครงการนี้ขึ้นมา ทีมผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ให้ความกรุณามา ณ. ที่นี้

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งให้การสนับสนุนทางการเงินและ กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำจนสำเร็จการศึกษา

ผู้จัดทำ

นาย ปกรณ์ เปรมสมบัติ

นาย พงศ์กฤษ อยู่ประจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
<b>บทคัดย่อ(ภาษาไทย)</b>	ก
<b>บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)</b>	ข
<b>กิตติกรรมประกาศ</b>	ค
<b>สารบัญ</b>	ง
<b>สารบัญรูปภาพ</b>	ช
<b>สารบัญตาราง</b>	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 แนวคิดและที่มาของโครงการ	1
1.2 จุดประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	2
<b>บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎี</b>	
2.1 ทฤษฎีสายอากาศ และพื้นฐานพารามิเตอร์	3
2.1.1 คลื่น TEM และ โพลาริเซชัน	3
2.1.2 การกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศ	4
2.1.3 สายอากาศไดโพล	6
2.1.4 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	7
2.1.4.1 รูปแบบการแพร่กระจายแบบไอโซโทรปิก	
ไดเรคชันแนลและออมนิไดเรคชันแนล	10
2.1.4.2 รูปแบบการแพร่กระจายหลัก	11
2.1.4.3 โลบของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น	12
2.1.4.4 บริเวณต่าง ๆ ของสายอากาศ	14
2.1.5 บีมวิดธ์ของสายอากาศ	15
2.1.5.1 วิธีหาค่าบีมวิดธ์สายอากาศ	15
2.1.6 ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น	16
2.1.7 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.8 ไคเรคตีวิตี	18
2.1.9 กำลังขยายของสายอากาศ และ ERP	19
2.1.10 อัตราขยาย	22
2.1.11 คลื่นนิ่ง (Standing Wave)	23
2.1.11.1 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR)	24
2.1.11.2 S-พารามิเตอร์	24
2.1.12 แบนด์วิดท์ของสายอากาศ	25
2.2 สายอากาศกรวยคู่ (Biconical Antenna)	26
2.2.1 สายอากาศกรวยคู่แบบไม่จำกัด (Infinite biconical antenna)	26
2.2.2 สายอากาศกรวยคู่แบบจำกัด (Finite biconical antenna)	30
2.3 สายอากาศแบบจานกรวย (Discone Antenna)	31
2.4 สายอากาศ Bow – tie (Bow – tie Antennas)	34
2.5 สายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Antenna)	35
2.5.1 ลักษณะของสายอากาศ สี่เหลี่ยมคางหมู	36
2.6 การใช้งานสายโคแอกเชียล (Coaxial)	37
2.7 เทคโนโลยีอุลตราไวด์แบนด์	39
2.7.1 คุณสมบัติของอุลตราไวด์แบนด์	41
2.7.2 การนำไปใช้งานของระบบสื่อสารอุลตราไวด์แบนด์	41
<b>บทที่ 3 การออกแบบและสร้างสายอากาศแถบกว้างยิ่ง</b>	
3.1 สายอากาศกรวยคู่	43
3.1.1 การกำหนดช่วงความถี่ที่ใช้งาน	43
3.1.2 การกำหนดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่	43
3.1.3 คำนวณหาความยาวคลื่น	43
3.1.4 คำนวณหาความสูงของกรวยของสายอากาศกรวยคู่	44
3.1.5 กระบวนการสร้างสายอากาศกรวยคู่	45
3.1.5.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์	45
3.1.5.2 การทำแม่พิมพ์สายอากาศ	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

## หน้า

3.1.5.3 การสร้างสายอากาศกรวยคู่	46
3.2 การออกแบบสายอากาศแบบจานกรวย	48
3.2.1 การกำหนดช่วงความถี่ที่ใช้งาน	48
3.2.2 การกำหนดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบจานกรวย	48
3.2.3 การคำนวณหาขนาดของสายอากาศแบบจานกรวย	48
3.2.4 กระบวนการสร้างสายอากาศแบบจานกรวย	50
3.2.4.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์	50
3.2.4.2 การสร้างสายอากาศแบบจานกรวย	50
3.3 การออกแบบสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	51
3.3.1 การกำหนดช่วงความถี่ใช้งาน	51
3.3.2 การกำหนดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	51
3.3.3 การคำนวณหาความยาวคลื่น	51
3.3.4 คำนวณความกว้างของฟีดสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	52
3.3.5 กระบวนการสร้างสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	53
3.3.5.1 จัดเตรียมอุปกรณ์	53
3.3.5.2 การสร้างสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	53

## บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง

4.1 การวัดคุณสมบัติสายอากาศ	56
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	56
4.1.2 ขั้นตอนการวัด	57
4.2 ค่าคุณสมบัติของสายอากาศแถบกว้างที่ทำการออกแบบ	57
4.2.1 สายอากาศกรวยคู่	57
4.2.2 สายอากาศแบบจานกรวย	59
4.2.3 สายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	62
4.3 การวัดฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศ (Antenna Transfer Function) และการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	65
4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	65
4.3.2 บุลล็อกไดอะแกรมในการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.3 ขั้นตอนการทดลอง	67
4.3.4 ผลการทดลองการวัดฟังก์ชันการส่งผ่าน และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถบกว้างที่ได้ทำการออกแบบ	67
4.3.4.1 ค่าจากการวัดฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบโดยภาครับ และภาคส่งเป็นสายอากาศชนิดเดียวกัน	68
4.3.4.2 ค่าจากการวัดฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ โดยภาครับ และภาคส่งเป็นสายอากาศต่างชนิดกัน	71
4.3.4.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ	73
<b>บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง</b>	
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง	75
5.2 ปัญหาที่พบในระหว่างการดำเนินโครงการ และแนวทางในการแก้ปัญหา	76
5.3 สรุปผลการทดลอง	76
<b>บรรณานุกรม</b>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 คลื่น TEM	3
รูปที่ 2.2 การกระจายของคลื่นไฟฟ้าจากสายอากาศ	5
รูปที่ 2.3 สายอากาศไดโพล	6
รูปที่ 2.4 (ก) รูปแบบการกระจายของกระแสบนสายอากาศไดโพล	7
รูปที่ 2.4 (ข) รูปแบบการกระจายของโวลเตจบนสายอากาศไดโพล	7
รูปที่ 2.5 แพทเทอร์นการกระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล	8
รูปที่ 2.6 ระบบโคออดิเนตสำหรับวิเคราะห์สายอากาศ	9
รูปที่ 2.7 รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna pattern)	10
รูปที่ 2.8 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศอิมปีแดนซ์เนล	11
รูปที่ 2.9 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร	12
รูปที่ 2.10 (ก) โลบต่าง ๆ และมีมิตซ์ของรูปแบบการแพร่กระจายสายอากาศ	13
รูปที่ 2.10 (ข) รูปแบบการแพร่กระจายในแบบลิเนียร์	13
รูปที่ 2.11 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	14
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการหาค่าบีมวิทซ์จากแพทเทอร์นสายอากาศ	15
รูปที่ 2.13 แพทเทอร์นการกระจายคลื่นของสายอากาศ ชนิดที่มีทิศทาง และชนิดที่ไม่มีทิศทาง	20
รูปที่ 2.15 สายอากาศกรวยแบบไม่จำกัด แสดงส่วนประกอบของพื้นผิว และกระแส (I)	27
รูปที่ 2.16 รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศกรวยแบบไม่จำกัด	28
รูปที่ 2.17 สายอากาศกรวยแบบจำกัด	30
รูปที่ 2.18 สายอากาศแบบจานกรวย (Discone Antenna)	32
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างขนาดของสายอากาศแบบจานกรวย	32
รูปที่ 2.20 แพทเทอร์นการวัดของสายอากาศแบบจานกรวย	34
รูปที่ 2.21 สายอากาศ Bow-tie แบบแผ่น (ก) และสายอากาศไดโพล โครงสร้างกรวยแบบสายเปิด (ข)	35
รูปที่ 2.22 (ก) สายแบบสามารถงอได้ (Flexible), (ข) แบบกึ่งแข็ง (Semirigid) และ (ค) แบบแข็ง (Rigid)	38
รูปที่ 2.23 เปรียบเทียบแบนด์วิทซ์ของอูตร้าไวด์แบนด์กับคลื่นชนิดอื่น	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ความยาวแต่ละด้านของรูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่มี $30^\circ$ , $60^\circ$ และ $90^\circ$	44
รูปที่ 3.2 ลักษณะของกรวยที่ออกแบบ	45
รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์สายอากาศไป โคนิคอน	46
รูปที่ 3.4 สาย Semi-rigid	46
รูปที่ 3.5 สายอากาศกรวยคู่ที่ทำการออกแบบ	47
รูปที่ 3.6 สายอากาศ กรวยคู่ที่ทำเสร็จแล้ว	47
รูปที่ 3.7 แบบสายอากาศแบบจานกรวย	49
รูปที่ 3.8 สายอากาศแบบจานกรวยที่ทำเสร็จแล้ว	51
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ความยาวแต่ละด้านของสามเหลี่ยมมุมฉาก	52
รูปที่ 3.12 รูปสามเหลี่ยมที่จะมาทำตัวพีคของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	53
รูปที่ 3.13 รูปของตัวพีคของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	54
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างของส่วนระนาบสร้างเงาของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	54
รูปที่ 3.15 สายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูที่ทำเสร็จแล้ว	55
รูปที่ 4.1 เครื่องวัดคุณสมบัติของสายอากาศ	56
รูปที่ 4.2 ค่า $S_{11}$ ของสายอากาศกรวยคู่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 67.5 มม.	57
รูปที่ 4.3 ค่า SWR ของสายกรวยคู่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 67.5 มม.	58
รูปที่ 4.4 ค่าเฟสของสายอากาศกรวยคู่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 67.5 มม.	58
รูปที่ 4.5 ค่า $S_{11}$ ของสายอากาศแบบจานกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย 67.5 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจาน 67.5 มม.	59
รูปที่ 4.6 ค่า SWR ของสายอากาศแบบจานกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย 67.5 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจาน 67.5 มม.	59
รูปที่ 4.7 ค่าเฟสของสายอากาศแบบจานกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย 67.5 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจาน 67.5 มม.	60
รูปที่ 4.8 ค่า $S_{11}$ ของสายอากาศแบบจานกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย 67.5 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจาน 110 มม.	60
รูปที่ 4.9 ค่า SWR ของสายอากาศแบบจานกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย 67.5 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจาน 110 มม.	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 ค่าเฟสของสายอากาศแบบจานกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย 67.5 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจาน 110 มม.	61
รูปที่ 4.11 ค่า $S_{11}$ ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูมุมพีค 90 องศา	62
รูปที่ 4.12 ค่า SWR ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูมุมพีค 90 องศา	62
รูปที่ 4.13 ค่าเฟสของของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูมุมพีค 90 องศา	63
รูปที่ 4.14 ค่า $S_{11}$ ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูมุมพีค 88 องศา	63
รูปที่ 4.15 ค่า SWR ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูมุมพีค 88 องศา	64
รูปที่ 4.16 ค่าเฟสของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูมุมพีค 88 องศา	64
รูปที่ 4.17 ภาพจำลองขณะวัดสัญญาณ	65
รูปที่ 4.18 บล็อกไดอะแกรมแสดงรูปแบบการติดตั้งสายอากาศส่ง และรับ	66
รูปที่ 4.19 ค่า Magnitude ของสายอากาศกรวยคู่	68
รูปที่ 4.20 ค่า Phase ของสายอากาศกรวยคู่	68
รูปที่ 4.21 ค่า Magnitude ของสายอากาศแบบจานกรวย	69
รูปที่ 4.22 ค่า Phase ของสายอากาศแบบจานกรวย	69
รูปที่ 4.23 ค่า Magnitude ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	70
รูปที่ 4.24 ค่า Phase ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	70
รูปที่ 4.25 ค่า Magnitude ของสายอากาศแบบจานกรวยในภาคส่ง และสายอากาศกรวยคู่ในภาครับ	71
รูปที่ 4.26 ค่า Phase ของสายอากาศแบบจานกรวยในภาคส่ง และสายอากาศกรวยคู่ในภาครับ	71
รูปที่ 4.27 ค่า Magnitude ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูในภาคส่ง และสายอากาศกรวยคู่ในภาครับ	72
รูปที่ 4.28 ค่า Phase ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูในภาคส่ง และสายอากาศกรวยคู่ในภาครับ	72
รูปที่ 4.29 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรวยคู่	73
รูปที่ 4.30 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบจานกรวย	73
รูปที่ 4.31 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 ตารางแสดงการลดทอนกำลังไฟฟ้าของสายโคแอกเซียลชนิดต่าง ๆ	39
ตาราง 5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแถบกว้างยิ่ง ที่ได้ทำการทดลอง	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 แนวคิดและที่มาของโครงการ

ปัจจุบันความต้องการในการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งานเริ่มมีสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมต่อเครือข่ายภายในอาคารสำนักงาน หรือการเชื่อมต่อเครือข่ายเพื่อความบันเทิงภายในแหล่งที่พักอาศัย โดยมีเทคโนโลยีไร้สายที่นิยมใช้เพื่อการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังกล่าว อาทิเช่น Wi-Fi, บลูทูธ (Bluetooth) ไปจนถึงเทคโนโลยีคลื่นสั้น (Short-length) อย่างไรก็ดี ปัจจุบันได้เกิดกระแสความสนใจในวงกว้างเกี่ยวกับเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra Wide Band) ซึ่งเป็นคลื่นที่ให้ความหนาแน่นกำลังในการส่งต่ำมีแบนด์วิดท์กว้างมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้คลื่นอัลตราไวด์แบนด์มีความจุในการรับส่งข้อมูล และรวดเร็วขึ้นยิ่งขึ้น ด้วยคุณสมบัติที่กล่าวมานี้ จึงทำให้เห็นได้ถึงความสามารถที่เหนือกว่าเทคโนโลยีเดิมอย่าง Wi-Fi หรือ Bluetooth ได้ชัดเจน ซึ่งอาจคาดได้ว่าเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์นี้จะเข้ามาเปลี่ยนแปลงระบบการสื่อสารข้อมูลครั้งใหญ่ในอนาคตเสียทีได้

เนื่องด้วยคุณสมบัติของคลื่นอัลตราไวด์แบนด์ดังที่ได้กล่าวไปในข้างต้น จึงมีความเป็นไปได้สูงที่ในอนาคตอันใกล้ อาจจะมีการนำเอาเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์เข้ามาใช้กับระบบสื่อสารไร้สายระยะสั้นภายในประเทศก็เป็นได้ ดังนั้นจึงเป็นการดีที่จะได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติ และประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลข่าวสารด้วยความเร็วสูงนี้ โดยในส่วนของโครงการจะได้ทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างสายอากาศแถบกว้าง (Broadband Antenna) เพื่อทำการวัด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศแถบกว้างชนิดต่างๆ ที่ใช้ในเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ด้วย

### 1.2 จุดประสงค์

1. ศึกษาระบบบรอดแบนด์ (Broadband) และเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ เพื่อนำมาใช้ในการรับส่งข้อมูลข่าวสารในอนาคต
2. ศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศแถบกว้าง แต่ละชนิดที่ได้จัดทำขึ้นในโครงการนี้

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

ออกแบบ และสร้างสายอากาศแถบกว้าง สำหรับวิทยุแถบกว้างยิ่ง แล้วนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแต่ละชนิดที่ได้ออกแบบ และสร้างขึ้น

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถออกแบบ และสร้างสายอากาศแถบกว้าง ที่จะนำมาใช้ในระบบไร้สายระยะสั้นในอนาคคอันใกล้ และเพื่อให้รู้ถึงประสิทธิภาพของระบบอุลตราไวด์แบนด์ อีกด้วย

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

ในการทำปฏิญานิพนธ์เล่มนี้ได้มีการศึกษาวางแผนการทำงานตามขั้นตอนดังนี้

- ศึกษาทฤษฎีของสายอากาศแบบจานกรวย (Discone antenna), สายอากาศกรวยคู่ (Biconical antenna) และสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Antenna) และทฤษฎีสายอากาศที่เกี่ยวข้อง

- ออกแบบและสร้างสายอากาศทั้ง 3 แบบจากการคำนวณตามทฤษฎี
- วัดค่า S - พารามิเตอร์, VSWR, เฟส, ฟังก์ชันการส่งผ่าน และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศแถบกว้างที่ได้จัดทำขึ้น
- ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติจากค่าที่วัดได้ของสายอากาศทั้ง 3 แบบ เพื่อทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

การศึกษาทฤษฎีจะอยู่ในบทที่ 2 ซึ่งกล่าวถึงทฤษฎี และพื้นฐานความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับสายอากาศเพื่อใช้ประกอบในการทำปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงเทคโนโลยีอุลตราไวด์แบนด์ และทฤษฎีพื้นฐานสายอากาศแบบจานกรวย, สายอากาศกรวยคู่ และสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

การออกแบบและการสร้างจะอยู่ในบทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบ และขั้นตอนการทำสายอากาศแบบจานกรวย, สายอากาศกรวยคู่ และสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

การวัดคุณสมบัติจะอยู่ในบทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการวัด และผลการวัดคุณสมบัติของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ และสร้างขึ้นทั้งหมด

การวิเคราะห์และสรุปจะอยู่ในบทที่ 5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัด และสรุปผลของ การวัดคุณสมบัติของสายอากาศแถบกว้างทั้งหมดที่ได้จัดทำขึ้นในโครงการชุดนี้

## บทที่ 2

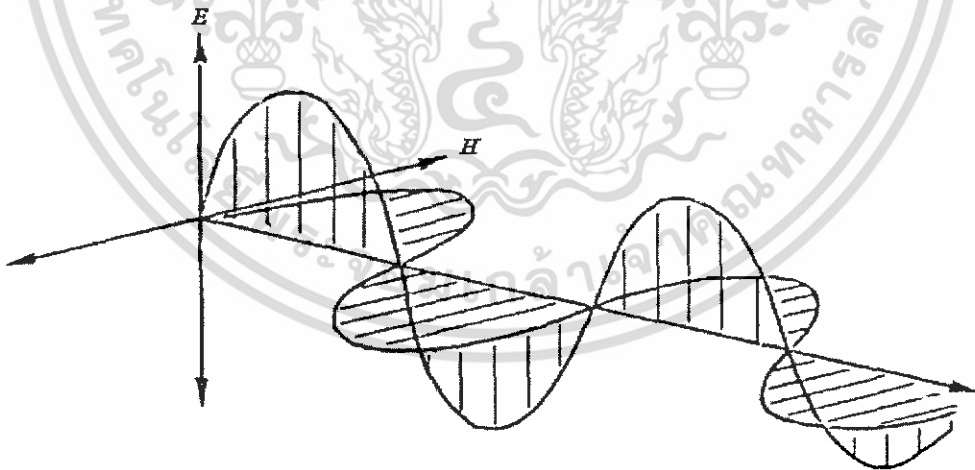
### หลักการ และทฤษฎี

#### 2.1 ทฤษฎีสายอากาศ และพื้นฐานพารามิเตอร์

สายอากาศเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการสื่อสารในระบบวิทยุ สายอากาศใช้เพื่อกระจายคลื่นวิทยุออกจากตัวมันทางด้านเครื่องส่ง และใช้ดักจับเอาคลื่นวิทยุเข้าสู่ตัวมันทางด้านรับ ในส่วนของปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงหลักการและความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสายอากาศ รวมถึงหลักการและทฤษฎีต่าง ๆ ของสายอากาศที่เกี่ยวข้องกับโครงงานนี้ไว้ด้วย

##### 2.1.1 คลื่น TEM และ โทอาไรเซนซ์

การกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศนั้น สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำในลักษณะตั้งฉากซึ่งกันและกันออกไปเป็นลำดับ นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของคลื่นนั้นจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศของสนามทั้งสองนั้น คลื่นที่เกิดมาในลักษณะเช่นนี้มีชื่อเรียกว่าคลื่น TEM (Transverse Electromagnetic Wave) สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะเกิดกันไปเสมอ จะมีเพียงอย่างเดียวหนึ่งตามลำพังมิได้



รูปที่ 2.1 คลื่น TEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

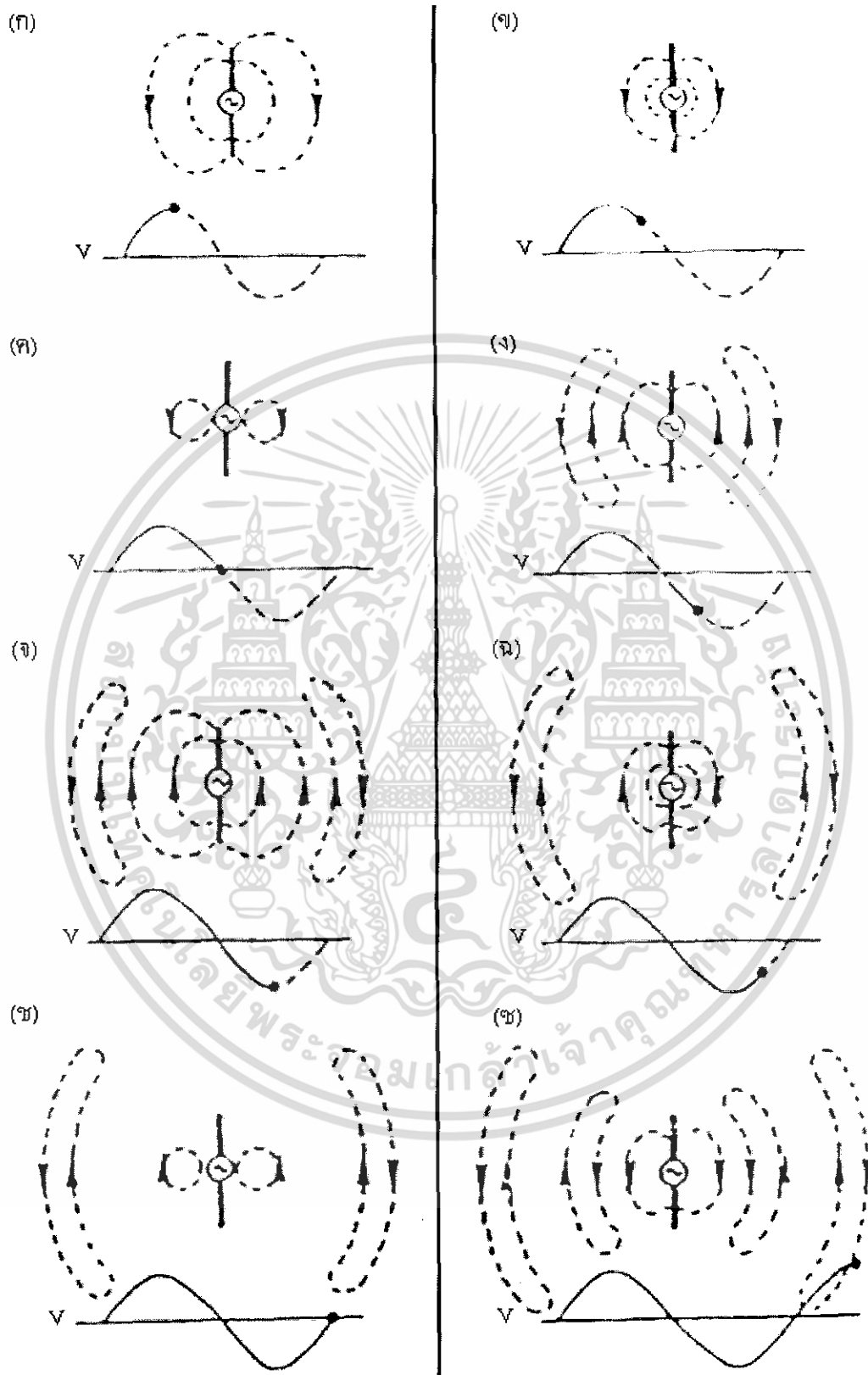
ระนาบคลื่น (Wave Plane) ที่เกิดขึ้น เมื่ออ้างอิงเปรียบเทียบกับระนาบของผิวโลกมีชื่อว่า โพลาริซเซชัน (Polarization) ของคลื่นนั้น โพลาริซเซชัน ของคลื่น TEM จะกำหนดโดยระนาบของสนามไฟฟ้าซึ่งกระจายออกไป นั้นแสดงว่าคลื่น TEM มีโพลาริซเซชันในแนวตั้ง (Vertical Polarization) ให้สังเกตว่าโพลาริซเซชันนี้จะเป็นตัวอ้างอิงถึงระนาบของสายอากาศด้วย

### 2.1.2 การกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศ

เพื่อให้สามารถมองเห็นภาพการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ให้ลองนึกถึงเวลาที่เรากำลังยืนยืนในสระน้ำ ซึ่งจะเกิดคลื่นกระจายออกไปรอบ ๆ โดยที่ภาพตัดขวางคลื่นนั้น สามารถใช้เปรียบเทียบได้กับการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศนั่นเอง

สนามเหนี่ยวนำ (Induction Field) จะเกิดขึ้นเมื่อมีการไหลของกระแสเข้าไปในสายอากาศ โดยปฏิกิริยาตามธรรมชาติ เช่นเดียวกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเฉพาะในขั้นตอนนี้จะไม่มีกระแสไฟฟ้าพลังงานออกไปจากสายแต่อย่างใด สนามเหนี่ยวนำนี้จะเป็นตัวทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่รังสีออกไป ตามขั้นตอนซึ่งอธิบายได้ดังรูป 2.2

เพื่อความสะดวกในการอธิบาย จะขอใช้รูป 2.2 ประกอบการอธิบายให้เห็นถึงขั้นตอนการกระจายของคลื่นไฟฟ้าแต่เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เพราะการกระจายของคลื่นแม่เหล็กจะมีทิศทางตั้งฉากกับคลื่นไฟฟ้าเสมอ จึงขอละเอาสนามแม่เหล็กไว้ในฐานะที่เข้าใจ ตามรูปที่ 2.2 (ก) เมื่อโวลเตจที่เกิดบนสายอากาศมีค่าสูงสุด สนามไฟฟ้าก็จะเกิดขึ้นมากที่สุด และเมื่อโวลเตจที่ป้อนเข้าสายอากาศมีค่าลดลง (เนื่องจากสัญญาณอินพุตเป็นกระแสสลับ) สนามไฟฟ้าก็จะมีค่าลดลงตามดังแสดงในรูป 2.2 (ข) สนามไฟฟ้าจะลดลงตามโวลเตจที่ป้อนเข้าสู่สายอากาศ จนกระทั่งโวลเตจมีค่าเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสัญญาณที่ป้อนมีความถี่สูงพอสมควรแล้ว สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะยุบตัวตามลงมาไม่ทันหมด โดยสิ้นเชิงดังแสดงในรูป 2.2 (ค) ต่อจากนั้น โวลเตจที่ป้อนเข้าสายอากาศก็จะค่อย ๆ เกิดขึ้นในทิศทางที่สลับตรงข้ามกับการเกิดในครั้งแรก ซึ่งจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นใหม่ โดยมีทิศทางของสนามไฟฟ้านั้นตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าที่เกิดอยู่เดิม ดังรูป 2.2 (ง) เป็นที่น่าสังเกตว่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใหม่กับสนามไฟฟ้าที่เกิดอยู่เดิมในบริเวณที่ใกล้กันที่สุดนั้นจะมีทิศทางหรือโพลาริตี (Polarity) ที่เหมือนกัน ดังนั้นมันจึงเกิดการผลักดันกันออกไปจากกัน ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใหม่จะค่อย ๆ มากขึ้นตามโวลเตจที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นมันจึงผลักสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในครั้งแรกให้ไกลออกไปจากสายอากาศมากขึ้นทุกที ดังรูป 2.2 (จ) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเดิมจะหลุดออกเป็นอิสระและเคลื่อนที่ออกไปจากสายอากาศในที่สุด ดังรูป 2.2 (ฉ), (ช) และ (ซ) แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนต่อ ๆ ไปในปรากฏการณ์การกระจายสนามไฟฟ้าของคลื่นสัญญาณเป็นลำดับ

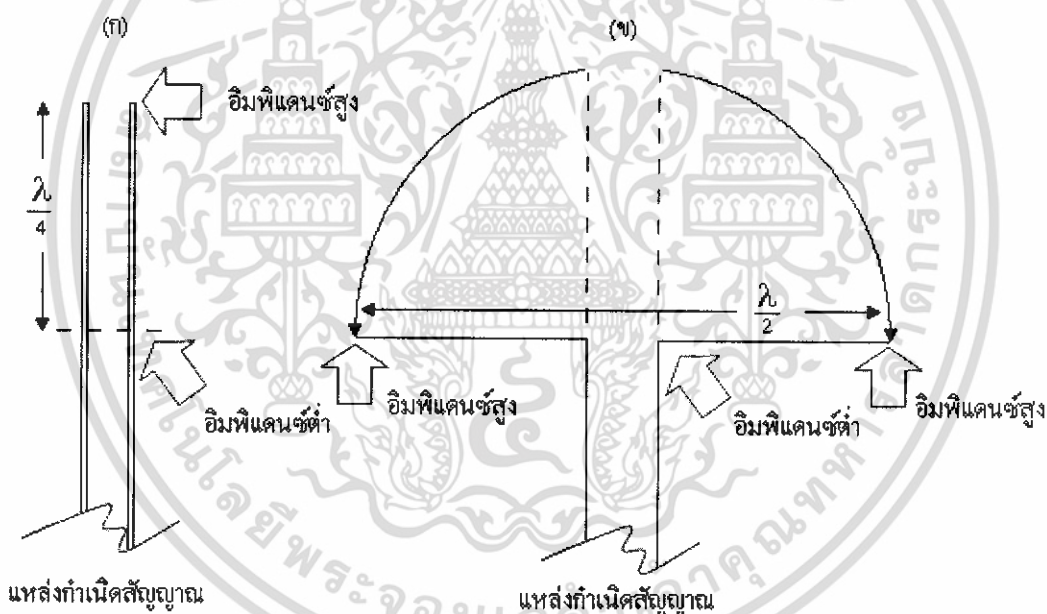


รูปที่ 2.2 การกระจายของคลื่นไฟฟ้าจากสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 สายอากาศไดโพล

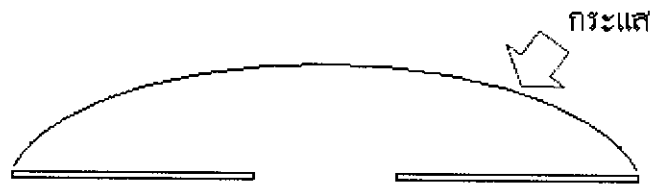
ถ้าเรามีสายส่งสัญญาณที่มีปลายข้างหนึ่งต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณ และมีปลายอีกข้างหนึ่งเปิดอยู่ ดังแสดงในรูป 2.3 (ก) ที่ปลายด้านที่เปิดอยู่นี้ย่อมมีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูง ( $Z_R = \infty$ ) ซึ่งเราจะพบว่าถ้าเราทำการหาค่าของอิมพีแดนซ์ตามตำแหน่งต่าง ๆ บนสายส่งสัญญาณ โดยเริ่มจากปลายเปิดนี้ย้อนลงไปตามตำแหน่งต่าง ๆ นั้นจะค่อย ๆ มีค่าลดลง และจะมีค่าต่ำสุด ณ ตำแหน่งที่ห่างจากปลายเปิดนั้นเท่ากับ  $\lambda/4$  และเมื่อทำการแผ่สายทั้งสองออกจากกันดังแสดงในรูป 2.3 (ข) เราจะสังเกตได้ว่ามีกระแสไหลเข้าสู่สาย ณ ตำแหน่งตรงจุดต่อนี้ได้มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของสาย ณ ตำแหน่งนี้มีค่าต่ำสุด ซึ่งอาจจะแปลความหมายในอีกในหนึ่งได้คือ จะมีพลังงานไหลเข้าส่วนนี้ได้มากที่สุดและในทางกลับกัน เพราะจะไม่มีกระแสไหลออกไปจากปลายเปิดของสายส่งได้ ดังนั้นจึงทำให้โวลเตจที่เกิดขึ้นที่ปลายเปิดนี้มีค่าสูงสุด



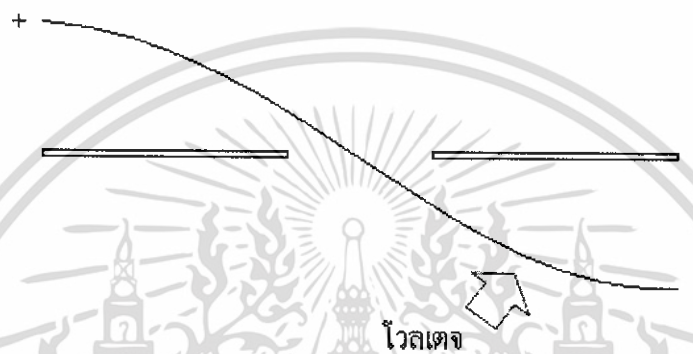
รูปที่ 2.3 สายอากาศไดโพล

ความแรงของกระแส และโวลเตจตามจุดต่าง ๆ บนสายส่งที่ได้ทำการแผ่ออกไปแล้ว จะมีลักษณะรูปแบบดังรูป 2.4 (ข) เราจะพบว่าการกางแผ่สายสัญญาณออกในตำแหน่งนี้มีการกระจายของโวลเตจได้มากที่สุด ซึ่งเมื่อคิดตามหลักการที่ได้อธิบายมาในหัวข้อ 2.1.2 แล้ว ก็หมายความว่า จะเกิดการกระจายคลื่น TEM ออกมาจากสายส่งสัญญาณส่วนนี้ได้มากที่สุด ดังนั้นสายส่งสัญญาณส่วนนี้ จะกลายเป็นสายอากาศขึ้นมา สายอากาศที่สร้างขึ้นมากในลักษณะนี้ ได้ชื่อตามลักษณะของมัน ที่ยื่นหรือขั้ว (Pole) ที่ยื่นออกไปสองข้างนั้นว่า สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



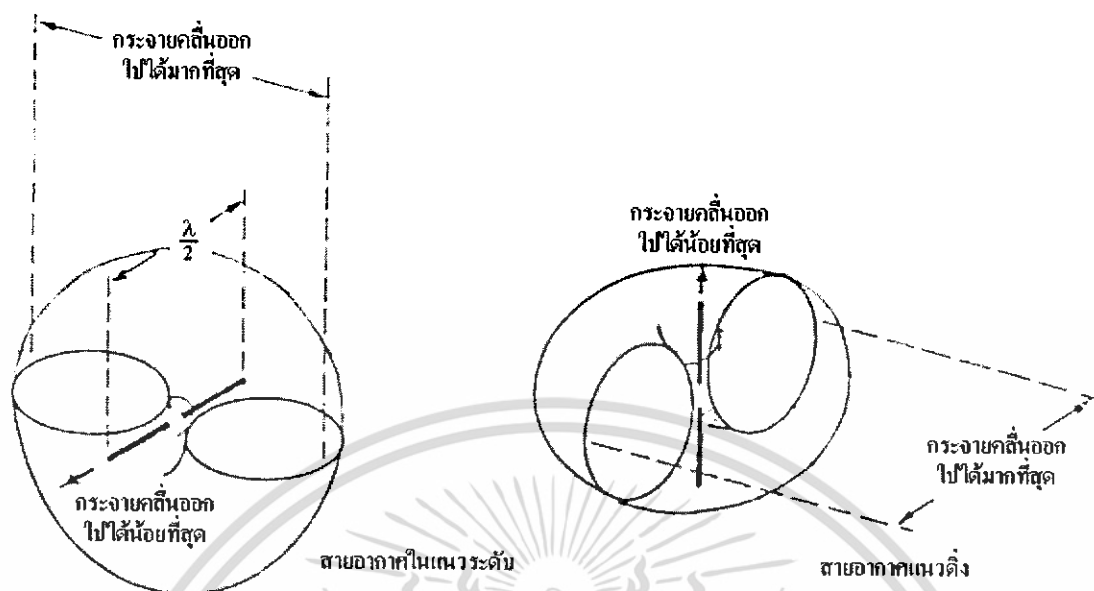
รูปที่ 2.4 (ก) รูปแบบการกระจายของกระแสนบนสายอากาศไดโพล



รูปที่ 2.4 (ข) รูปแบบการกระจายของโวลเตจบนสายอากาศไดโพล

#### 2.1.4 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ก่อนจะกล่าวถึงเรื่องของสายอากาศต่อไป เราควรทำความรู้จักกับลักษณะรูปแบบของการกระจายพลังงานของคลื่น หรือที่เรียกกันเป็นศัพท์เฉพาะว่า “แพทเทิร์นการกระจายคลื่น (Radiation Pattern)” ของสายอากาศไว้ก่อน ทิศทางที่สายอากาศจะแผ่กระจายคลื่นออกไปนั้น อาจพุ่งขึ้นไปในท้องฟ้า หรือพุ่งไปในทิศทางต่าง ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบสายอากาศนั้น คุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของสายอากาศก็คือ แพทเทิร์นแสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้กระจายออกไปจากสายอากาศในทิศทางต่าง ๆ ตามธรรมชาติ ซึ่งแพทเทิร์นนี้จะมีลักษณะกระจายไปในทั้ง 3 มิติ แต่การเขียนรูปแสดงแพทเทิร์นการกระจายคลื่นในลักษณะ 3 มิตินั้นทำได้ลำบาก ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วการเขียนรูปแสดงแพทเทิร์นการกระจายคลื่นของสายอากาศจึงนิยมแบ่งเขียนกันอยู่ในสองระนาบเท่านั้น คือการเขียนรูปแสดงแพทเทิร์นการกระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบแนวนอน และแนวตั้ง การเขียนรูปแสดงแพทเทิร์นการกระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบแนวนอนมีชื่อว่า โพลาร์ หรืออะซิมูทโคอะแกรม (Polar or Azimuth diagram) สำหรับสายอากาศไดโพลนั้นจะมีแพทเทิร์นการกระจายคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.5



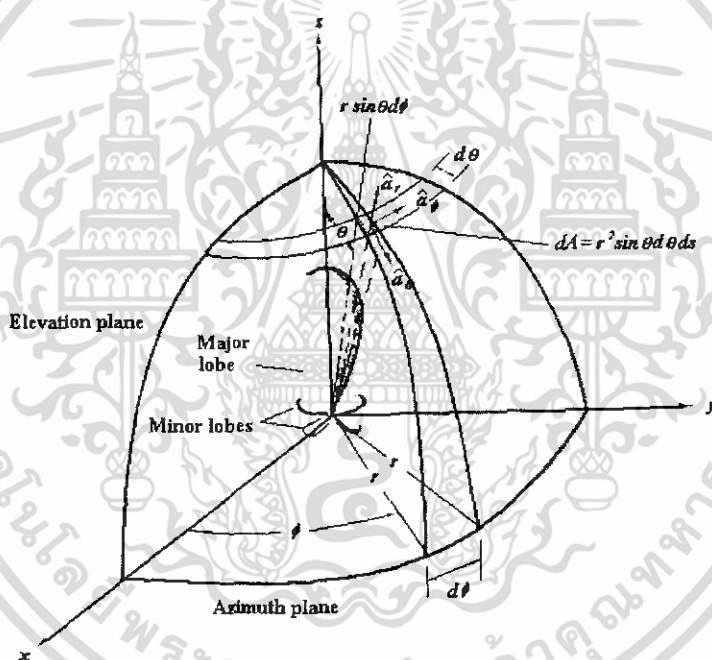
รูปที่ 2.5 แพทเทิร์นการกระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล

ตามรูปนี้ได้แสดงให้เห็นถึงแพทเทิร์นการกระจายคลื่นทั้งแบบที่มีโพลาริเซชันอยู่ในแนวนอนและแนวตั้ง ลักษณะการกระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลที่แสดงให้เห็นนี้มีชื่อเรียกเฉพาะว่าแพทเทิร์นแบบออมนิไดเรกชัน (Omni direction) คือมันจะมีทิศทางออกไปทั่วเท่ากันรอบ ๆ ตัวในแนวระนาบหนึ่ง (คือในระนาบที่ตั้งฉากกับตัวสายอากาศ) และมีทิศทางพุ่งแตกออกไปสองข้างตัวในอีกระนาบหนึ่ง (คือระนาบที่ตัดตามยาวของสายอากาศ) ซึ่งดังรูปที่ 2.5 จะเห็นแพทเทิร์นในลักษณะคล้ายรูปเลข 8

กรณีที่ความเข้มของพลังงานที่กระจายออกไปจากสายอากาศในแต่ละทางนั้น มีค่าต่างกันแล้ว ก็ย่อมจะมีทิศทางหนึ่งที่พลังงานสามารถพุ่งกระจายออกไปได้มากที่สุด ทิศทางที่พลังงานสามารถกระจายออกไปได้มากที่สุดนั้น ตามปกติจะถือว่าเป็นทิศทางของสายอากาศนั้น ค่าที่ช่วยบอกให้เรารู้ว่า สายอากาศนั้นมีสมรรถภาพในการกระจายคลื่นออกไปในทิศทางที่กำหนดไว้ได้มากหรือน้อยอย่างไรนั้น คือ ไดเรกทิวิตี (Directivity) ของสายอากาศนั้น ไดเรกทิวิตีของสายอากาศคือ “อัตราส่วนของความเข้มของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศในทิศทางของสายอากาศนั้น ต่อ ความเข้มของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศมาตรฐาน เมื่อกำลังคลื่นทั้งหมดที่กระจายออกจากสายอากาศทั้งสองนั้นมีค่าเท่ากัน” ที่กล่าวว่า สายอากาศมาตรฐานนั้น ตามทฤษฎีหมายถึง สายอากาศไอโซโทรปิก (Isotropic antenna) ซึ่งหมายถึงสายอากาศที่สามารถกระจายคลื่นออกจากตัวมันไปได้เท่ากันทุกทิศทางรอบตัวมันเอง และถือว่าเป็นไดเรกทิวิตีในทุกทิศทางเท่ากับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศ (Radiation) หรือรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีความหมายอีกนัยหนึ่ง คือ เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ หรือ แสดงโดยเส้นที่สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการแพร่กระจายของสายอากาศตามฟังก์ชันของ สเปส โคออดิเนท (Space Coordinates) ส่วนมากในกรณีนี้ของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นนี้จะกำหนดการคิดในบริเวณที่เป็น สนามระยะไกล (Far-Field) และแสดงให้เห็นเช่นเดียวกับฟังก์ชันตามทิศทางของ โคออดิเนท คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยกำลังความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux), ความเข้มข้นของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity), ความเข้มข้นของสนาม (Field Strength), เฟส (Phase) หรือ โพรไฟล์ไรเซชัน ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปฟังก์ชันของ ตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่รัศมีคงที่



รูปที่ 2.6 ระบบ โคออดิเนทสำหรับวิเคราะห์สายอากาศ

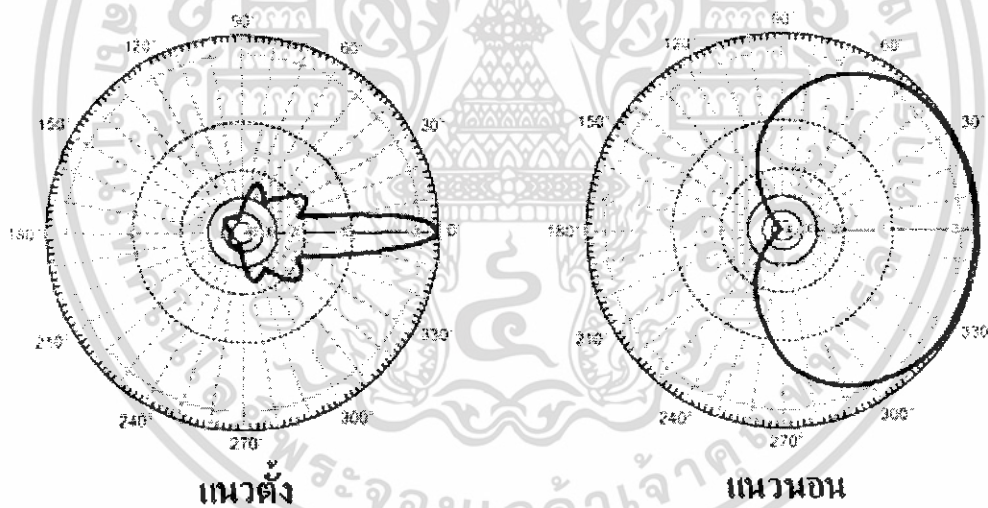
รูปที่ 2.6 แสดงระบบโคออดิเนทที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ที่ชื่อเรียกว่า รูปแบบกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่มีชื่อเรียกว่า สนามการแพร่กระจาย (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4.1 รูปแบบการแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิก ไคเรชันแนลและออมนิไคเรชันแนล

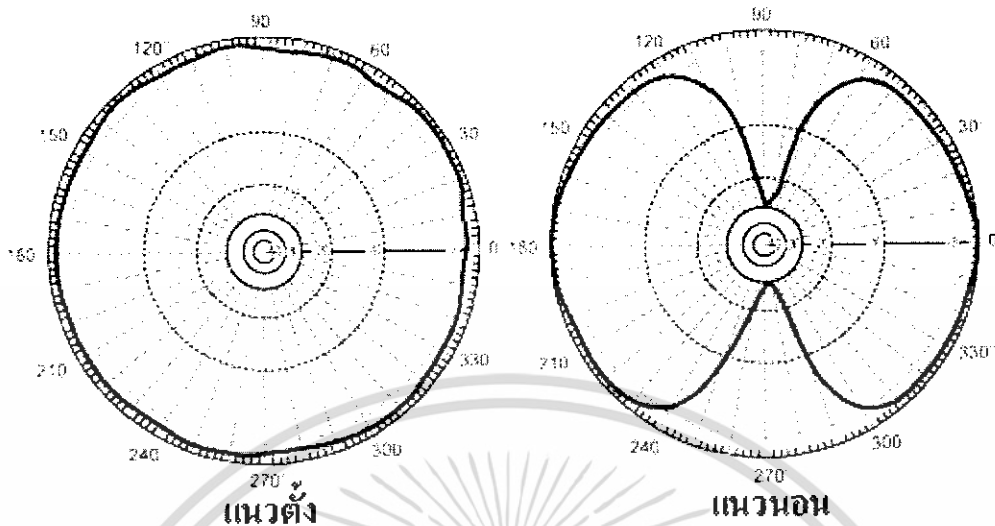
ตัวแปรคลื่น ไอโซทรอปิก (Isotropic Radiation) คือสายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นให้มีการแพร่กระจายคลื่นเท่า ๆ กันในทุกทิศทาง แม้ว่ามันจะเป็นแค่แนวคิดและไม่สามารถเป็นจริงได้ในทางกายภาพ แต่ก็มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) คือสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นหรือรองรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้งานในแนวตั้ง (Vertical) จะมีมุมกระจายคลื่นที่แคบมาก แต่ยังคงแคบยังมีระยะส่งได้ไกลขึ้น และเมื่อถูกจับให้วางในแนวนอน (Horizontal) จะมีมุมการกระจายคลื่นที่กว้างมาก มุมยิ่งกว้างระยะส่งยิ่งลดแต่ สามารถใช้งานได้ในมุมที่กว้างขึ้น จะสังเกตได้ว่าสายอากาศแบบทิศทางในมุมด้านหลังของสายอากาศหรือ 180 องศา จะไม่มีการกระจายคลื่นไปเลย เราเรียกว่าจุดบอดของสายอากาศ



รูปที่ 2.7 รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna pattern)

สายอากาศแบบออมนิไคเรชันแนล (Omni directional Antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้มีดังแสดงในรูปที่ 2.8 สายอากาศชนิดรอบตัว สังเกตได้จากคลื่นแพร่กระจายออกไปทุกทิศทาง เมื่อถูกวางให้อยู่ในแนวนอน แต่เมื่อถูกวางให้อยู่ตั้ง มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเล็กน้อยแต่คุณลักษณะยังมีการกระจายคลื่นไปในทุกทิศ

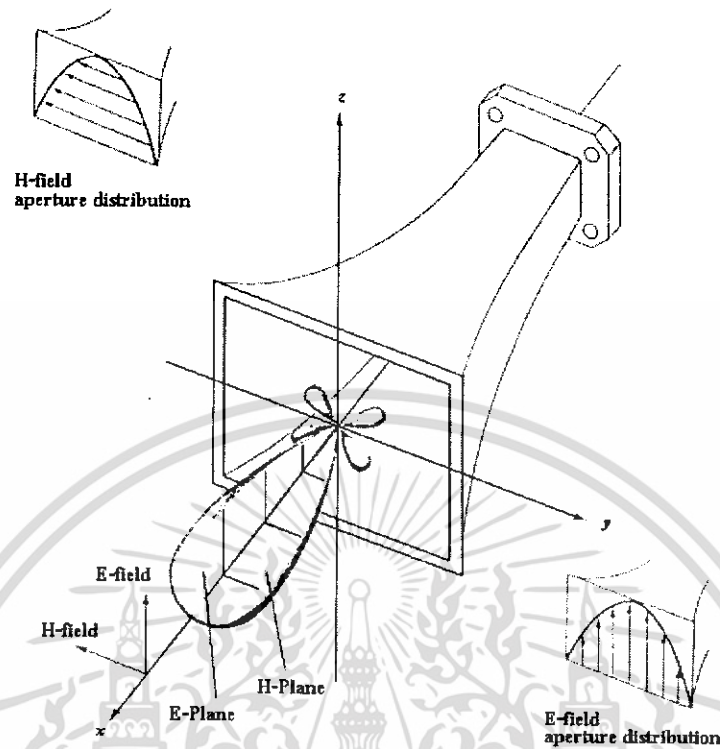


รูปที่ 2.8 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศออมนิไดเรกชันแนล

ตามรูปจะเห็นว่ารูปแบบการกระจายแบบนี้ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุท (Azimuth Plane)  $[f(\phi), (\theta) = \pi/2]$  แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชัน (Elevation Plane)  $[f(\phi), (\theta) = k]$  รูปแบบการแพร่กระจายชนิดนี้ออกแบบสำหรับออมนิไดเรกชันแนลเป็นกรณีพิเศษของรูปแบบการแพร่กระจายแบบชี้ทิศทาง

#### 2.1.4.2 รูปแบบการแพร่กระจายหลัก

สำหรับสายอากาศลิเนียร์ลิโพลาไรเซชัน (Linearly Polarized Antenna) จะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของรูปแบบการแพร่กระจายหลัก (Principle Pattern) สนามไฟฟ้า E สนามแม่เหล็ก H แพทเทอร์นในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด



รูปที่ 2.9 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร

รูปที่ 2.9 เป็นการแสดงรูปแบบการแพร่กระจายหลัก โดยมีระนาบ XZ (ระนาบเอเดเวชัน;  $\phi = 0$ ) เป็นระนาบ E หลัก และมีระนาบ XY (ระนาบ อาซิมุท,  $\theta = \pi/2$ ) เป็นระนาบ H หลัก

#### 2.1.4.3 โลบของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

โอบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มข้นของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายแบบโพลาร์ (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นโอบแบบต่างๆ ดังนี้

โอบหลัก (Major หรือ Main Lobe) เป็นโอบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดตามรูปที่ 2.10 มีโอบหลักอยู่ในทิศทาง  $\theta = 0$  สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีโอบหลักมากกว่าหนึ่งโอบ เช่น สายอากาศแบบแยก빔 (Split-beam Antenna)

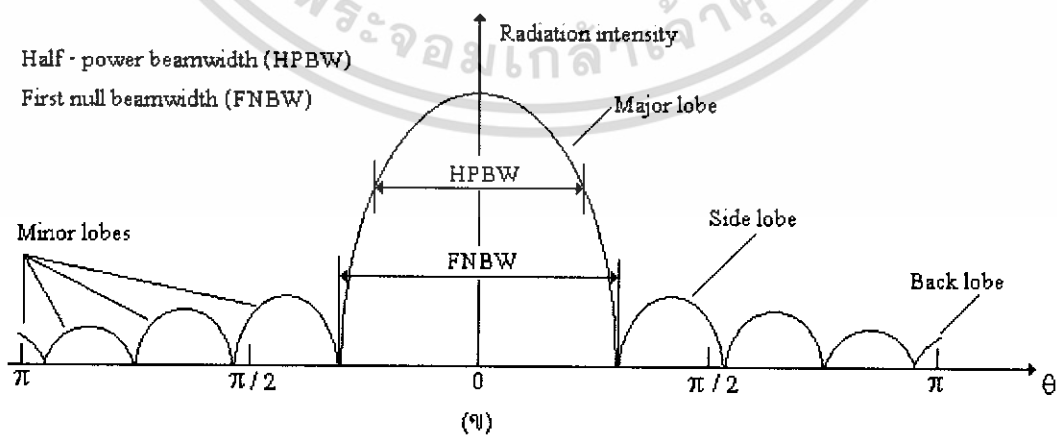
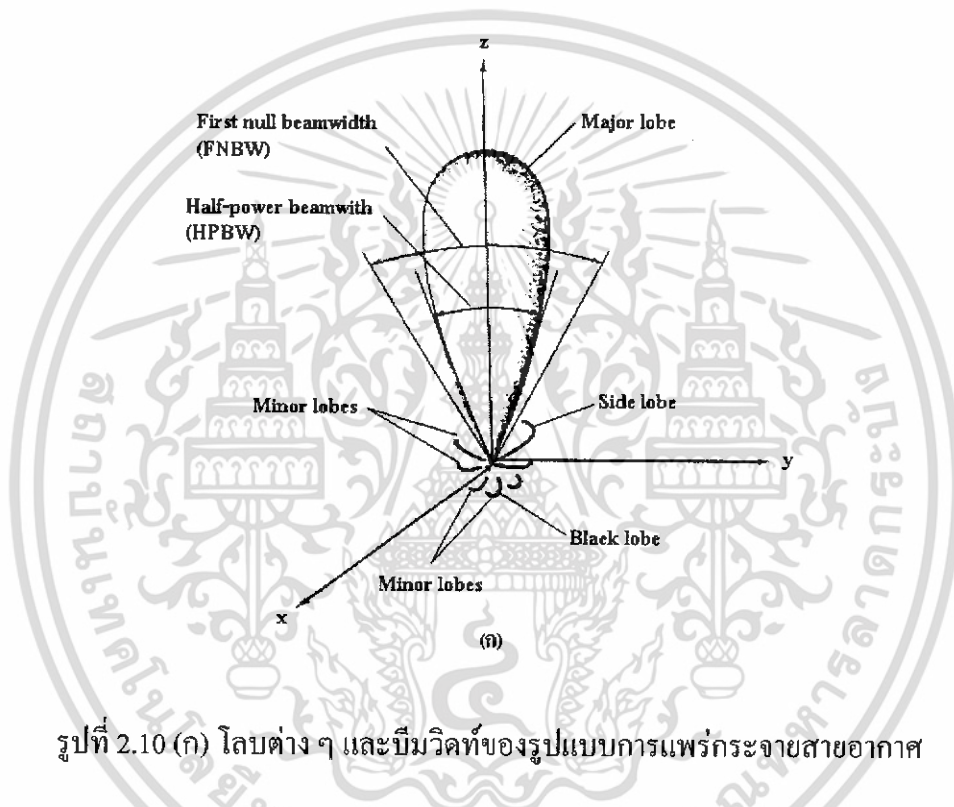
โอบย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ โอบอื่นๆ นอกเหนือไปจากโอบหลัก

โอบข้าง หรือ ไซด์โอบ (Side Lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ติดกับโอบหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโอบหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลบล้าง (Back Lobe) เป็นโลบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโลบลักปกติแล้วโลบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโลบล้างนี้ให้เหลือน้อยที่สุด

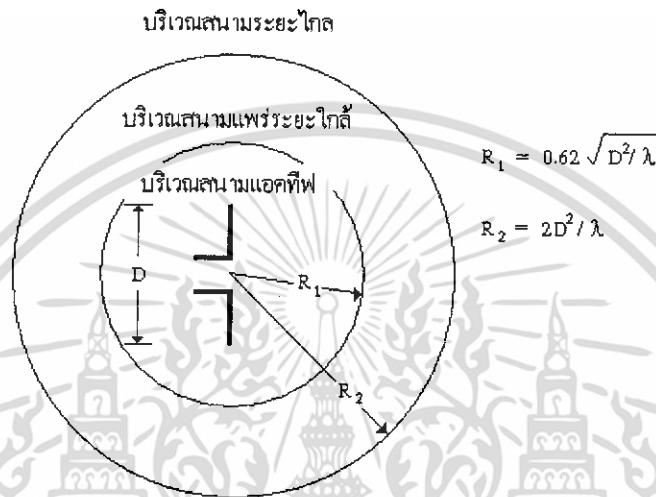
ระดับของโลบย่อยมักแสดงด้วยอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในโลบที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโลบลัก ซึ่งเรียกว่าอัตราส่วนของไซด์โลบ (Side Lobe Level: SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โลบน้อยกว่า -20 dB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4.4 บริเวณต่างๆ ของสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating-Near Field) และสนามระยะไกล (Far-Field) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่บริเวณนี้จะมีระยะทาง  $R < 0.62 \sqrt{D^3 / \lambda}$  จากผิวของสายอากาศเมื่อ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นและ  $D$  เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะมีระยะทาง  $2D^2 / \lambda > R \geq 0.62 \sqrt{D^3 / \lambda}$

บริเวณสนามระยะไกลเป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ  $D$  บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง  $R > 2D^2 / \lambda$  จากสายอากาศ

ในบริเวณนี้สามารถมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า  $R = 2D^2 / \lambda$  และขอบนอกเป็นอนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

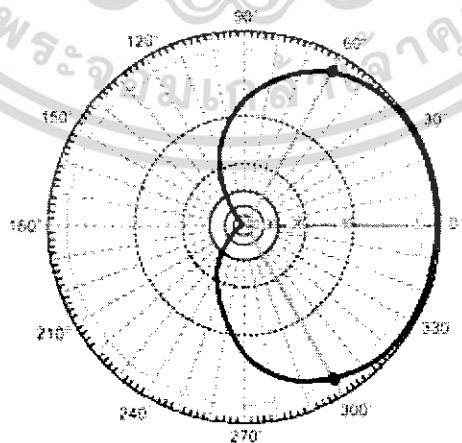
### 2.1.5 บีมวิดธ์ของสายอากาศ

ค่าบีมวิดธ์ (Beamwidth) ของสายอากาศเป็นการบอกมุมที่รับส่งสัญญาณได้ดีที่สุดของสายอากาศนั้นๆ หาได้จาก Product Spect ของผู้ผลิตสายอากาศนั้นๆ มักถูกแบ่งเป็นสองแนวคือ บีมวิดธ์แนวตั้ง (Vertical Beamwidth) และ บีมวิดธ์แนวนอน (Horizontal Beamwidth) ก็หมายถึงมุมที่รับส่งสัญญาณได้ดีที่สุด เมื่อวางสายอากาศนั้นๆ การที่เราบีมวิดธ์ กว้างๆ นั้นเราจะส่งสัญญาณได้ไกล เช่น สายอากาศแบบรอบตัวมักจะบีมวิดธ์ 360 องศา นั้นหมายถึงคุณสามารถรับส่งสัญญาณได้ดีที่สุดในทุกๆ ทิศทาง แต่ระยะรับส่งจะใกล้ เพียงไม่กี่ร้อยเมตรเท่านั้น หรือสายอากาศแบบทิศทางที่มีบีมวิดธ์ ที่แคบมาก ๆ คุณสามารถมีระยะรับส่งที่ไกลถึงไกลมาก ๆ ประมาณหลายสิบกิโลเมตร แต่มุมของสายอากาศหรือบีมวิดธ์นั้นแคบมาก ๆ การใช้งานจะต้องปรับมุมของสายอากาศให้ตรงกับมุมบีมวิดธ์ จริง ๆ ถึงจะสามารถรับส่งสัญญาณ ได้ดังนั้นการเลือกสายอากาศควรพิจารณาค่าบีมวิดธ์ ด้วย

#### 2.1.5.1 วิธีหาค่าบีมวิดธ์สายอากาศ

ขออธิบายวิธีการหาค่าสายอากาศแบบง่ายๆเพื่อความเข้าใจ

1. เตรียมแพทเทิร์นของแนวที่เราจะจัดวาง
2. จากแพทเทิร์นลดกำลังส่งลง 3 dB หรือครึ่งหนึ่งของกำลังส่ง
3. หาจุดที่แพทเทิร์นที่ตัดกับเส้นที่ถูกลดลง 3 dB
4. ลากเส้นจากจุดศูนย์กลางตัดกับจุดที่ตัดกับเส้นที่ถูกลดลง 3 dB เท่านั้นที่จะได้ค่าบีมวิดธ์ที่ต้องการ แต่จริง ๆ แล้วผู้ผลิตสายอากาศจะบอกค่าบีมวิดธ์ มาอยู่แล้ว



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการหาค่าบีมวิดธ์จากแพทเทิร์นสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปเส้นตีเทาฟ้าคือเส้นรัศมีเมื่อลดกำลังส่งลง 3 dB จุดสีดำคือจุดตัดเส้นสีส้มคือมุมของบีมวิคส์ รูปแล้ว Pattern สายอากาศตัวนี้มีค่าบีมวิคส์ 120 องศา

### 2.1.6 ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใช้ในการส่งผ่านตัวกลางถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานและกำลังไฟฟ้า โดยใช้ตัวความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่ พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (Instantaneous Pointing Vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\mathbf{W} = \boldsymbol{\xi} \times \mathcal{H} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$\mathbf{W}$	= พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น	(W / m <sup>2</sup> )
	$\boldsymbol{\xi}$	= ความเข้มสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลานั้น	(V / m)
	$\mathcal{H}$	= ความเข้มสนามแม่เหล็กชั่วขณะเวลานั้น	(A / m)

เนื่องจากพอยดิงเวกเตอร์มีความหมายแสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นผิวปิดจะสามารถหาได้โดยอินทิเกรตส่วนของพอยดิงเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวทั้งหมดซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$\mathcal{P} = \oiint_S \mathbf{W} \cdot \overline{d\mathbf{s}} = \oiint_S \mathbf{W} \cdot \overline{n} da \quad (2.2)$$

เมื่อ	$\mathcal{P}$	= กำลังงานทั้งหมดซึ่งขณะเวลานั้น	(W)
	$da$	= พื้นที่ที่เล็กที่สุดบนพื้นที่ปิด	(m <sup>2</sup> )

ในกรณีของสนามที่แปรผันกับเวลามักจะหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของกำลังงานได้โดยการอินทิเกรตค่าพอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้นตลอด 1 คาบ แล้วหารด้วยคาบเวลานั้นสำหรับสนามที่แปรผันกับเวลา ซึ่งกระจายเป็นฮาร์โมนิคในรูป  $e^{j\omega t}$  เมื่อกำหนดสนาม  $\overline{\mathbf{E}}$  และ  $\overline{\mathbf{H}}$  เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชิงซ้อนแล้วจะหาความสัมพันธ์กับค่า  $\boldsymbol{\xi}$  และ  $\mathcal{H}$  ชั่วขณะเวลาใด ๆ ได้จาก

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.3), (2.4) และโดยอาศัย  $\text{Re} [E e^{j\omega t}] = \frac{1}{2} [E e^{j\omega t} + E^* e^{j\omega t}]$  สมการ (2.1) จะเขียนได้ใหม่เป็น

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

เทอมแรกของสมการ (2.5) ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลาและเทอมที่สองมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพอยดิงเวกเตอร์จึงสามารถที่จะหาได้เป็น

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

ตัวประกอบ  $\frac{1}{2}$  ในสมการ (2.5) และ (2.6) เกิดขึ้นเพราะสนาม E และ H เป็นค่าสูงสุดไม่ใช่ค่า จาก rms จากสมการ (2.6) กำลังเฉลี่ยที่แพร่กระจายจากสายอากาศ จะเขียนได้เป็น

$$P_{rad} = P_{av} = \iint_S \bar{W}_{rad} \cdot \bar{ds} = \frac{1}{2} \iint_S \text{Re}(\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}^*) \cdot \bar{ds} \quad (2.7)$$

### 2.1.7 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

คำจำกัดความของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แพร่ออกจากสายอากาศต่อมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศเกี่ยวกับสนามระยะไกลความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นสามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่นแผ่จากการยกกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

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

เมื่อ  $U$  = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)  
 $W_{rad}$  = ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น (W/m<sup>2</sup>)

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $\bar{E}$  = ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล  
 $E_\theta, E_\phi$  = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล  
 $\eta$  = อินทรีนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้เช่นกัน กำลังทั้งหมดนี้หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นจากสมการ (2.9) ตลอดมุมตัน  $4\pi$  ทั้งหมดซึ่งจะได้

$$P_{\text{rad}} = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.10)$$

### 2.1.8 ไคเรคทีวิตี

ไคเรคทีฟเฟนในทิศทางที่กำหนดคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งใช้อ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้ไอโซโทรปิกพอยท์ (Isotropic Point Source)

ไคเรคทีวิตีคือ ค่าของไคเรคทีฟเฟนในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด หรือไคเรคทีวิตีของต้นกำเนิดที่ไม่เป็นไอโซโทรปิกคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} \quad (2.11)$$

$$D_0 = \frac{U_{\text{max}}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} \quad (2.12)$$

- เมื่อ  $D_g$  = ไคเรคทีฟเฟน (ไม่มีหน่วย)  
 $D_0$  = ไคเรคทีวิตี (ไม่มีหน่วย)  
 $U$  = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)  
 $U_{\text{max}}$  = ค่าของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)  
 $U_0$  = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิก (W/หน่วยมุมตัน)  
 $P_{\text{rad}}$  = กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (W)

จากสมการที่ (2.11) และ (2.12) จะทราบโคเรคทีฟเฟน และโคเรคทีฟติของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่มีค่าเป็นหนึ่งเพราะว่ามันมีการแพร่กระจายกำลังออกไปทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากันคือ  $U$ ,  $U_{\max}$  และ  $U_0$  ต่างมีค่าเท่ากันแต่ต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีโคเรคทีฟติมากกว่าหนึ่งเสมอ

สายอากาศที่มีโอบหลักแคบ ๆ เพียงโอบเดียว และมีโอบย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้มุมตันของบีมจะมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณของ HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกัน

$$D_0 = 4\pi / \Omega = 4\pi / \Theta_{1r} \Theta_{2r} \quad (2.13)$$

มุมตันของบีม  $\Omega$  ประมาณได้จาก

$$\Omega = \Theta_{1r} = \Theta_{2r} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $\Theta_{1r}$  = HPBW ในระนาบใด ๆ (เรเดียน)

$\Theta_{2r}$  = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (เรเดียน)

### 2.1.9 กำลังขยายของสายอากาศ และ ERP

เมื่อกล่าวถึงกำลังขยายของสายอากาศ (Antenna Gain) นั้น ไม่ได้หมายความว่าสายอากาศเป็นอุปกรณ์แอคทีฟ (Active Device) ดังเช่นเครื่องขยายเสียง แต่กำลังขยายของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงให้เห็นว่า สายอากาศนั้นมีความสามารถที่จะบีบรวบรวมเอาพลังงานของคลื่นที่กระจายออกมาจากสายอากาศนั้น ให้พุ่งออกไปในทิศทางที่เราต้องการได้มากน้อยเพียงใด

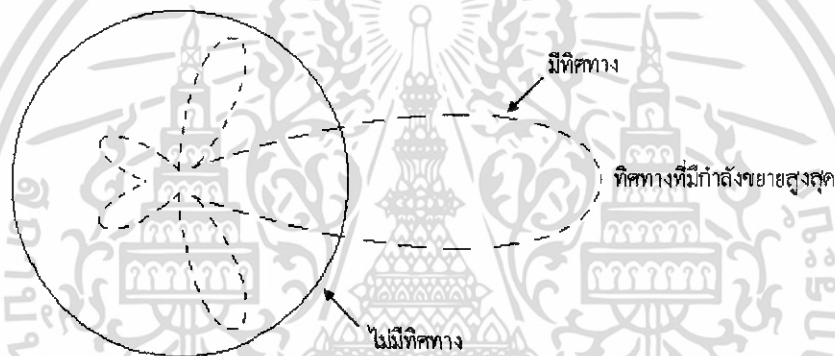
กำลังขยายของสายอากาศคำนวณได้จาก อัตราส่วนของกำลังสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศมาตรฐาน ต่อ ค่ากำลังสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศที่เราต้องการจะรู้ค่ากำลังขยายเพื่อที่จะทำให้เกิดความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่เราต้องการจะรู้ค่ากำลังขยายนั่นได้เท่ากับความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศมาตรฐาน

อย่างไรก็ตาม เมื่อกล่าวถึงกำลังขยายของสายอากาศโดยทั่วไป เราจะหมายถึงกำลังขยายของสายอากาศในตำแหน่งที่มีค่ามากที่สุด ในการวัดค่ากำลังขยายของสายอากาศในทางปฏิบัติเราไม่สามารถที่จะหาสายอากาศมาตรฐานที่เป็นสายอากาศไอโซโทรปิก ได้จริง ดังนั้นในทางปฏิบัติจริงจะใช้สายอากาศไดโพลแทนสายอากาศไอโทรปิก และทำการชดเชยค่ากำลังขยายของสายอากาศที่วัดได้นั้นให้ถูกต้อง โดยเราทราบ (จากการคำนวณ) ว่า กำลังขยายของสายอากาศไดโพลมีค่าเท่ากับ 2.15 dB ค่ากำลังขยายของสายอากาศที่วัดได้โดยใช้สายอากาศไดโพลแทนสายอากาศไอโซโทรปิกเมื่อยังไม่ทำการชดเชยค่า 2.15 dB นั้นมีหน่วยเฉพาะคือ  $dB_u$  ในขณะที่กำลังขยายของสายอากาศที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการใช้สายอากาศไอโซโทรปิกเป็นตัวเปรียบเทียบมีหน่วยเป็น dB หรือในบางครั้งใช้ตัวอักษร i ซึ่งหมายถึงไอโซโทรปิกห้อยไว้หลัง dB เป็น dB<sub>i</sub> ทั้งนี้เพื่ออำความหมายนั้นให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

จากที่อธิบายมาแล้วเป็นที่น่าสังเกตว่า กำลังขยายของสายอากาศจะมีความสัมพันธ์กับโคเรคทีวิตีของสายอากาศนั้นเป็นอย่างมาก จุดสำคัญที่ต่างกันคือ กำลังขยายของสายอากาศนั้นได้คิดรวมถึงค่าหวังผล (Effective value) ในการกระจายคลื่นจริง ๆ เข้าไปรวมอยู่ด้วยแล้ว รูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงแพทเทิร์นการกระจายคลื่นของสายอากาศ 2 สาย แพทเทิร์นของสายอากาศสายหนึ่ง (แสดงโดยเส้นทึบ) นั้นไม่มีทิศทาง เพราะพลังงานของสัญญาณกระจายออกไปเท่ากันหมดทุกด้าน แต่แพทเทิร์นของสายอากาศอีกสายหนึ่ง (แสดงโดยเส้นประ) นั้นแสดงว่าไม่มีทั้งทิศทางและกำลังขยาย



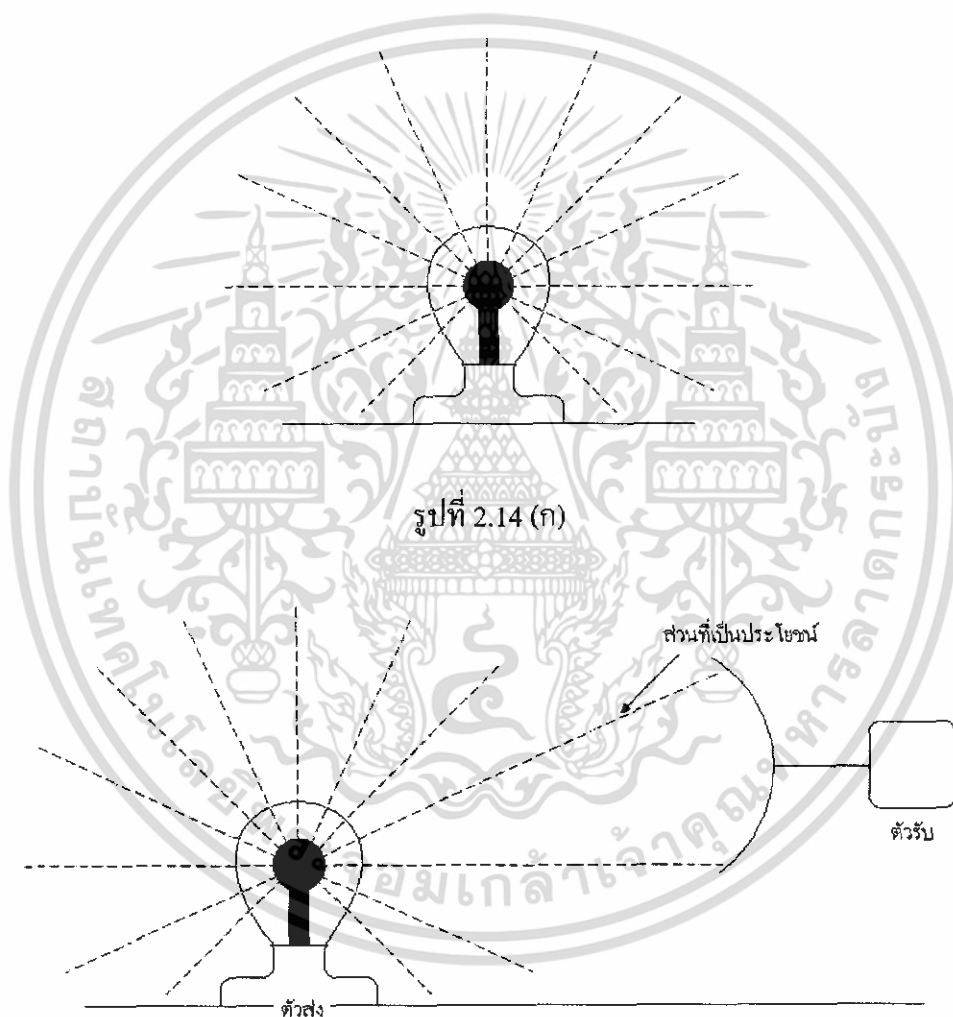
รูปที่ 2.13 แพทเทิร์นการกระจายคลื่นของสายอากาศ ชนิดที่มีทิศทาง และชนิดที่ไม่มีทิศทาง

ค่าความแรงของคลื่นที่กระจายออกมาจากสายอากาศที่วัดได้นั้น จะมีค่าเท่ากับผลคูณของกำลังของคลื่นสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศกับกำลังขยายของสายอากาศนั้น ค่าดังกล่าวนี้มีชื่อเฉพาะคือ Effective Radiated Power ซึ่งเขียนย่อ ๆ ว่า ERP ซึ่งเป็นศัพท์หนึ่งที่ใช้อยู่เสมอ ในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ จึงควรที่ผู้อ่านจะจดจำมันไว้

รูปที่ 2.14 จะเป็นรูปที่ช่วยแสดงให้เราเห็นภาพพจน์บางประการ เกี่ยวกับคุณสมบัติของสายอากาศได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้โดยอาศัยคุณสมบัติของแสงที่กระจายออกจากหลอดไฟ และจากไฟฉายมาช่วยในการสร้างภาพพจน์นั้น โดยในรูป 2.14(ก) แสดงภาพหลอดไฟที่กระจายแสงได้รอบตัวเสมือนกับสายอากาศไอโซโทรปิกที่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปได้รอบตัว และเมื่อนำเอาจานรับแสงจากหลอดไฟที่กระจายแสงออกไปรอบตัว ดังรูป 2.14(ข) จานจะรับแสงได้ปริมาณของแสงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เทียบคล้ายกับที่สายอากาศไอโซโทรปิกที่ไม่มีกำลังขยาย รูปที่ 2.14(ค) เป็นการแทนหลอดไฟด้วยไฟฉาย ซึ่งไฟฉายจะรวบรวมลำแสงไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นแม้จะใช้จานรับ

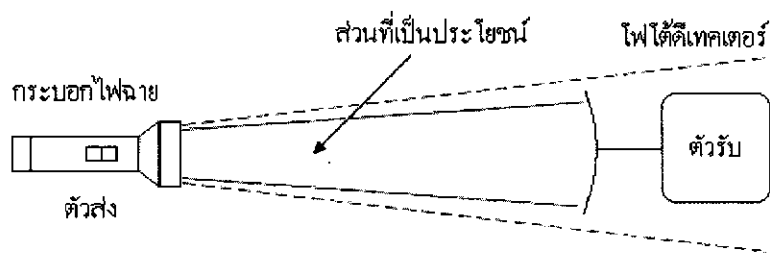
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงที่มีขนาดเดียวกับงานในรูป 2.14(ข) แต่ปริมาณของแสงจากไฟฉายที่ส่องลงบนงานนั้นย่อมมีค่ามากกว่าปริมาณของแสงจากหลอดไฟ ไฟฉายที่มีความสามารถรวมพลังงานของแสงให้ภาพพจน์เสมือนกับสายอากาศที่มีกำลังขยายๆ และรูปที่ 2.14(ง) แสดงถึงความสามารถในการรวบรวมพลังงานของแสงของไฟฉาย ให้ส่องไปยังที่หมายต่าง ๆ ได้ตามต้องการ ซึ่งให้ภาพพจน์เสมือนสายอากาศที่มีกำลังขยาย หรือโคเรคทีวิตีที่ดี ที่สามารถใช้รวบรวมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้กระจายเคลื่อนที่เป็นลำออกจากตัวมันไปยังจุดที่ต้องการได้อย่างดี

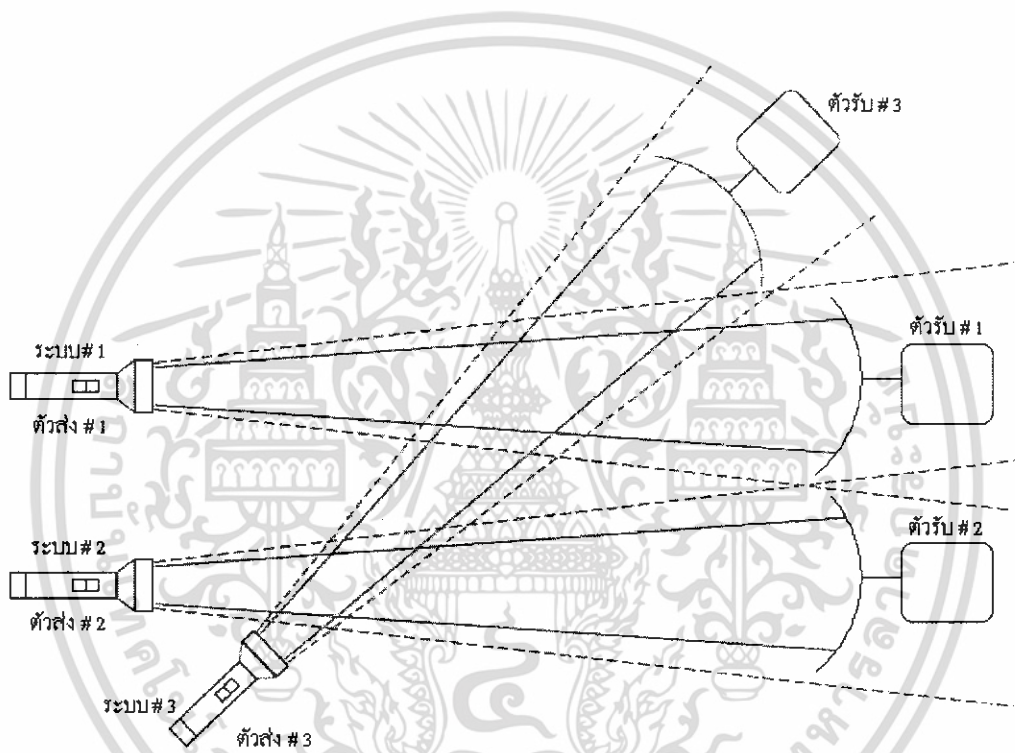


รูปที่ 2.14(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 (ก)



รูปที่ 2.14(ง)

### 2.1.10 อัตรายบาย

อัตรายบายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากโคเรคทีวิตีโดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วยในขณะที่โคเรคทีวิตีอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

เพาเวอร์เกน (Power Gain) ของสายอากาศในทิศทางนั้น มีค่าเท่ากับ  $4\pi$  คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่งเมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วจะคิดเพาเวอร์เกนในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{อัตราขยาย} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $U(\theta, \phi)$  = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น  
 $P_{in}$  = กำลังงานทั้งหมดที่ป้อนให้สายอากาศ

โดยทั่วไปแล้วมักจะพูดถึงอัตราขยายสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเพาเวอร์เกนในทิศทางที่กำหนดให้ต่อเพาเวอร์เกนของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพลหรือสายอากาศปากแตร แต่โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็น ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$G_g = 4\pi U(\theta, \phi) / P_{in} \text{ (ไอโซโทรปิกที่ไม่มีการสูญเสีย)} \quad (2.16)$$

กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด ( $P_{rad}$ ) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ  $P_{in}$  ดังนี้

$$P_{rad} = e_r P_{in} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $e_r$  เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) จะได้

$$G_g(\theta, \phi) = e_r [4\pi U(\theta, \phi) / P_{rad}] \quad (2.18)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับไดเรกทิฟเกนดังนี้

$$G_g(\theta, \phi) = e_r D_g(\theta, \phi) \quad (2.19)$$

ในทำนองเดียวกันค่าสูงสุดของเกนจะสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตีโดย

$$G_0 = G_g(\theta, \phi)_{max} = e_r D_g(\theta, \phi) \quad (2.20)$$

ดังนั้นค่าประมาณของเกนจะได้

$$G_0 = 30000 / \Theta_1 \Theta_{2r} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.11 คลื่นนิ่ง (Standing Wave)

กำลังที่ได้ออกจากสายอากาศแพร่ออกสู่อากาศโดยกำลังที่ส่งออกไปอาจจะมีกำลังส่วนหนึ่งที่มีการสะท้อนกลับมาสู่สายอากาศส่วนหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบคลื่นที่ส่งออกไปเป็นคลื่นเดินไปข้างหน้าและเมื่อคลื่นเดินหน้าชนกับคลื่นที่สะท้อนกลับ จะเสริมกันหรือหักล้างกันแต่ความแตกต่างจากเฟสของคลื่นทั้งสองผลลัพธ์ของคลื่นทั้งสองจะปรากฏเป็นคลื่นนิ่ง สรุปแล้วคลื่นนิ่งก็คือผลที่เกิดจากคลื่นเดินหน้า และคลื่นสะท้อนผสมกัน

#### 2.1.11.1 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งคือ อัตราส่วนของแรงดันสูงสุด และแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่ง อัตราส่วนนี้เป็นค่าวัดปริมาณที่โหดผิดไปจากสภาวะที่โหดแมตซ์กันมากน้อยเพียงใด เราหาค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้จากสูตร

$$VSWR = \frac{|V|_{\max}}{|V|_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\Gamma_L$  คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $Z_1, Z_2$  คือ อิมพีแดนซ์ของคลื่น

#### 2.1.11.2 S-พารามิเตอร์

เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับหาสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ เราสามารถเขียน S-พารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$V_1^- = S_{11} V_2^+ + S_{12} V_1^+ \quad (2.24a)$$

$$V_2^- = S_{21} V_1^+ + S_{22} V_2^+ \quad (2.24b)$$

เมื่อ  $V_1^+$  คือ แรงดันที่จ่ายที่พอร์ตที่ 1

$V_1^-$  คือ แรงดันสะท้อนกลับที่พอร์ตที่ 1

$V_2^+$  คือ แรงดันที่จ่ายที่พอร์ตที่ 2

$V_2^-$  คือ แรงดันสะท้อนกลับที่พอร์ตที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ความหมายของ S – พารามิเตอร์ แต่ละตัวคือ  $S_{11}$  และ  $S_{22}$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับที่วัดพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 สำหรับ  $S_{12}$  และ  $S_{21}$  ก็จะเป็นสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านจากพอร์ตที่ 2 มายังพอร์ตที่ 1 และจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 ตามลำดับ เราสามารถหาค่า  $S_{ij}$  ได้ โดยการวัดคลื่นสะท้อนกลับมายังในพอร์ตที่ 1 และจากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า  $S_{ij}$  ก็คือสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับและภายใต้เงื่อนไขเดียวกันนี้  $V_j^i$  จะเขียนได้ดังนี้

$$V_j^i = S_{ij} V_1^+$$

หรือ

$$S_{ij} = \frac{V_j^-}{V_1^+} \quad (2.25)$$

ดังนั้น

$$S_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad (2.26)$$

ในทำนองเดียวกันจะสามารถหาค่า  $S_{22}$  ได้ดังนี้

$$S_{22} = \frac{V_2^-}{V_2^+} \quad (2.27)$$

และแทน  $S_{12}$  กับ  $S_{21}$  จะได้

$$S_{12} = S_{21} = \frac{V_1^-}{V_2^+} = \frac{V_2^-}{V_1^+} \quad (2.28)$$

### 2.1.12 แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ

ตามธรรมชาติ สายอากาศต่าง ๆ นั้นจะถูกออกแบบให้ใช้งานได้เฉพาะในย่านความถี่ย่านหนึ่งเท่านั้น ในย่านความถี่สายอากาศทำงานได้ดีนี้ พลังงานของสัญญาณที่ป้อนให้สายอากาศจะถูกกระจายไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในทางปฏิบัติเราจะสังเกตได้จากค่า SWR ที่เกิดขึ้นบนสายส่งสัญญาณที่ป้อนให้กับสายอากาศในย่านความถี่นี้ จะมีค่าน้อยมาก แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ เป็นปริมาณที่ใช้บอกถึงความกว้างของย่านความถี่สายอากาศนั้น ใช้งานได้ดี

ปรกติแล้วเราถือเอาย่านความถี่ที่พลังงานของคลื่นแพร่กระจายออกไปจากสายได้ไม่น้อยกว่า 3 dB

เอกลส ารนเป็นเอกลส ารทลวงนเวส ารหรับการเซงงานพอก ารทศกษาเท้านน เมื่อนุญตเตหนาเบเซบระเซชนตเนนการรัค าร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากระดับของพลังงานที่สายอากาศสนามกระจายออกไปได้มากที่สุด นั่นก็คือ เบนด์วิดธ์ของสายอากาศ

ค่ากำลังขยาย ไคเรคตีวิตี อิมพีแดนซ์ และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้บอกคุณสมบัติของสายอากาศนั้น ประกติแล้วจะหมายถึงค่าต่าง ๆ เหล่านี้ที่ความถี่กึ่งกลางเบนด์วิดธ์ของสายอากาศทั้งสิ้น

## 2.2 สายอากาศกรวยคู่ (Biconical Antenna)

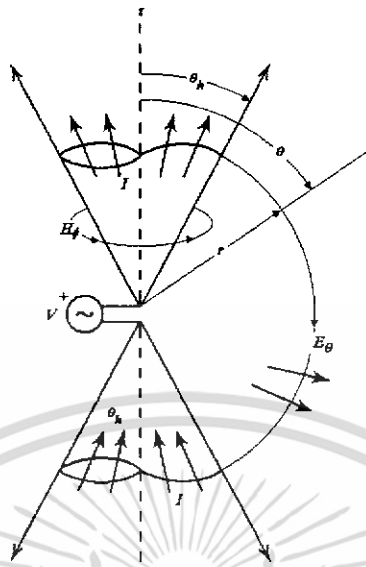
จากบทที่แล้ว เราสามารถที่จะทำการเพิ่มขนาดของความกว้างของช่องสัญญาณ (Bandwidth) ของสายอากาศไดโพล แบบง่ายๆ (Simple dipole Antenna) โดยการเพิ่มขนาดความหนาของสาย (wire) ให้เพิ่มขึ้นได้ ซึ่งวิธีการที่จะขยายความกว้างของช่องสัญญาณนี้สามารถที่จะทำได้โดยการส่งผ่านตัวนำกระจายคลื่นที่มีรูปร่างแบบทรงกรวย โดยเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสายส่งที่มีค่าคงที่ (Fixed wire diameter) ถูกกำหนดให้มีการเปลี่ยนค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางแบบช้า ๆ และให้มุมของผิวทรงกรวยมีค่าคงที่ ในบทนี้ สายอากาศกรวยคู่ในอุดมคติจะถูกนำมาพิจารณาเป็นอันดับแรก ตามด้วยตัวอย่าง 2 รูปแบบคือ สายอากาศกรวยคู่แบบจำกัด (Finite biconical antenna) และสายอากาศแบบจานกรวย (Discone)

### 2.2.1 สายอากาศกรวยคู่แบบไม่จำกัด (Infinite biconical antenna)

ถ้าแบ่งครึ่งตัวนำของสายอากาศเป็น 2 ส่วน ที่มีพื้นที่ผิวหน้าตัดของทรงกรวยของตัวนำจากด้านหนึ่งถึงอีกด้านหนึ่ง (End-to-End) ของแผ่นตัวนำรูปทรงกรวย 2 อัน มีพื้นที่ที่ไม่จำกัด (infinite conical conducting) แต่มีช่องว่างจำกัด (Finite Gap) ที่ จุดจ่าย (Feed Point) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.15

เพราะการที่มีโครงสร้างที่ไม่จำกัดนี้เอง ทำให้สามารถที่จะทำการวิเคราะห์ให้เสมือนกับเป็นสายส่ง (Transmission line) ด้วยแรงดันในค่าของเวลาที่เปลี่ยนแปลง (time-varying Voltage) ที่อยู่ข้ามช่องว่าง และ มีกระแสไหลลกระจ่ายออกจากช่องว่างไปทั่วผิวของตัวนำ ซึ่งกระแสนี้จะทำการสร้างพื้นสนามแม่เหล็กโดยรอบ  $H_\phi$  ถ้าสมมติว่ารูปแบบสายส่ง TEM (ทุกสนาม (field) จะทำมุมฉากกับทิศทางที่มีการเปลี่ยนแปลง (Propagation)) สนามไฟฟ้า จะทำมุมกับพื้นผิวของสนามแม่เหล็กในทิศทาง  $\theta$

เมื่อเงื่อนไขที่เป็นไปได้บนส่วนยอดของรูปทรงกรวยเป็นบวก และ ส่วนท้ายของรูปทรงกรวย เป็นค่าลบ เส้นสนามไฟฟ้าจะขยายจากส่วนบนสู่ส่วนล่างของรูปทรงกรวย ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 สายอากาศกรวยแบบไม่จำกัด แสดงส่วนประกอบของพื้นผิว และกระแส (I)

ในพื้นที่ที่อยู่ระหว่างรูปทรงกรวย  $J = 0$ ,  $H = H_\phi \hat{e}_\phi$  และ  $E = E_\phi \hat{e}_\phi$

เมื่อ กฎของแอมแปร์  $\nabla \times H = j\omega \epsilon E + J$  ลดอยู่ในรูป

$$\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta H_\phi) = j\omega \epsilon E_r = 0 \quad (2.29)$$

สำหรับ ตัวแปรร่วม  $r$  และ

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (r H_\phi) = j\omega \epsilon E_\theta \quad (2.30)$$

สำหรับตัวแปรร่วม  $\theta$  จากสมการ 2.29 เราจะเห็นว่า เมื่อ  $\frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta H_\phi) = 0$  ดังนั้น

$$H_\phi \propto \frac{1}{\sin \theta} \quad (2.31)$$

เมื่อ โครงสร้างดูลักษณะจะเป็นวงคลื่น (Spherical wave) ขึ้น เราสามารถที่จะเขียนสมการ 2.31 ได้เป็น

$$H_\phi = H_0 \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \frac{1}{\sin \theta} \quad (2.32)$$

เมื่อแทนค่าของ  $H_\phi$  ที่ได้จาก 2.32 ลงในสมการ 2.30 ก็จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 E_{\theta} &= \frac{-1}{j\omega\epsilon} \frac{1}{r} \frac{H_0}{4\pi \sin\theta} \frac{\partial}{\partial r} (e^{-j\beta r}) = \frac{\beta H_0}{\omega\epsilon} \frac{1}{r} \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi} \frac{1}{r \sin\theta} \\
 &= \eta H_0 \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi} \frac{1}{r \sin\theta}
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

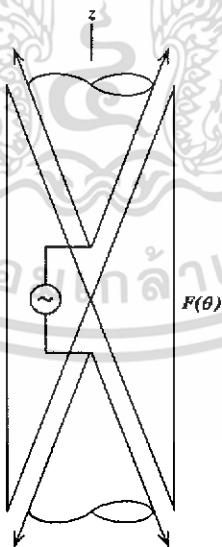
สมการนี้จะลดให้เหลือรูปง่ายๆว่า  $E_{\theta} = \eta H_{\phi}$ , ซึ่งจะทำให้การยืนยันให้เรารู้ว่าคลื่นเป็นแบบ TEM ตัวประกอบร่วมของสนาม จะเปลี่ยนแปลงไป  $1/\sin\theta$  ดังนั้นรูปแบบของการกระจายจะได้เป็น

$$F(\theta) = \frac{\sin\theta_h}{\sin\theta}, \quad \theta_h < \theta < \pi - \theta_h \tag{2.34}$$

ซึ่งเป็นรูปแบบโดยทั่วไปที่รวมกันที่ค่าสูงที่สุดที่เป็นไปได้ของมันบนพื้นผิวของตัวนำ ซึ่งรูปแบบนี้จะทำการแสดงไว้ดังรูปที่ 2.16

ในกรณีที่กำหนด อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) เราจะหา แรงดันปลาย (Terminal Voltage) และ กระแส อ้างอิงตาม รูปที่ 2.15 เราจะเห็นแรงดันถูกพบโดยการรวมไปตามรัศมี  $r$  ที่มีค่าคงที่ ซึ่งจะได้

$$V(r) = \int_{\theta_h}^{\pi - \theta_h} E_{\theta} r d\theta \tag{2.35}$$



รูปที่ 2.16 รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศรวยคู่แบบไม่จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่านี้จะสามารถที่จะแสดงได้ในทุกๆ  $r$  จนกว่าทรงกรวยจะมีพื้นผิวได้ค่าตามที่ต้องการ แทนค่าในสมการที่ 2.33 ลงใน สมการ 2.35 จะได้

$$\begin{aligned} V(r) &= \frac{\eta H_o}{4\pi} e^{-j\beta r} = \int_{\theta_h}^{\pi-\theta_h} \frac{d\theta}{\sin\theta} = \frac{\eta H_o}{4\pi} e^{-j\beta r} \left[ \ln \left| \tan \frac{\theta}{2} \right| \right]_{\theta_h}^{\pi-\theta_h} \\ &= \frac{\eta H_o}{2\pi} e^{-j\beta r} \ln \left( \cot \frac{\theta_h}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.36)$$

เงื่อนไขโดยรอบบน  $H_\phi$  ที่ผิวของตัวนำเป็น  $J_s = H_\phi$  กระแสรวมในรูปทรงกรวยถูกพบว่ารวมอยู่ในความหนาแน่นของกระแส (Current density)  $J_s$  รอบทรงกรวย ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ดังนั้น

$$I(r) = \int_0^{2\pi} H_\phi r \sin\theta d\phi = 2\pi r H_\phi \sin\theta \quad (2.37)$$

แทนค่าในสมการที่ 2.32 ลงในสมการ 2.37 จะได้ว่า

$$I(r) = \frac{H_o}{2} e^{-j\beta r} \quad (2.38)$$

คุณลักษณะตัวอิมพีแดนซ์ ที่จุด  $r$  จากสมการ 2.36 และ 2.38 จะได้ว่า

$$Z_O = \frac{V(r)}{I(r)} = \frac{\eta H_o}{2\pi} \ln \left( \cot \frac{\theta_h}{2} \right) \quad (2.39)$$

เมื่อมันไม่เป็นสมการในรูปแบบของ  $r$  มันก็คือต้องมีอิมพีแดนซ์อยู่ที่อินพุต ( $r = 0$ ) ดังนั้นการใช้  $\eta \approx 120\pi$  ในสมการที่ 2.39 ได้ให้อินพุตอิมพีแดนซ์

$$Z_A = Z_O = 120 \ln \left( \cot \frac{\theta_h}{2} \right) \quad (\Omega) \quad (2.40)$$

สำหรับที่  $\theta_h$  น้อยกว่า 20 องศา

$$Z_A = Z_O \approx 120 \ln \left( \frac{2}{\theta_h} \right) \quad (\Omega) \quad (2.41)$$

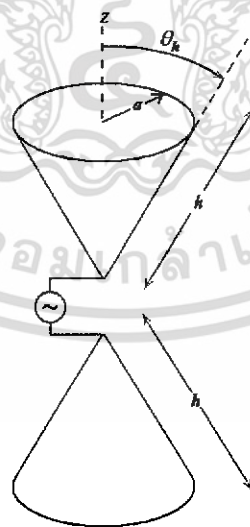
เมื่อ  $\theta_h$  เป็น มุมรัศมี อินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าจริงเพราะ สิ่งนี้มีเฉพาะคลื่นเดินทางที่แท้จริง (Pure traveling wave) เท่านั้น จนกระทั่งโครงสร้างเป็นแบบไม่จำกัด ไม่มีการแสดงออกมาของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุการณ์สะท้อน(cause reflection) ที่ทำให้เกิดคลื่นแนวตั้ง (Standing wave) ในรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะแสดงเป็น ตัวประกอบร่วมสะท้อน (Reactive component) ของค่าอิมพีแดนซ์ (ยกเว้นที่จุดแทรกซ้อน(resonance)) ถ้า  $\theta_h = 1^\circ$ ,  $Z_A = 568 + j0 \Omega$ , ถ้า  $\theta_h = 50^\circ$ ,  $Z_A = 91 + j0 \Omega$

ถ้ารูปทรงกรวยอันหนึ่งถูกกระจายไปทั่วทุกทิศทางจากแผ่นพื้นสมบูรณ์แบบ (Perfect ground Plane) และทรงกรวยอีกอันหนึ่งที่อยู่เหนือพื้นนั้นมีค่าแบบไม่จำกัด ก็จะได้ รูปแบบที่เป็นขั้วเดียว (monopole) นี้เมื่อมี อินพุตอิมพีแดนซ์แบบ โครงสร้าง 2 ทรงกรวยแบบ ไม่จำกัด (infinite bicone) ที่มีรูปทรงกรวยที่ไม่จำกัดเพียงครึ่งเดียว

### 2.2.2 สายอากาศกรวยคู่แบบจำกัด (Finite biconical antenna)

ตัวอย่างของสายอากาศกรวยคู่ สามารถที่จะทำได้โดยการสร้างจุดสิ้นสุดให้กับทรงกรวยทั้ง 2 ของโครงสร้างทรงกรวยคู่แบบไม่จำกัด (Infinite bicone) ซึ่งก็คือ สายอากาศกรวยคู่แบบจำกัด (Finite biconical antenna) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.17 ด้านในของรูปทรงของรัศมี  $h$  รอบสายอากาศ โดยมี คลื่น TEM อยู่ด้วยกันกับ Higher – Order mode สร้างขึ้นที่ปลายของทรงกรวย ซึ่ง Higher – Order mode นี้เป็นตัวกระจายหลักให้กับสายอากาศ Reactance สาเหตุการสะท้อน (Cause Reflection) ที่ปลายของทรงกรวยที่ทำให้เกิดคลื่นแนวตั้ง (Standing wave) ที่นำไปสู่ อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ซับซ้อนขึ้น (Complex input impedance)



รูปที่ 2.17 สายอากาศกรวยคู่แบบจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

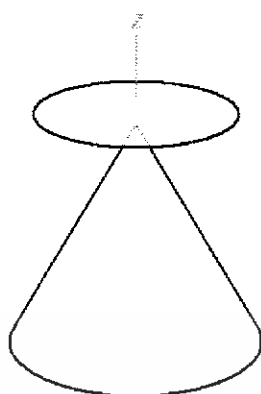
ส่วนที่มีปฏิกิริยาตอบสนอง (Reactive Part) ของอินพุตอิมพีแดนซ์สามารถที่จะมีค่าจากน้อยที่สุดไปจนถึงความกว้างของช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (Progressively wider bandwidth) โดยการเพิ่มค่าของมุม  $\theta_n$  ในรูปที่ 2.17 ณ. เวลาเดียวกันส่วนแท้จริง (Real Part) ของอินพุตอิมพีแดนซ์จะกลายเป็นว่ามีการรับรู้ถึงความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยลง (หรือการเปลี่ยน  $h$  ในรูปที่ 2.17)

รูปแบบของรูปทรงกรวยแบบขั้วเดียว (Conical Monopole) หรือ โครงสร้างกรวยคู่แบบจำกัด (Finite biconical) ที่มุมของทรงกรวยมีขนาดเล็ก จะเหมือนกับ สายอากาศขั้วเดียวแบบดั้งเดิม (Ordinary Monopole) หรือ ไดโพล (dipole) ที่มีขนาดของความยาวเท่ากัน

รูปแบบธรรมดาที่สุดของ สายอากาศกรวยคู่แบบจำกัด (Finite biconical antenna) คือ สายอากาศร่วมแบบ bow-tie (Common "bow-tie" Antenna) (ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อของสายอากาศ bow-tie) ที่นำเสนอในเรื่องของการทำให้มีน้ำหนักน้อยและมีต้นทุนต่ำในการสร้าง แต่จะมีบางอย่างที่อินพุตอิมพีแดนซ์จะสามารถสัมผัสได้ไว้ต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่มากกว่าแบบโครงสร้างทรงกรวยคู่แบบจำกัด

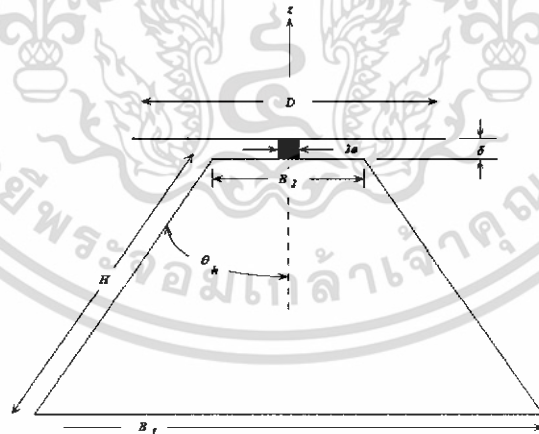
### 2.3 สายอากาศแบบจานกรวย (Discone Antenna)

ถ้าทรงกรวยข้างหนึ่งของสายอากาศกรวยคู่แบบจำกัด (Finite biconical antenna) ถูกแทนที่ด้วยตัวนำแบบรูปทรงเป็นแผ่น (Disk-shaped Ground plane) โครงสร้างก็จะเปลี่ยนเป็นรูปแบบแผ่นกับทรงกรวย (Disk-cone) หรือเรียกว่า สายอากาศแบบจานกรวย (Discone Antenna) จากรูปที่ 2.18 สายอากาศแบบจานกรวยนี้ ถูกค้นพบโดย Kandoian ในปี ค.ศ. 1945 ภายหลังจากการศึกษาการออกแบบการทดลองหลายปี มันใช้สำหรับ Vertical Polarization (แบบเดียวกับ Vertical dipole) และคล้ายกับรูปแบบการครอบคลุมพื้นที่แบบ azimuth (คือ รูปแบบ Omnidirectional รูปแบบจานกรวยนี้ช่วยให้ความพึงพอใจในการใช้งานบนช่วงความถี่กว้าง (Wide frequency range) คือ ออกเตปทั่วไป (Several Octave) ขณะที่พยายามที่จะรักษารูปแบบที่ยอมรับได้ และพื้นที่บริเวณของอิมพีแดนซ์ (Impedance Property)



รูปที่ 2.18 สายอากาศแบบจานกรวย (Discone Antenna)

รูปแบบจานกรวย ถูกสร้างให้เห็นดังรูปที่ 2.19 ตัวเก็บประจุภายนอก (Outer Conductor) ของสายส่ง Coaxial ที่ถูกเชื่อมต่อกับทรงกรวยด้านบน และ ตัวเก็บประจุภายใน (Inner Conductor) ที่สัมผัสกับแผ่น (Ground Plane) ทั้งทรงกรวยและแผ่นจานนี้จะสามารถที่จะเป็นโลหะแข็ง (Solid Metal) หรือ radial wire โดยอุดมคติ รูปแบบระหว่าง Ground Plane และ ทรงกรวย เป็นของ โครงสร้างทรงกรวยคู่แบบไม่จำกัด (Infinite bicone) รูปแบบอสมมาตรไดเรกชันแนล นี้จะเหมาะสมกับการประยุกต์การกระจายสัญญาณ (Broadcast Application)



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างขนาดของสายอากาศแบบจานกรวย

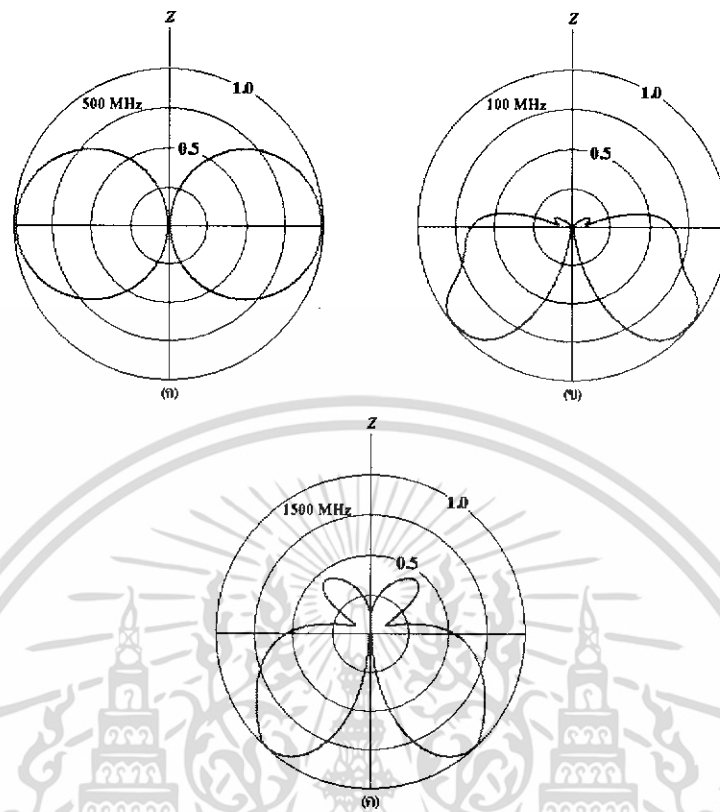
สายอากาศแบบจานกรวยสามารถที่จะออกแบบเพื่อ ผลของการกระจายอิมพีแดนซ์ (Broadband impedance performance) ค่าที่เหมาะสม  $50 \Omega$  ขณะที่การรักษาการยอมรับรูปแบบที่จะ แสดงออกมาด้วยความถี่ ขนาดที่เหมาะสมของค่าความถี่กลาง (Typical center frequency) คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$H = 0.7\lambda$ ,  $B = 0.6\lambda$ ,  $D = 0.4\lambda$ ,  $\theta_h = 25^\circ$  และ  $\delta \ll D$  ตัวอย่าง โครงสร้างจานกรวยกับรูปแบบของรูป 2.20 มี Center Frequency ที่ 1 GHz ( $\lambda = 30$  cm) ดังนั้นที่ 1 GHz,  $H = 21.3$ cm =  $0.71\lambda$ ,  $B = 19.3$ cm =  $0.64\lambda$ , และ  $\theta_h \approx \sin^{-1} [(B/2)/H] = 27^\circ$  Nail ได้ให้การออกแบบค่าที่สูงสุดของสมการโดยให้  $D = 0.7B$  และ  $\delta = 0.3B_2$  โดยสมการเป็นอิสระต่อค่าของ  $H$  และ  $\theta_h$

รูปแบบที่แสดงบน ความกว้างของช่องสัญญาณ 3:1 แสดงไว้ในรูปที่ 2.20 ที่ความถี่ต่ำ โครงสร้างที่มีความสัมพันธ์ขนาดเล็กกับความยาวคลื่น (Wavelength) และรูปแบบที่ไม่ได้แตกต่างกันมากนักจากไดโพลสั้น (Short Dipole) จากรูป 2.20 (ก) จากการที่ความถี่เพิ่มขึ้นขนาดของไฟฟ้าของ ground plane เพิ่มขึ้น และ รูปแบบถูกจำกัดมากขึ้นให้ได้ต่ำกว่าครึ่งของช่องว่าง (Half-Space) คูได้จากรูปที่ 2.20 (ข) สำหรับการเพิ่มความถี่ขึ้นไปอีก ลักษณะของสายอากาศที่จะแสดงออกมาที่โครงสร้างแบบไม่จำกัด ตัวอย่างเช่น ที่ 1500MHz รูปแบบตามรูปที่ 2.20 (ค) จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแบบขั้วเดียว (monopole) ของ สายอากาศกรวยแบบไม่จำกัด (Infinite biconical antenna) ในรูปที่ 2.15

การวัดของ Several disk parameter  $D$  และ ช่องว่างระหว่างรูปทรงกรวย  $\delta$  แสดงให้เห็นว่ารูปแบบเหล่านั้นไม่รู้สึกลึงต่อค่าของ parameter เหล่านี้เท่าไรนัก

จากสมการของ Nail ที่ต้องการให้ได้แบบที่มีค่าสูงสุด ที่  $B_2 \approx \lambda_c/75$  ที่ค่าความถี่ที่ใช้ที่สูงสุดของสายอากาศ และ  $\delta \ll D$  สำหรับค่าที่ใหญ่ที่สุดของ  $B_2$  และ  $\delta \approx 0.5B_2$  ที่ถูกพบว่าเป็นสมการของ Nail ต้องการที่จะให้แจ้งเมื่อ N - Connector ถูกใช้ระหว่าง ขอบ (skirt) และ จาน (disk) ในกรณีนี้  $\delta = 0.5B_2$ ,  $2a = 0.33 B_2$ ,  $D = 0.75B_1$ ,  $L = 1.15\lambda_c$  ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการวัดผลการทดลอง ที่ VSWR ต่ำกว่า 1.5:1 ของ Octave bandwidth ที่ง่ายต่อการให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของ yields  $45^\circ < 2\theta_h < 75^\circ$



รูปที่ 2.20 แพทเทอรันการวัดของสายอากาศแบบจานกรวย

## 2.4 สายอากาศ Bow – tie (Bow – tie Antennas)

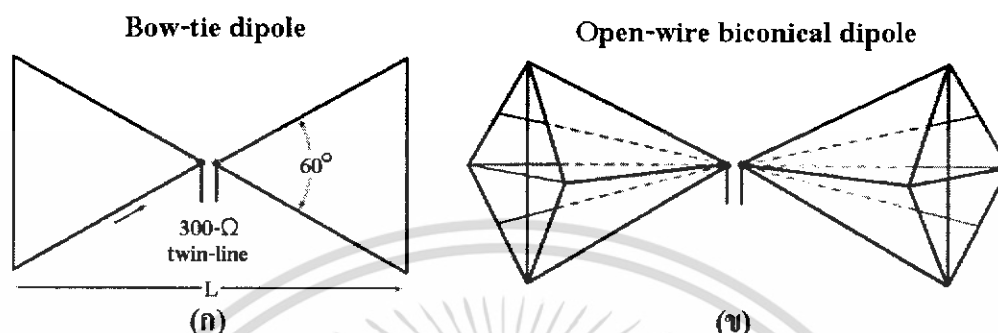
สายอากาศ Bow – tie มีรูปแบบมาจากสายอากาศโครงสร้างทรงกรวยคู่ สายอากาศที่เป็นในรูปแบบนี้มีมุม 60 องศา ให้ค่า VSWR มากกว่า 2 เกิน 2 ถึง 1 แบนด์วิธของ  $L = 0.8\lambda$  ที่ Center frequency มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับผิวหน้าของทรงกรวย

ผลลัพธ์ของสายอากาศแบบทรงกรวยและสายอากาศแบบสามเหลี่ยม จะถูกออกแบบให้ประชิดกับระนาบสร้างเงา (Ground plane) ซึ่งมีความยาว  $1\lambda$  (หรือความสูง) เมื่อมุมของกรวยเท่ากับ 30, 60 และ 90 องศา แม้จะทำการวัดทรงกรวยที่มีขอบเขตไม่แน่นอน ความแตกต่างที่น่าสนใจในค่าความต้านทานเพราะว่ากรวยทำมุม 60 องศา อัตราขยายของสายอากาศจะเกี่ยวกับกรวยไดโพลที่มีความยาว  $21\lambda$  มาจากความสัมพันธ์  $\lambda/2$  ของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น อัตราขยายของสายอากาศสามารถได้มาจากการวัดแพทเทอรัน

แม้ว่าสายอากาศแบบกรวยจะมีความต้านทานที่ไม่แน่นอนกว่าสายอากาศแบบสามเหลี่ยม การออกแบบสายอากาศแบบสามเหลี่ยมแผ่นเรียบก็มีความน่าสนใจ การแสดงการวัดสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bow – tie ที่มีความยาว 34 เซนติเมตร เชื่อมต่อกับสายความต้านทานคู่ ที่ระหว่างความถี่ 480 ถึง 900 MHz (UHF TV ช่อง 15 ถึง 83) แสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 สายอากาศ Bow-tie แบบแผ่น (ก)  
และสายอากาศไดโพลโครงสร้างกรวยแบบสายเปิด (ข)

สายอากาศ Bow – tie เป็นส่วนประกอบสำหรับการสื่อสาร UHF (Ultra High Frequency) ของโทรทัศน์ มันจึงถูกใช้เป็นสายอากาศรับสัญญาณ โดยต่อเข้ากับสายกริด (Grid) และข้างหลังต่อเข้ากับระบบสร้างเงา เพื่อลดโลบหลัง (การสะท้อนของคลื่น)

## 2.5 สายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Antenna)

สายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูกลับหัวได้พัฒนามาจากสายอากาศ Bow – tie ซึ่งได้กล่าวไปในหัวข้อที่แล้ว นอกจากนั้นสายอากาศ Bow – tie ยังมีรูปแบบการชี้ทิศทางของสายอากาศสองทิศทาง พร้อมกับมีบีมหลักที่กว้างเป็นเส้นตั้งฉากกับแนวของสายอากาศ และแพร่กระจายสัญญาณไปในทิศทางเดียว

สายอากาศ Bow – tie เป็นส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับการสื่อสาร UHF (Ultra – High Frequency) ของทีวีมาก่อน มันถูกใช้เป็นสายอากาศรับสัญญาณ โดยต่อเข้ากับสายกริด และข้างหลังต่อเข้ากับระบบสร้างเงา เพื่อลดโลบหลัง

สายอากาศ Bow – tie ส่วนใหญ่ถูกใช้กับความถี่สูงต่อมาได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้น โดยให้มีคุณสมบัติที่เป็นสายอากาศบอร์คแบนด์สี่เหลี่ยมคางหมู หรือสายอากาศโมนโพลาร์ (Monopolar)

### 2.5.1 ลักษณะของสายอากาศ สี่เหลี่ยมคางหมู

สิ่งที่ต้องการพื้นฐานของการออกแบบสายอากาศอุตสาหกรรมไวต์แบนด์ที่เหมาะสมคือ

- การตอบสนองความถี่ของเทคโนโลยีอุตสาหกรรมไวต์แบนด์
- ไม่เกิดการกระจายของสัญญาณ , ประจุไฟฟ้ามีขนาดเล็ก
- ทำการกรองสัญญาณสำหรับสัญญาณที่ผิดเพี้ยน
- รูปแบบการแพร่กระจายที่ทิศทางมีสองทิศทาง
- มีขนาดเล็ก
- ต้นทุนต่ำ

สายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูกลับหัวเป็นสายอากาศแบบเดี่ยว (Single) มีรูปแบบขนาดเล็กและไม่ซับซ้อนสามารถที่จะสร้างแบนด์วิดท์กว้างสำหรับใช้งานครอบคลุมของความถี่ของ ความถี่ สำหรับแบบพกพาสายอากาศจะถูกออกแบบให้ประจุไฟฟ้ามีขนาดเล็กแบนด์วิดท์สายอากาศที่ใหญ่กว่า ซึ่งโดยปกติจะใช้ในระบบเรดาร์ (Radar) แบบธรรมดาและแสดงการกระจายที่สูงมาก ๆ หรือตำแหน่งสำหรับให้เรดาร์ตลอดทะเลพื้นผิว โดยกำหนดให้ความถี่มีลักษณะเป็นอิสระ พารามิเตอร์, อัตราขยายและรูปแบบการแพร่กระจายในปกติความถี่ของความถี่จะไม่แกว่งมากเกินไป

ในกรณีที่มีอิมพีแดนซ์แมตซ์ซิ่ง และประสิทธิภาพการแพร่กระจายสูงจะต้องได้รับแบนด์วิดท์ทั้งหมดในการรับสัญญาณจะต้องเป็นที่น่าพอใจที่ยอมรับได้ และการทำงานมีการใช้กำลังงานต่ำในการทำงานเดียวกันต้องให้ผลตอบสนองเฟส เชิงเส้น สำหรับประสิทธิภาพการทำงาน

สายอากาศคางหมูเป็นวิธีที่ได้มาจากสายอากาศแบบกรวย (Conical) ด้วยรูปแบบที่ใกล้เคียงกันวิเคราะห์ความเป็นไปได้แตกต่างกันเพียงส่วนเดียวในระนาบของแผ่นโลหะรูปสามเหลี่ยมจะขนานกับระนาบเงารูปตัว L ที่นอนไปในระนาบพื้นราบโพลาไรเซชันลิเนีย (Linear polarization) โดยจัดให้เข้ากับมุมของสายอากาศที่จะทำให้โคเรคทีวิตีเพิ่มขึ้น และลดโลบข้างด้วยเหตุนี้สามารถแสดงให้เข้าใจในทอมของอินพุตอิมพีแดนซ์ และรูปแบบการแพร่กระจายเป็นในลักษณะการทดลองตามทฤษฎี จากข้อมูลนี้จะกำหนดพารามิเตอร์ในการออกแบบสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู พารามิเตอร์เป็นอิมพีแดนซ์ฐานกว้าง และการเว้นช่องว่างของช่องสายอากาศของการปิดอิมพีแดนซ์ฐานกว้างจะควบคุมอิมพีแดนซ์ที่เกินความถี่อิมพีแดนซ์ ความถี่สูงจะเหมือนกับความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance) การเว้นช่องเปิดของสายอากาศของพีคเหมือนกับสนับสนุนให้เกิดผลบวมอิมพีแดนซ์แมตซ์ซิ่งของสายอากาศ จากการวิเคราะห์นี้สามารถจะออกแบบสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูให้เป็นผลสำเร็จ และเหมาะกับการใช้งานในระบบสัญญาณวิทยุแบนด์ได้

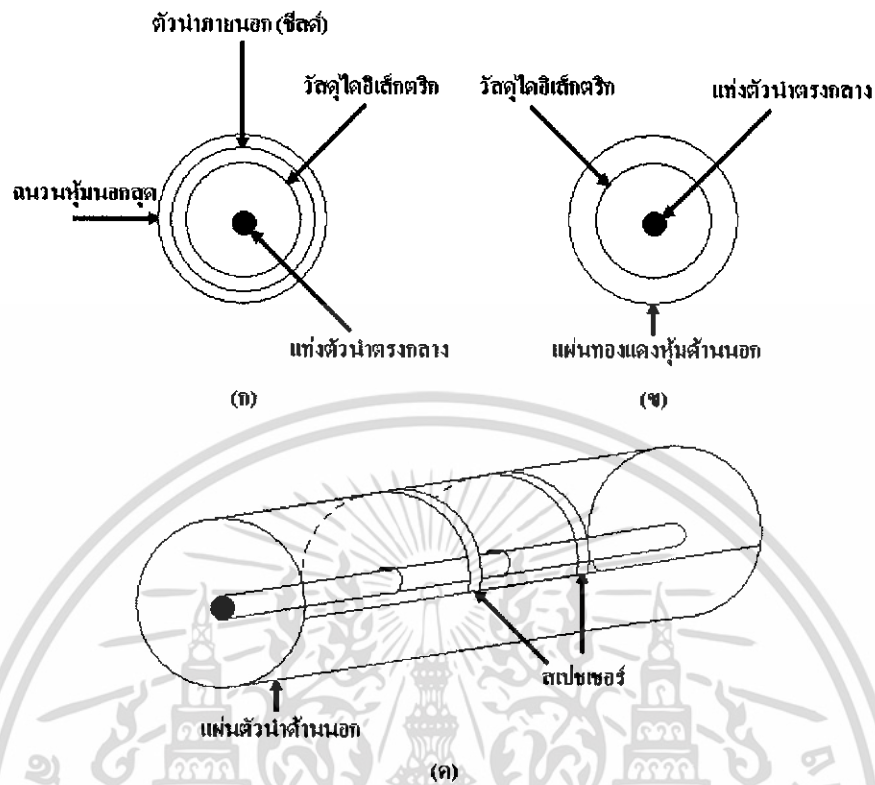
## 2.6 การใช้งานสายโคแอกเชียล (Coaxial)

สายโคแอกเชียลสามารถใช้งานได้ถึงความถี่ขึ้นไปถึง 100 GHz และสามารถแบ่งออกตามลักษณะโครงสร้างได้เป็นสายแบบสามารถงอได้ (Flexible) แบบกึ่งแข็ง (Semirigid) และแบบแข็ง (Rigid)

สายโคแอกเชียลแบบสามารถงอได้ ประกอบด้วยสารไดอิเล็กตริกที่สามารถยืดหยุ่นได้ โดยที่ด้านนอกสุดหุ้มไว้ด้วยฉนวนคงรูป 2.22 (ก) ตัวนำภายนอกซึ่งทำหน้าที่ชิลด์สัญญาณด้วยนี้จะสามารถใช้เป็นร่างแหกสแกนของขดลวดตัวนำเส้นเล็ก ๆ ชั้นเดียวหรือประกอบกันหลายชั้น ล้อมรอบก็ได้ ยิ่งประกอบกันหลายชั้น (Multilayer) ก็ยิ่งทำให้การชิลด์สัญญาณดีขึ้นตามไปด้วย โคแอกเชียลแบบนี้มีให้เลือกใช้หลายขนาด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.20 ถึง 2.54 เซนติเมตร และมีค่าคาแรคเตอร์ริสติกพีแดนซ์ ให้เลือกหลายค่าคือ 50, 75, 95 และ 125  $\Omega$  ค่ามาตรฐานที่ใช้กันคือ 50  $\Omega$  สายชนิดนี้แม้จะยืดหยุ่นได้ดี แต่สามารถโค้งงอได้รูปได้พอประมาณ ถ้าดัดโค้งงอมากเกินไป จิดจำกัดที่จะกระทำได้ จะทำให้สายเกิดความเสียหายได้

สายโคแอกเชียลแบบกึ่งแข็ง นี้จะแตกต่างจากสายแบบที่สามารถงอได้ ตรงที่ตัวนำภายนอกเป็นท่อทรงกระบอกคงรูปที่ 2.22 (ข) สายแบบนี้นิยมต่อใช้งานช่วงความยาวสั้น ๆ ระหว่างอุปกรณ์ ใช้งานที่ติดตั้งอย่างถาวร สามารถดัดโค้งเปลี่ยนรูปได้เล็กน้อย ซึ่งเป็นการดัดให้เข้าที่ตามตำแหน่งที่ควรเช่นนี้มากกว่าจะใช้โค้งงอไปมาใช้ไม่ประจำถาวรเหมือนสายแบบที่สามารถโค้งงอได้ เนื่องจากสายแบบกึ่งแข็งนี้มีตัวนำภายนอกเป็นแผ่นเดียวกัน จึงเป็นการชิลด์สัญญาณได้ดีกว่าสายแบบที่สามารถโค้งงอได้

สายโคแอกเชียลแบบแข็ง สายชนิดนี้จะมีรูปทรงแข็งเพราะตัวนำภายนอกเป็นวัสดุแข็ง จึงไม่สามารถดัดโค้งงอได้เลย ใช้อากาศเป็นสารไดอิเล็กตริก และมีสเปซเซอร์ค้ำแท่งตัวนำภายในให้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางอยู่เป็นช่วง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ค)



รูปที่ 2.22 (ก) สายแบบสามารถงอได้ (Flexible), (ข) แบบกึ่งแข็ง (Semirigid), (ค) แบบแข็ง (Rigid)

การใช้งานสายโคแอกเซียลมีข้อจำกัดในเรื่องความถี่ใช้งาน เนื่องจากว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น เส้นผ่าศูนย์กลางของสายโคแอกเซียลจะต้องลดลงเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการแพร่กระจายในโหมดที่สูงกว่า ขนาดของสายจึงถูกจำกัดไว้เพื่อไม่ให้เกิดไฮเออร์ออร์เดอร์โหมด โดยมีจุดเปลี่ยนอยู่ ความถี่คutoff ของสายขนาดนั้น ๆ การที่ต้องใช้สายโคแอกเซียลที่เล็กลงเช่นนี้ จะทำให้สามารถทนกำลังงานไฟฟ้าได้น้อยลงด้วย ค่าการลดทอนคลื่นสัญญาณต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายจะเพิ่มขึ้นเพราะสกินเอฟเฟกต์ที่มีผลกระทบมากขึ้น เมื่อสายมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงมักนิยมใช้สายโคแอกเซียลรับคลื่นสัญญาณในช่วงสั้น ๆ หรือระยะใกล้ ๆ (Short length) ที่ความถี่สูงเพราะค่าลดทอนกำลังจะไม่มีผลมากนักถ้าใช้ในระยะเวลาใกล้

การเลือกสายโคแอกเซียลจะพิจารณาเกี่ยวกับคาเรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์, ย่านความถี่ที่สามารถใช้งาน (พิจารณาจากความถี่คutoff), การทนกำลังงานไฟฟ้าของสาย, ค่าแรงดันเบรคดาวน์ (ค่าแรงดันที่สามารถทำลายต่อสายได้), การเลือกชนิดสายเพื่อประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสมตามสภาพการใช้ (จะเลือกสายแบบสามารถงอได้ แบบกึ่งแข็ง หรือแบบแข็ง) ค่าการลดทอนกำลัง, ฟิลด์คาเรคเตอร์ิสติก และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.1 ตารางแสดงการลดทอนกำลังไฟฟ้าของสายโคแอกเซียลชนิดต่าง ๆ

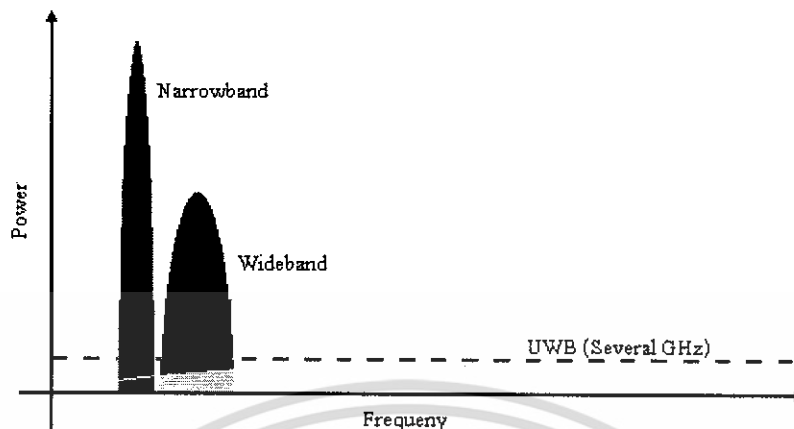
ค่าการลดทอนวัดเป็น dB/เมตร				
	1 GHz	3 GHz	5 GHz	10 GHz
RG-58	0.667	1.37	-	-
RG-196	1.50	2.60	3.83	5.73
RG-214	0.300	0.633	0.933	1.57

ค่าการลดทอนกำลังงานไฟฟ้าสำหรับสายโคแอกเซียลนั้นขึ้นกับว่าสายนั้นมีความสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้าไปมากน้อยเพียงใด ซึ่งการสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้าไปมากน้อยเพียงใดซึ่งการสูญเสียสภาพการเป็นตัวนำไฟฟ้า (Conductive loss) ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น ขนาดของตัวนำ, สกินเอฟเฟกต์ และความสูญเสียทางสารไดอิเล็กตริก ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคาเรคเตอร์สติกของวัสดุที่นำมาใช้เป็นสารไดอิเล็กตริกภายในสาย ค่าการลดทอนเหล่านี้สามารถหาได้จากเอกสารข้อมูลทางเทคนิคของสาย ซึ่งจะบอกความสูญเสียหรือค่าลดทอนในหน่วย dB ต่อหนึ่งหน่วยความยาวซึ่งเป็นเมตร หรือฟุต หรือหน่วยความยาวอื่นก็ได้ และจากตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นตัวอย่างให้เห็นกันนั้น จะพบว่าต้องระบุนความถี่ที่นำมาด้วย เพราะการลดทอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นด้วย

## 2.7 เทคโนโลยีอุลตราไวด์แบนด์

อุลตราไวด์แบนด์ (UWB) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายรูปแบบใหม่ที่ได้รับการสนับสนุนจากกลุ่มพันธมิตร MBOA (MultiBand OFDM Alliance) ที่ได้เริ่มก่อตั้งเมื่อเดือนมิถุนายน 2003 และปัจจุบันมีสมาชิกมากกว่า 50 รายนำโดย Texas Instruments (TI), Intel, Samsung Electronics, Mitsubishi Electric, Nokia, Sony และ Infineon Technologies เป็นต้น โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีดังกล่าวจะแตกต่างจากเทคโนโลยีไร้สายที่มีอยู่ในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็น Wi-Fi หรือ บลูทูธ (Bluetooth) ที่เป็นการส่งผ่านคลื่นวิทยุความถี่แคบ ขณะที่อุลตราไวด์แบนด์จะเป็นการส่งผ่านข้อมูลแบบพัลส์ (Pulse) สั้นๆ ผ่านคลื่นวิทยุความถี่กว้าง ทำให้สามารถถ่ายโอนข้อมูลจำนวนมากได้ในระยะทางสั้นๆ แต่กลับใช้พลังงานในระดับต่ำเพียง 0.0001 มิลลิวัตต์ต่อเมกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 เปรียบเทียบแบนด์วิธของอุลตราไวด์แบนด์กับคลื่นชนิดอื่น

นอกจากนี้ ภายในระยะทาง 10 เมตร อุลตราไวด์แบนด์ ยังสนับสนุนการสร้างพื้นที่โครงข่ายส่วนบุคคลที่เรียกว่า Personal Area Network (PAN) ซึ่งช่วยให้เราสามารถจัดการข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ที่เคลื่อนที่ไปมาได้อย่างหลากหลายและนอกเหนือจากคุณสมบัติข้างต้นแล้ว อุลตราไวด์แบนด์ หนึ่งในฐานะเทคโนโลยีที่สามารถใช้ประสิทธิภาพของคลื่นความถี่ได้คุ้มค่าที่สุดโดย FCC (Federal Communications Commission) หรือคณะกรรมการบริหารความถี่ของสหรัฐอเมริกา ตั้งความหวังไว้ว่า อุลตราไวด์แบนด์ จะเข้ามาช่วยลดปัญหาความขาดแคลนของช่องสัญญาณที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต เนื่องจากการแบ่งสรรช่วงความถี่ในปัจจุบัน จะมีการกำหนดความถี่คลื่นสูงสุด และต่ำสุด และจะต้องมีคลื่นความถี่อีกช่วงหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนป้องกันไม่ให้คลื่นในแต่ละย่านความถี่รบกวนซึ่งกันและกัน ปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้ทุกครั้งที่มีการจัดย่านความถี่ใหม่ ก็จะมีช่วงความถี่ที่ต้องสูญเสียไปมากขึ้นด้วย

เทคโนโลยี อุลตราไวด์แบนด์ ได้รับการกำหนดให้อยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15.3a โดยมีย่านความถี่ที่ถูกกำหนดโดย FCC อยู่ที่ 3.1 - 10.6 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่เดียวกันกับการสื่อสารผ่านดาวเทียม ทั้งนี้ การกำหนดความถี่ในย่านดังกล่าวจะช่วยป้องกันปัญหาการรบกวนของสัญญาณวิทยุกับเทคโนโลยีสื่อสารภาคพื้นอื่นๆ ที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีดังกล่าวเคยถูกห้ามนำมาใช้งานในช่วงระยะเวลาหนึ่ง อันเนื่องมาจากในช่วงแรกเทคโนโลยีดังกล่าวได้รับการพัฒนาเพื่อการใช้งานในหน่วยงานทางทหารของสหรัฐอเมริกา รวมถึงความกังวลอันเนื่องมาจากความถี่ของ อุลตราไวด์แบนด์ ที่แตกต่างจากความถี่วิทยุทั่วไป ซึ่งได้ส่งผลให้หลายฝ่ายกังวลว่า อุลตราไวด์แบนด์ จะไปรบกวนระบบสื่อสารที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน อย่างระบบ Global Positioning System (GPS), ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ และระบบการบิน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.1 คุณสมบัติของอุลตราไวต์แบนด์

ทั้งนี้ หากเราเปรียบเทียบ อุลตราไวต์แบนด์ กับเทคโนโลยีอย่าง Wi-Fi หรือ บลูทูธ แล้วก็จะพบว่า อุลตราไวต์แบนด์ มีประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคโนโลยีดังกล่าวทั้งด้านความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูล, การใช้พลังงานที่ต่ำ รวมถึงความสามารถในการรับส่งข้อมูลทะลุทะลวงผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ โดย อุลตราไวต์แบนด์ จะมีความเร็วในการรับ - ส่งข้อมูลสูงสุดถึง 480 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 2 เมตรและความเร็ว 110 Mbps ที่ระยะทางประมาณ 10 เมตร ขณะที่ Wi-Fi สามารถรับส่งข้อมูลสูงสุดที่ 54Mbps และหากเปรียบเทียบกับ Bluetooth ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมสำหรับเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลในปัจจุบัน อุลตราไวต์แบนด์ จะให้ความสามารถในการรับส่งข้อมูลสูงกว่า บลูทูธ ถึง 100 เท่าเลยทีเดียว ซึ่งด้วยความเร็วในระดับดังกล่าว อุลตราไวต์แบนด์ จึงเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ประเภท โฮมเอนเตอร์เทนเมนต์ภายในบ้าน โดยตัวอย่างที่เราจะเห็นได้ในอนาคตอันใกล้ก็คือ การที่โทรทัศน์สามารถส่งรายการไปยังหน้าจอโทรทัศน์เครื่องอื่นๆ ได้แบบไร้สายโดยไม่มีปัญหาการกระตุกของสัญญาณภาพ, การเชื่อมต่อเพื่อถ่ายโอนภาพจากกล้องวิดีโอไปยังคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย และหากเป็นการใช้งานภายในสำนักงาน อุลตราไวต์แบนด์ ก็จะเข้ามาช่วยลดความยุ่งยากในการติดตั้งสายเคเบิลต่างๆ ได้เป็นอย่างมาก

จากที่กล่าวมา สามารถสรุปคุณสมบัติของเทคโนโลยีอุลตราไวต์แบนด์ได้ดังต่อไปนี้

- มีแบนด์วิดท์ขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความถี่ต่ำ
- มีอัตราการขยายสูง
- ไม่รบกวนการทำงานของระบบอื่น
- โอกาสที่ตรวจพบหรือสกัดกันต่ำ
- ใช้พลังงานต่ำ

### 2.7.2 การนำไปใช้งานของระบบสื่อสารอุลตราไวต์แบนด์

อุลตราไวต์แบนด์ใช้ในเทคนิคที่ทำให้แบนด์วิดท์กว้าง การสื่อสารอุลตราไวต์แบนด์เชื่อมต่อจึงกลายเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ แบนด์วิดท์ที่นำมาใช้ที่เปรียบเทียบกับความถี่ต่ำ โดยจะให้น้อยลงเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในอาคาร เป็นความสำคัญของการส่งของอุลตราไวต์แบนด์สำหรับทำให้คลื่นมีขนาดเล็กลงแต่มีแบนด์วิดท์สูง โดยใช้พลังงานที่ต่ำในส่วนของ การสูญเสีย (losses) ก็จะทำให้เกิดน้อยที่สุดและต้องการที่จะแพร่กำลังงาน

อุลตราไวต์แบนด์สามารถทำงานในระดับที่มีการรบกวนสูงได้โดยส่งข้อมูลระดับที่มีการขยาย คุณสมบัติของการแพร่กระจายกำลังงานต่ำและแบนด์วิดท์ของสัญญาณกว้างเป็นผลให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของกำลังงานต่ำของสัญญาณอุตราไวล์แบนด์ ด้วยวิธีนี้คลื่นวิทยุอุตราไวล์แบนด์ จึงสามารถทำงานในสเปกตรัมเดียวกันกับคลื่นวิทยุแเนโรแบนด์ได้โดยไม่รบกวนกัน

ทำการจำกัดหรือลดโลบที่ไม่ต้องการในส่วนของความห่างของอาเรย์สายอากาศเมื่อใช้ ร่วมกับการส่งแบบแเนโรแบนด์ และรวมไปกับรูปคลื่น (Waveform) ของอุตราไวล์แบนด์ ด้วย เหตุนี้จึงใช้สเปกตรัมได้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุดเหมือนกับการนำสเปกตรัมกลับมาใช้อีกครั้งหนึ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบ และสร้างสายอากาศแถบกว้าง

#### 3.1 สายอากาศกรวยคู่

ในการออกแบบสายอากาศกรวยคู่ นั้น ขั้นตอนแรกจะต้องมีการกำหนด หรือคำนวณหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบก่อนจากนั้นจึงทำการออกแบบสายอากาศกรวยคู่แล้วจึงค่อยนำไปสู่กระบวนการสร้างสายอากาศกรวยคู่

##### 3.1.1 การกำหนดช่วงความถี่ที่ใช้งาน

เนื่องจากสายอากาศกรวยคู่เป็นสายอากาศแถบความถี่กว้าง จึงต้องกำหนดช่วงความถี่ที่ใช้งานให้เหมาะสมกับงานที่ใช้ โดยในโครงนี้ต้องการสายอากาศที่ทำงานที่ความถี่ 3.1 - 10.6 GHz

##### 3.1.2 การกำหนดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่

ในการกำหนดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรวยคู่ นั้น เพื่อให้เหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่ต่อกับสายอากาศ และยังเป็นตัวกำหนดคงคาของกรวยสายอากาศทรงกรวยคู่

ซึ่งในโครงงานนี้ใช้สายที่ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50 \Omega$  ดังนั้นจึงได้ลักษณะความต้านทานของสายอากาศเท่ากับ  $50 \Omega$  ด้วยเพื่อให้เหมาะสมกัน การที่กำหนดค่าอิมพีแดนซ์ให้เท่ากับ  $50 \Omega$  จะทำให้สายอากาศกรวยคู่มี  $\lambda/4$  หรือทำมุมสายอากาศประมาณ 60 องศา

##### 3.1.3 คำนวณหาความยาวคลื่น

ในการคำนวณหาความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) เพื่อนำมาหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยของสายอากาศทรงกรวยคู่เพราะจะกำหนดให้สายอากาศมีความกว้างเท่ากับความยาวครึ่งคลื่นหรือ ( $\lambda/4$ ) ซึ่งจะหาความยาวคลื่นได้จากสูตร

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

เมื่อ  $c$  คือ ค่าความเร็วของคลื่นมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$

$f$  คือ ค่าความถี่ซึ่งจะกำหนดค่าความถี่ต่ำสุดที่จำใช้งาน เท่ากับ 3.1 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

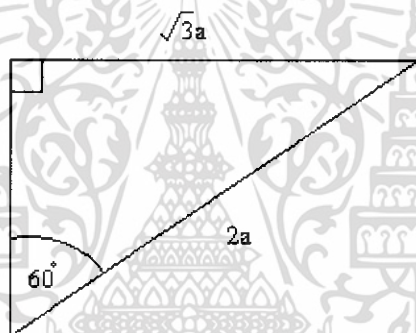
ดังนั้นจะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{3.1 \times 10^9} = 0.0967 \text{ (เมตร)}$$

ดังนั้น จึงเท่ากับ 48.38 มิลลิเมตร ซึ่งก็คือเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศทรงกรวยคู่

### 3.1.4 คำนวณหาความสูงของกรวยของสายอากาศกรวยคู่

จากหัวข้อที่ 3.1.2 และ 3.1.3 เราจะได้มุมของสายอากาศ และเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศซึ่งเราจะนำค่าพวกนี้มาทำการคำนวณหาความสูงของกรวยโดยใช้สูตรเรขาคณิตของรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก แสดงดังรูป



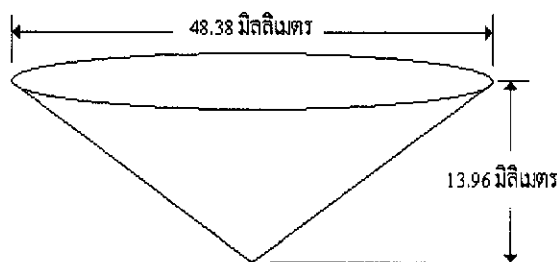
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ความยาวแต่ละด้านของรูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่มี  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  และ  $90^\circ$

เนื่องจากเราได้เส้นผ่านศูนย์กลางจากหัวข้อที่ 3.1.3 เท่ากับ 48.38 มิลลิเมตรแต่สามเหลี่ยมด้าน  $\sqrt{3}a$  ในรูปที่ 3.1 นั้นเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของโคนเท่านั้นจึงมีค่าเท่ากับ  $48.38 / 2 = 24.19$  ดังนั้นเมื่อกำหนดให้

$$\sqrt{3}a = 24.19$$

$$a = \frac{24.19}{\sqrt{3}}$$

ก็จะได้  $a = 13.966$  มิลลิเมตร ซึ่งก็คือ ค่าความสูงของกรวยนั่นเอง



รูปที่ 3.2 ขนาดของกรวยที่ออกแบบ

### 3.1.5 กระบวนการสร้างสายอากาศกรวยคู่

หลังจากที่ได้ขนาดของทรงกรวยของสายอากาศทรงกรวยคู่ที่ได้จากการคำนวณแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างสายอากาศ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

#### 3.1.5.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์

การทำสายอากาศทรงกรวยคู่จะต้องมาทำแม่พิมพ์รูปทรงกรวยขึ้นมาก่อน หลังจากนั้นค่อยนำเอาแผ่นทองแดงมาขึ้นรูปอีกทีหนึ่ง โดยจะใช้วัสดุและอุปกรณ์ดังนี้

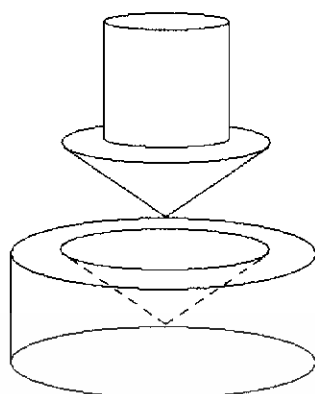
- แผ่นทองแดงซึ่งมีขนาดหน้าประมาณ 0.5 มิลลิเมตร
- แม่พิมพ์เหล็กที่ใช้ขึ้นรูปสายอากาศ
- สาย Semi-rigid ที่มีค่าความต้านทาน 50 โอห์ม
- คอนเน็คเตอร์
- กรรไกรสำหรับตัดแผ่นโลหะ
- ตะกั่วสำหรับบัดกรี
- หัวแร้งที่ใช้สำหรับบัดกรี
- ตะไบและกระดาษทรายที่ใช้สำหรับตกแต่งขอบของสายอากาศ

#### 3.1.5.2 การทำแม่พิมพ์สายอากาศ

การทำแม่พิมพ์สายอากาศกรวยคู่จะประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนที่เป็นเขี้ยวรับกับส่วนที่เป็นแท่นอัด ซึ่งในส่วนที่เป็นตัวเขี้ยวจะนำเพราะเหล็กมากถึงให้เว้าเข้าไป โดยจะกลึงตามขนาดของทรงกรวยที่เราออกแบบเอาไว้

ในส่วนของแท่นอัดก็จะนำเพราะเหล็กมากถึงให้ได้ตามขนาดที่คำนวณไว้ แต่จะแตกต่างกันที่แท่นอัดนั้นจะไม่กลึงเข้าไปข้างในเพราะเหล็ก ดังรูป 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

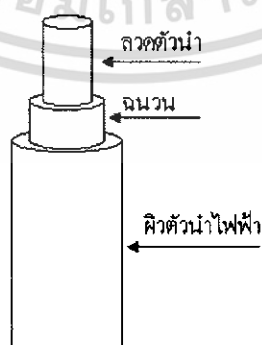


รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์กรวยของสายอากาศ

### 3.1.5.3 การสร้างสายอากาศกรวยคู่

จากการทำแม่พิมพ์สายอากาศเสร็จแล้วกระบวนการต่อไปคือการขึ้นรูปและสร้างสายอากาศ มีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

1. นำแผ่นทองแดงที่มีขนาดความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร มาตัดให้มีขนาดพอประมาณกับแม่พิมพ์สายอากาศ
2. นำแผ่นทองแดงที่ตัดมาแล้วมาขึ้นรูปโดยการวางไว้ระหว่างแท่นอัลสับบาร์ที่ติดต่อกับเครื่องปั๊มแผ่นโลหะ ซึ่งขั้นตอนนี้ต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมาก เพราะถ้าปั๊มแรงไปอาจจะทำให้แผ่นทองแดงฉีกขาด
3. นำแผ่นทองแดงรูปทรงกรวยที่ได้มาทำการตกแต่งขอบให้เรียบร้อย โดยการใช้ตะไบและกระดาษทรายขัด
4. ตัดสาย Semi-rigid ให้มีขนาดยาว 14 เซนติเมตร

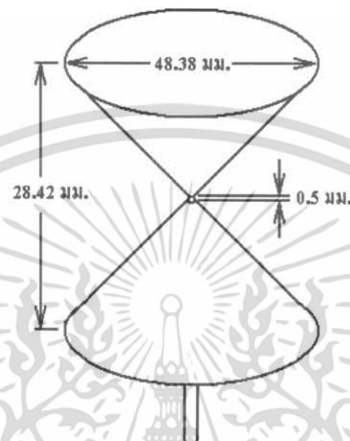


รูปที่ 3.4 สาย Semi-rigid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำแผ่นทองแดงที่ขึ้นรูปมาแล้วมาทำการเจาะรู โดยทรงกรวยแรกเจาะที่ปลายด้านบนเจาะรูให้มีขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร ส่วนกรวยที่สองเจาะรูให้มีขนาดประมาณ 0.5 มิลลิเมตร

6. นำแผ่นทองแดงทรงกรวยทั้งสองมาประกอบเข้าสาย Semi-rigid ด้วยการบัดกรี



รูปที่ 3.5 แบบสายอากาศกรวยคู่ที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 3.6 สายอากาศกรวยคู่ที่ทำเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบสายอากาศแบบจานกรวย

โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบจานกรวย จะคล้ายกับการออกแบบทรงกรวยคู่ ส่วนโครงสร้างก็เปลี่ยนรูปแบบจากโครงสร้าง 2 ทรงกรวย เป็นสายอากาศแบบแผ่นกรวย

#### 3.2.1 การกำหนดช่วงความถี่ใช้งาน

สายอากาศแบบแผ่นกรวยนี้มีคุณสมบัติที่จะใช้ในงานบนช่วงความถี่แถบกว้าง (Board Band) ดังนั้นการกำหนดความถี่ช่วงที่ใช้งานในระบบนี้คือความถี่ระหว่าง 3.1 GHZ- 10.6 GHZ

#### 3.2.2 การกำหนดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบจานกรวย

ในการออกแบบสายอากาศแบบจานกรวย กำหนดค่าอิมพีแดนซ์ที่ 50 โอห์ม

#### 3.2.3 การคำนวณหาขนาดของสายอากาศแบบจานกรวย

การคำนวณหาขนาดของสายอากาศแบบจานกรวยจะเริ่มจากการคำนวณหาค่าความยาวคลื่นของสายอากาศ ซึ่งจะเหมือนกับสายอากาศแบบกรวยคู่ คือ

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

- ที่ความถี่ต่ำสุด 3.1 GHZ จะ ได้ความยาวคลื่น

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{3.1 \times 10^9} \approx 10 \text{ (เซนติเมตร)}$$

และ

$$H = 0.7 \lambda = 0.7 (10) = 7 \text{ (เซนติเมตร)}$$

$$B = 0.62 \lambda = 0.62 (10) = 6 \text{ (เซนติเมตร)}$$

$$D = 0.4 \lambda = 0.4 (10) = 4 \text{ (เซนติเมตร)}$$

$$\theta_h = \sin^{-1} \left[ \frac{(B/2)}{H} \right] = \sin^{-1} \left[ \frac{(6/2)}{7} \right] = 27.202^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความถี่สูงสุด 11 GHz

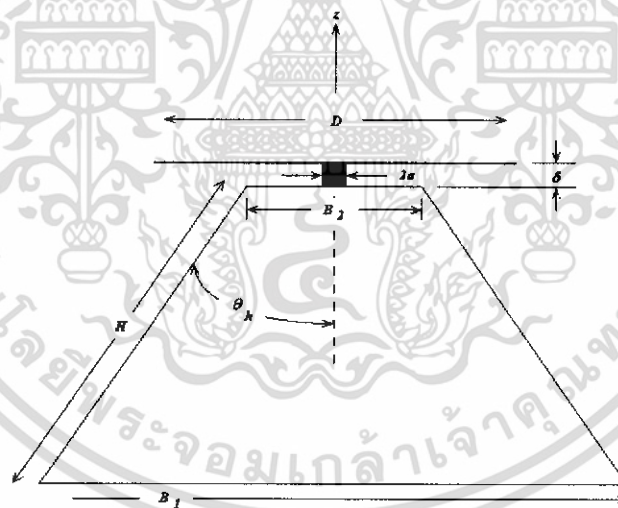
$$\lambda_U = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{11 \times 10^9} = 2.72 \text{ (เซนติเมตร)}$$

$$B_2 = \frac{\lambda_U}{7} = \frac{2.72}{75} = 0.036 \text{ (เซนติเมตร)}$$

$$\delta = 0.5 B_2 = 0.5 (0.036) = 0.018 \text{ (เซนติเมตร)}$$

$$2a = 0.33 B_2 = 0.33 (0.036) = 0.0118 \text{ (เซนติเมตร)}$$

$$D = 0.75 B = 0.75 (6) = 4.5 \text{ (เซนติเมตร)}$$



รูปที่ 3.7 แบบสายอากาศแบบจานกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 กระบวนการสร้างสายอากาศแบบจานกรวย

จากการที่ได้คำนวณหาขนาดของสายอากาศแบบจานกรวย แล้วขั้นตอนต่อไปก็คือการสร้างสายอากาศ มีขั้นตอนการสร้างดังนี้

#### 3.2.4.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์

การสร้างสายอากาศแบบแผ่นกรวยจะมีขั้นตอนการสร้างคล้ายกับขั้นตอนการสร้างสายอากาศแบบกรวยคู่ คือต้องมีการทำแม่พิมพ์รูปทรงกรวยขึ้นมาก่อน แล้วทำการขึ้นรูปตัวสายอากาศที่ได้จากแม่พิมพ์ โดยมีวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ดังนี้

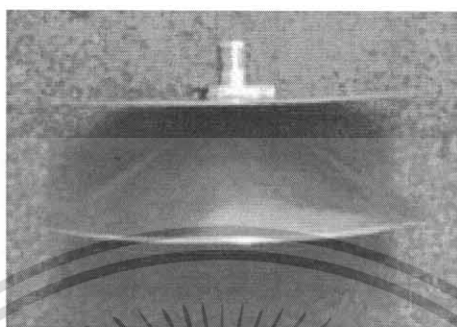
- แผ่นทองแดงซึ่งมีขนาดหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร
- แม่พิมพ์เหล็กที่ใช้ขึ้นรูปสายอากาศ
- คอนเน็คเตอร์
- กรรไกรสำหรับตัดแผ่นโลหะ
- ตะกั่วสำหรับบัดกรี
- หัวแร้ง (ต้องใช้ชนิดที่ให้ความร้อนสูงเพื่อให้ง่ายต่อการบัดกรี)
- ตะไบและกระดาษทรายที่ใช้สำหรับตกแต่งขอบของสายอากาศ

#### 3.2.4.2 การสร้างสายอากาศแบบจานกรวย

1. นำแผ่นทองแดงที่มีขนาดความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร มาตัดให้มีขนาดพอประมาณกับแม่พิมพ์สายอากาศ
2. นำแผ่นทองแดงที่ตัดมาแล้วมาขึ้นรูปโดยการวางไว้ระหว่างแท่นอัดลัมเบียร์ที่ติดต่อกับเครื่องปั๊มแผ่นโลหะ ซึ่งขั้นตอนนี้ต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมาก เพราะปั๊มแรงไปอาจจะทำให้แผ่นทองแดงฉีกขาด
3. นำแผ่นทองแดงรูปทรงกรวยที่ได้มาทำการตกแต่งขอบให้เรียบร้อย โดยการใช้ตะไบและกระดาษทรายขัด
4. ตัดแผ่นทองแดงอีกแผ่น นำมาตัดเป็นรูปวงกลมเพื่อทำเป็นส่วนจานของสายอากาศ (รัศมีมีขนาดตามที่คำนวณไว้)
5. นำทรงกรวยและจานที่ได้มาทำการเจาะรู โดยเจาะรูที่แผ่นจานสายอากาศให้มีขนาดใหญ่กว่าทรงกรวยเล็กน้อย เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวคอนดักเตอร์ไปสัมผัสกับตัวแผ่นจาน
6. นำตัวคอนเน็คเตอร์มาทำการบัดกรีให้ติดกับตัวแผ่นจานซึ่งขั้นตอนนี้ต้องใช้หัวแร้งที่มีความร้อนสูงมากมาใช้ในการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำตัวแผ่นงานที่บัดกรีหัวคอนเน็คเตอร์แล้วมาประกอบเข้ากับทรงกรวยโดยให้ระหว่างประมาณ 0.5 มิลลิเมตรเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวแผ่นงานกับตัวทรงกรวยสัมผัสกัน



รูปที่ 3.8 สายอากาศแบบจานกรวยที่ทำเสร็จแล้ว

### 3.3 การออกแบบสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูกลับหัวประกอบด้วยแผ่นโลหะรูปสี่เหลี่ยมที่เป็นสื่อนำไฟฟ้าและระนาบสร้างเงารูปตัว L จุดฟีด (Feed point) ของสายอากาศอยู่ระหว่างส่วนที่แคบที่สุดของแผ่น โลหะสี่เหลี่ยมกับตรงกลางของระนาบสร้างเงารูปตัว L

เริ่มแรกออกแบบจะต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแผ่นสี่เหลี่ยมคางหมูเพื่อจะสร้างเป็นตัวฟีดของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

#### 3.3.1 การกำหนดช่วงความถี่ใช้งาน

กำหนดความถี่ใช้งานตามมาตรฐานของการสื่อสารระบบอุตสาหกรรมไร้สายแบนด์ คือที่ความถี่ 3.1 – 10.6 GHz

#### 3.3.2 การกำหนดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

ในการออกแบบสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูเรากำหนดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่  $50 \Omega$  ซึ่งจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์นี้เราจะได้ค่าของมุมค่าหนึ่ง แต่เนื่องจากสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูอยู่กลุ่มของซิงเกิล โคน (Single cone) กับระนาบสร้างเงา จะได้มุมของสายอากาศเท่ากับ 45 องศา

#### 3.3.3 การคำนวณหาความยาวคลื่น

การคำนวณหาความยาวคลื่นของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูจะเหมือนกับการคำนวณของสายอากาศทรงกรวยไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

ซึ่งจะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{3.1 \times 10^9} = 0.0967 \text{ (เมตร)}$$

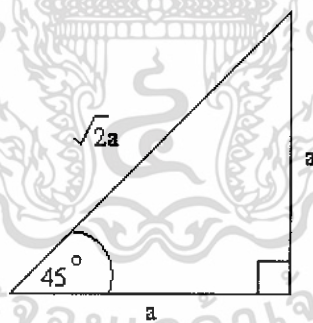
และที่  $\frac{\lambda}{2}$  จะได้

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{96.77 \text{ cm}}{2} = 48.38 \text{ (มิลลิเมตร)}$$

ซึ่งก็คือความสูงของตัวพีคของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

### 3.3.4 คำนวณความกว้างของพีคสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

เราสามารถคำนวณหาความกว้างของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูได้จากสูตรทางคณิตศาสตร์ของสามเหลี่ยมมุมฉากคือ



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ความยาวแต่ละด้านของสามเหลี่ยมมุมฉาก

จากรูปเราได้ค่า  $a$  เท่ากับ 48.38 มิลลิเมตร ดังนั้นเราจะได้ความกว้างของตัวพีคสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูเท่ากับ

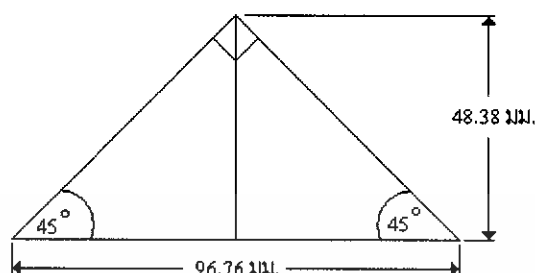
$$48.38 \times 2 = 96.76 \text{ (มิลลิเมตร)}$$

และ

$$\sqrt{2}a = \sqrt{2} \times 48.38 = 68.42 \text{ (มิลลิเมตร)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะได้ตัวพีคของสายอากาศดังนี้



รูปที่ 3.12 รูปสามเหลี่ยมที่จะมาทำตัวพีคของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

### 3.3.5 กระบวนการสร้างสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

หลังจากที่เราได้ออกแบบตัวพีคของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูเสร็จแล้วขั้นตอนต่อไปก็คือ การสร้างสายอากาศขึ้นมาซึ่งมีกระบวนการดังนี้

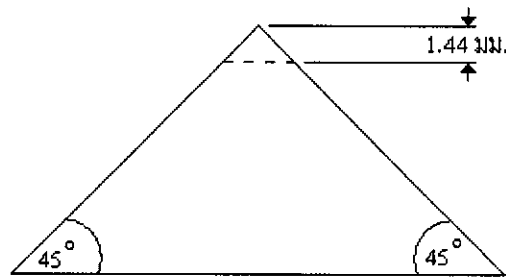
#### 3.3.5.1 จัดเตรียมอุปกรณ์

- แผ่นทองแดงขนาด 14 ออนซ์ ใช้ทำเป็นตัวสายอากาศ
- คอนเน็คเตอร์
- ตะกั่วบัดกรี
- หัวแรง (ต้องใช้ชนิดที่ให้ความร้อนสูงเพื่อให้ง่ายต่อการบัดกรี)
- ทรายสำหรับตักแต่งขอบของสายอากาศ
- เครื่องตัดแผ่นโลหะ
- เครื่องพับแผ่นโลหะ
- ดอกสว่านและเครื่องเจาะ

#### 3.3.5.2 การสร้างสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

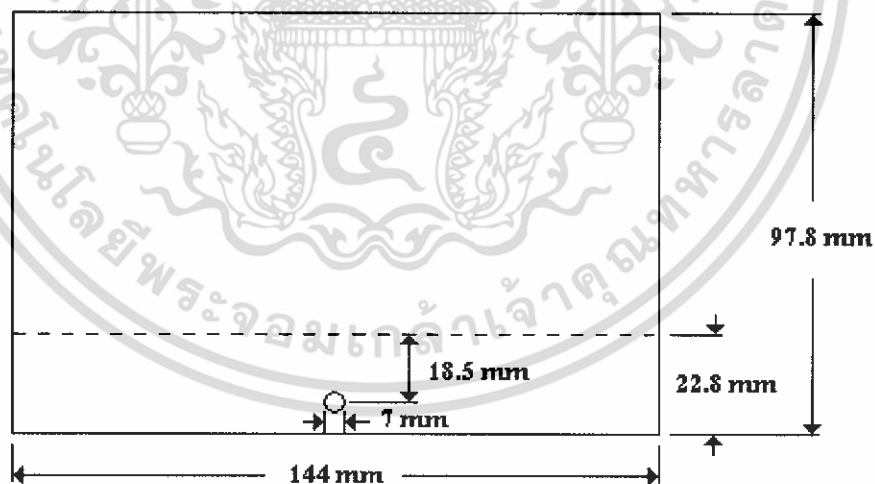
1. ตัดแผ่นทองแดงตามรูปที่ 3.13 ให้ได้ขนาดความกว้างของพีคสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูตามที่ได้คำนวณไว้ในหัวข้อที่ 3.4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 รูปของตัวพีคของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

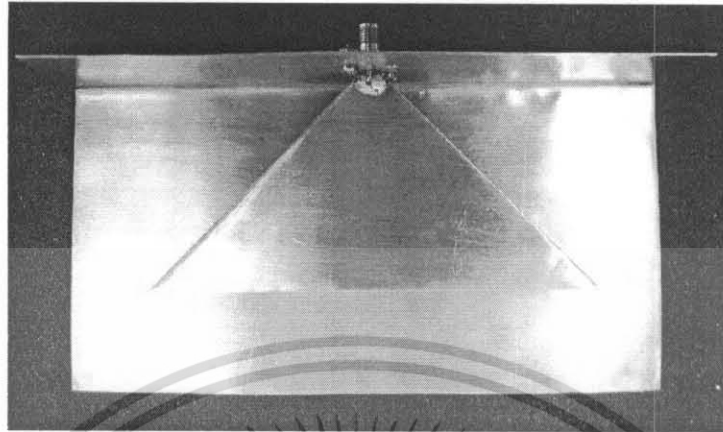
2. นำตัวพีคของสายอากาศที่ตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมาตัดอีกครั้งที่ปลายของมุม 90 องศา สูงจากมุมยอด 1.44 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.13 ก็จะได้ตัวพีครูปสี่เหลี่ยมคางหมู
3. ตัดแผ่นทองแดงอีกแผ่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $97.8 \times 144$  มิลลิเมตร เพื่อนำไปใช้เป็นระนาบสร้างเงา
4. นำแผ่นทองแดงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตัดได้ขนาดแล้วไปพับให้ทำมุม 90 องศา ด้วยเครื่องพับให้เป็นรูปตัว L โดยดูรายละเอียดของขนาดดังรูปที่ 3.14 พร้อมกับเจาะรูขนาด เส้นเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างของส่วนระนาบสร้างเงาของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

5. นำตัวพีคของสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมคางหมู และระนาบสร้างเงารูปตัว L และ คอนเน็คเตอร์มาประกอบเข้าด้วยกันโดยใช้การบัดกรีดังรูป 3.15 โดยให้ตัวพีคสายอากาศ ห่างจากระนาบสร้างเงา 1.44 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 สายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูที่ทำเสร็จแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

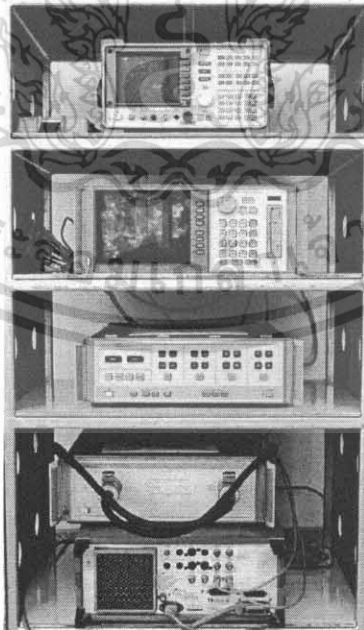
### การทดลอง และผลการทดลอง

#### 4.1 การวัดคุณสมบัติสายอากาศ

ชุดวัดคุณสมบัติสายอากาศสามารถวัด S – พารามิเตอร์ เพื่อหาค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) วัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่อแรงดัน (SWR) ของสายอากาศว่าเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าน้อยกว่า 2 และวัดเฟส (phases) ของสายอากาศ

##### 4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดวัดคุณสมบัติสายอากาศ
  - 1.1 เครื่อง 8150C Network Analyzer
  - 1.2 เครื่อง 8514B S – Parameter Test Set (45 MHz – 20 GHz)
  - 1.3 เครื่อง 8360 Series Synthesized Sweeper (10 MHz – 20 GHz)
2. ชุดปรับเทียบค่า 85052B (Calibration kit 85052B 3.5 mm.)
3. สายอากาศที่ต้องการวัด



รูปที่ 4.1 เครื่องวัดคุณสมบัติของสายอากาศ

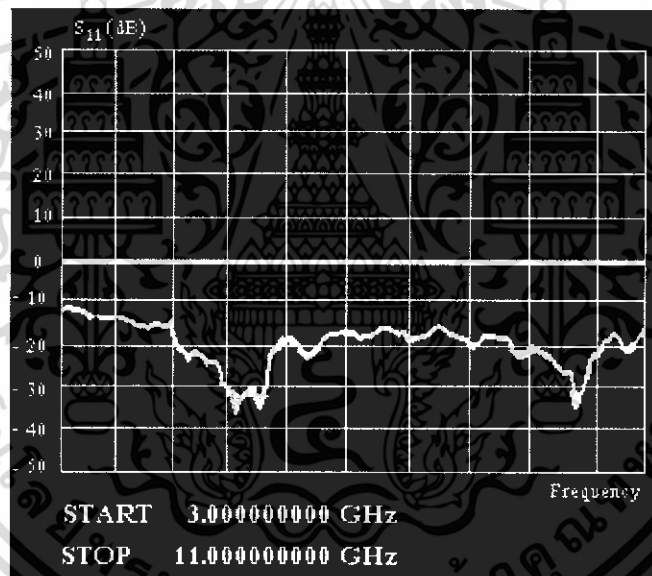
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ขั้นตอนการวัด

1. เปิดเครื่องวัดคุณสมบัติสายอากาศทุกตัว
2. ทำการปรับเทียบค่าเครื่องด้วยชุดปรับเทียบค่าซึ่งประกอบด้วยตัวรีดวงจร (Short circuit), ตัวเปิดวงจร (open circuit) และโหลดแบนด์ (load broadband)
3. ต่อสายอากาศที่ต้องการวัดเข้ากับชุดวัดคุณสมบัติสายอากาศ
4. เลือกเมนู (Menu) วัดค่า S – พารามิเตอร์, ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่อแรงดัน และค่าเฟส
5. บันทึกค่าที่วัดได้

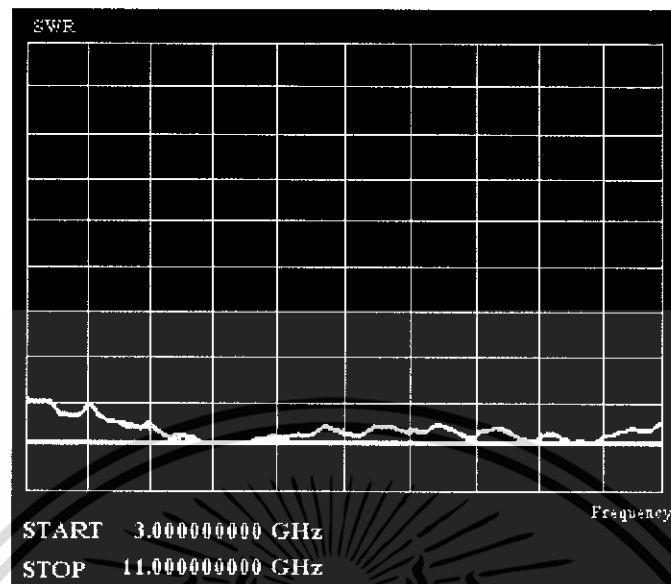
### 4.2 ค่าคุณสมบัติของสายอากาศแถบกว้างที่ทำการออกแบบ

#### 4.2.1 สายอากาศกรวยคู่

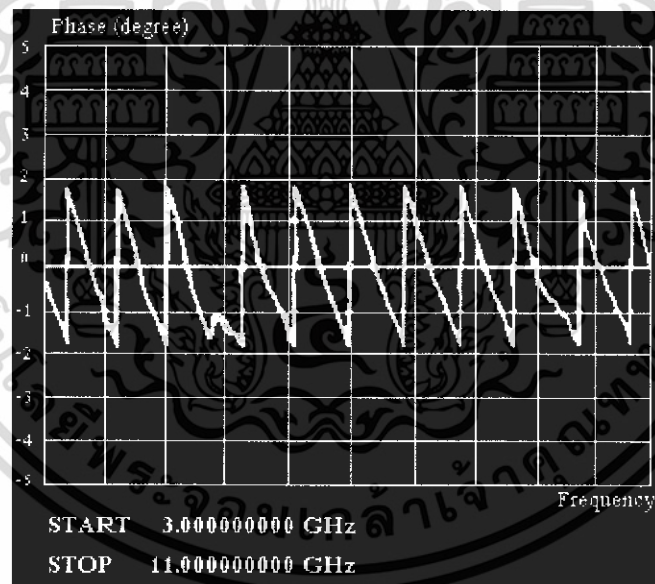


รูปที่ 4.2 ค่า S<sub>11</sub> ของสายอากาศกรวยคู่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 67.5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



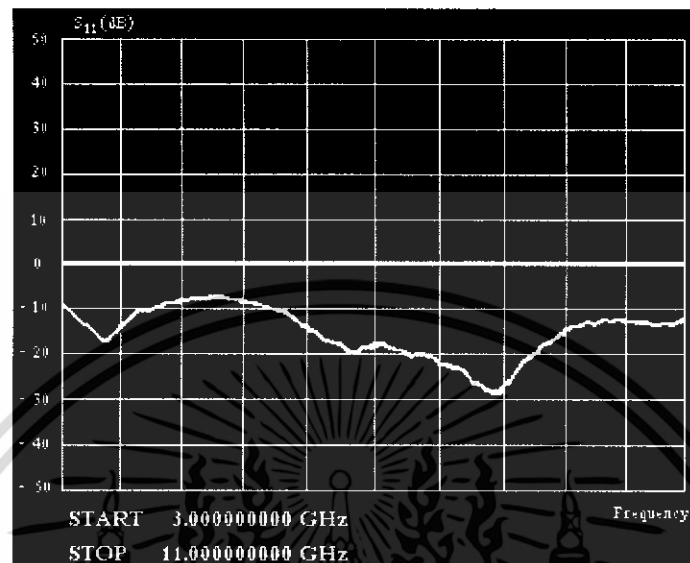
รูปที่ 4.3 ค่า SWR ของสายอากาศรวยคู่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 67.5 มิลลิเมตร



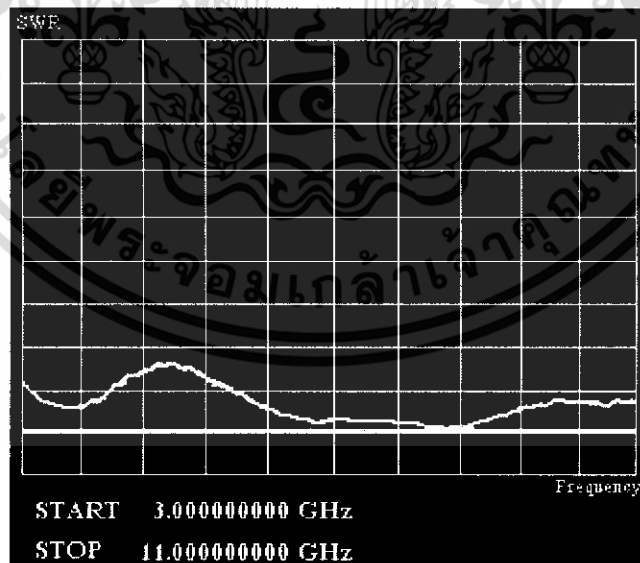
รูปที่ 4.4 ค่าเฟสของสายอากาศรวยคู่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 67.5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 สายอากาศแบบจานกรวย

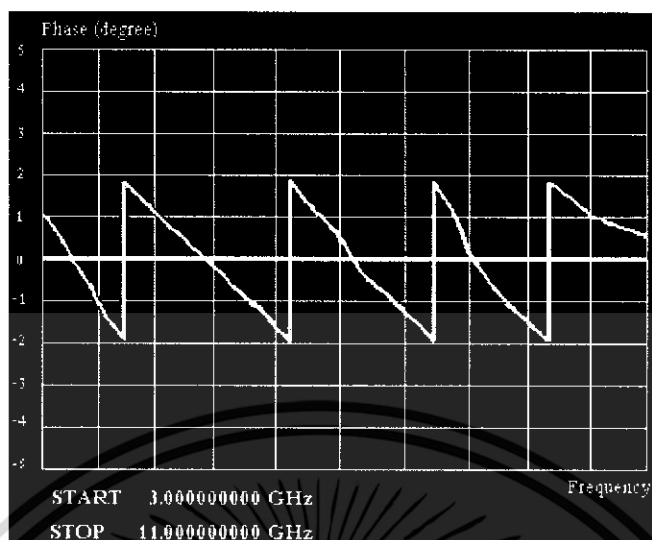


รูปที่ 4.5 ค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศแบบจานกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย 67.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจาน 67.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.6 ค่า SWR ของสายอากาศแบบจานกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย 67.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจาน 67.5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

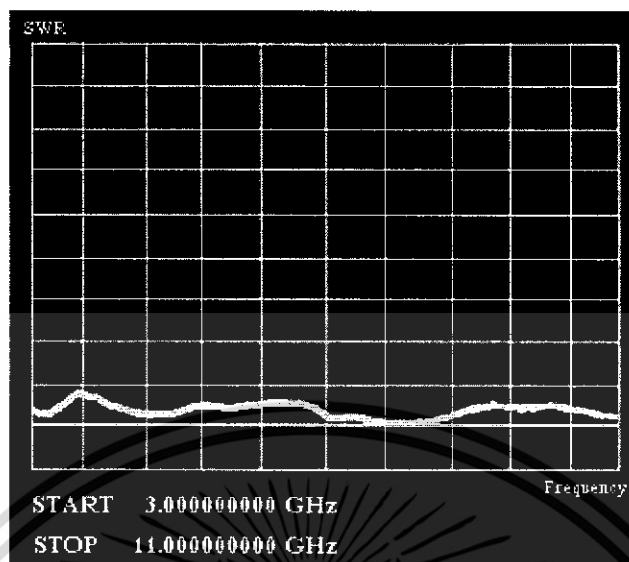


รูปที่ 4.7 ค่าเฟสของสายอากาศแบบจานกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย 67.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจาน 67.5 มิลลิเมตร

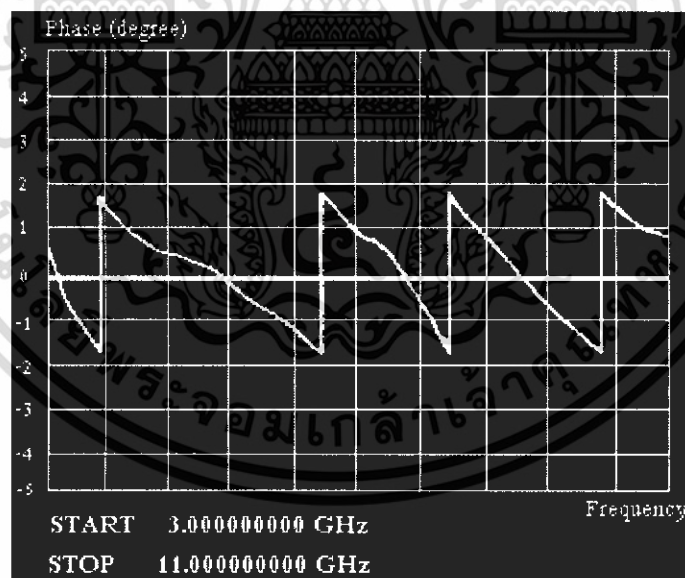


รูปที่ 4.8 ค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศแบบจานกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย 67.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจาน 110 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



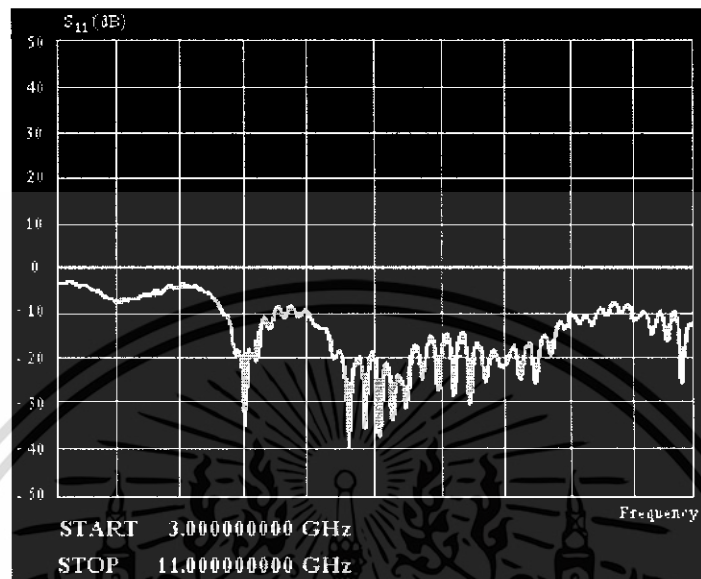
รูปที่ 4.9 ค่า SWR ของสายอากาศแบบจานกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย 67.5 มิลลิเมตร และ  
เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจาน 110 มิลลิเมตร



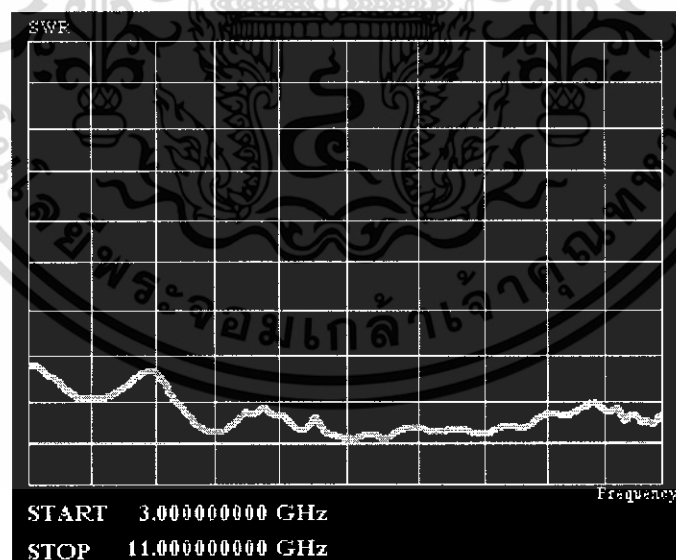
รูปที่ 4.10 ค่าเฟสของสายอากาศแบบจานกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย 67.5 มิลลิเมตร และ  
เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจาน 110 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 สายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

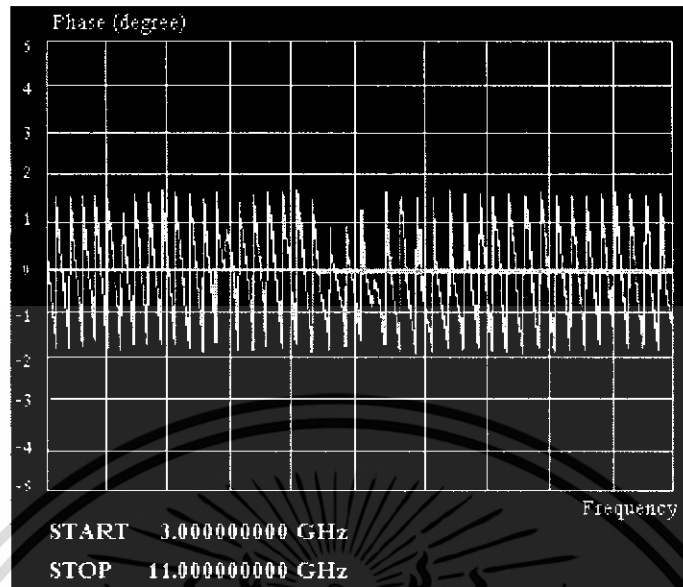


รูปที่ 4.11 ค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูมุมพีค 90 องศา

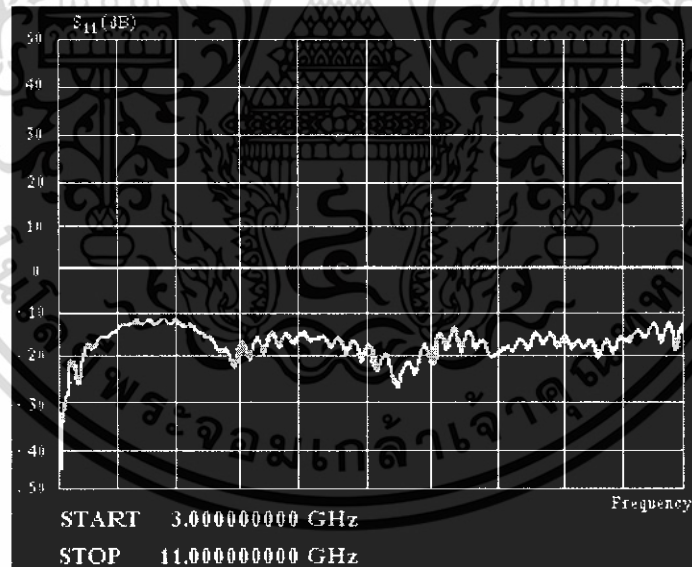


รูปที่ 4.12 ค่า SWR ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูมุมพีค 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

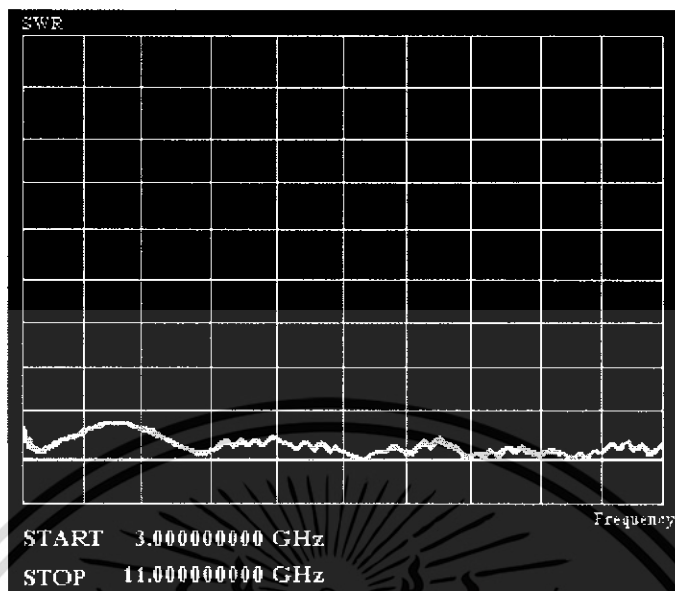


รูปที่ 4.13 ค่าเฟสของของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูมุมพีค 90 องศา

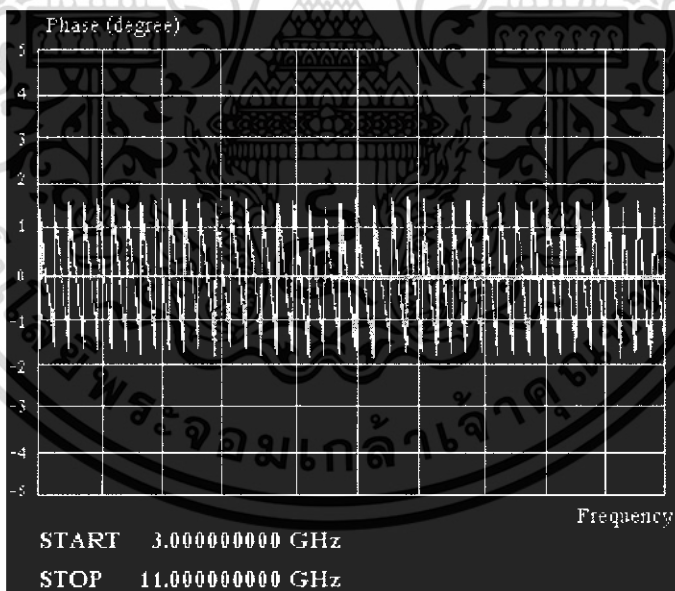


รูปที่ 4.14 ค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูมุมพีค 88 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ค่า SWR ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูมุมพีค 88 องศา



รูปที่ 4.16 ค่าเฟสของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูมุมพีค 88 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การวัดฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศ (Antenna Transfer Function) และการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถบกว้าง

การวัดฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศ และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เป็นการวัดเพื่อหาประสิทธิภาพ และคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ และสร้างขึ้นมา

#### 4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่อง Network Analyzer
2. สาย Semi-rigid และหัวต่อ (Connector) ชนิดความสูญเสียต่ำ (Low loss)
3. สายอากาศที่จะนำมาทำการวัด
4. เสาสำหรับติดตั้งสายอากาศ
5. อุปกรณ์หมุนสายอากาศเพื่อวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (ใช้ในกรณีของการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ)
6. เครื่องคอมพิวเตอร์นำมาใช้ในการเก็บค่าที่วัดได้



รูปที่ 4.17 ภาพจำลองขณะวัดสัญญาณ

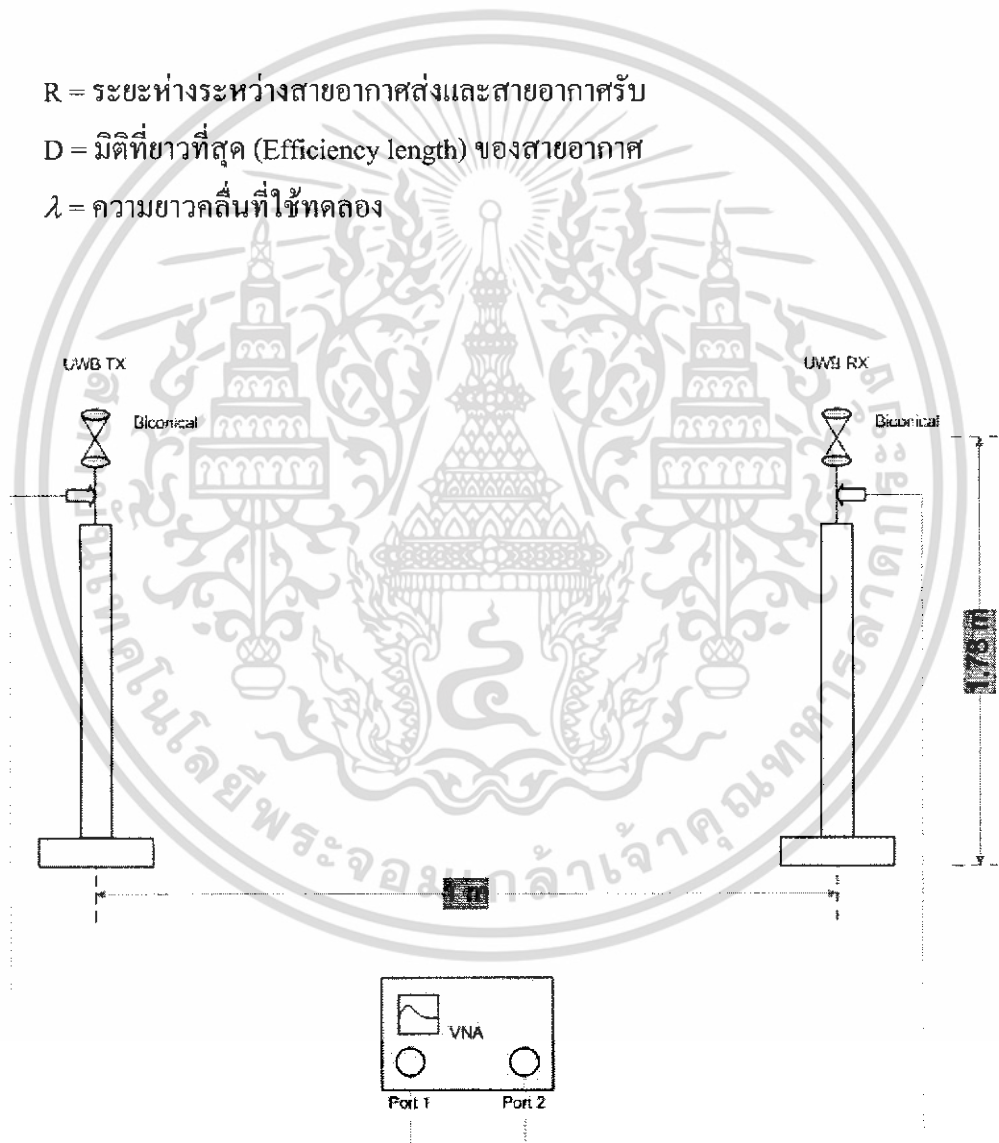
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 บล็อกโคอะแกรมในการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 4.17 เป็นตัวอย่างการทดลองซึ่งทางด้านส่งจะประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณและสายอากาศซึ่งทำหน้าที่ส่งสัญญาณออกไปส่วนสายอากาศด้านรับจะติดตั้งบนเสาสำหรับติดตั้งสายอากาศ ซึ่งด้านส่งก็เช่นกัน และมีความห่างระหว่างสายอากาศรับและส่งเป็น 100 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในระยะไกล (Far file) สามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

เมื่อ R = ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ  
 D = มิติที่ยาวที่สุด (Efficiency length) ของสายอากาศ  
 $\lambda$  = ความยาวคลื่นที่ใช้ทดลอง



รูปที่ 4.18 บล็อกโคอะแกรมแสดงรูปแบบการติดตั้งสายอากาศส่ง และรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่สายอากาศทางด้านภาคส่งจะติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์หมุนสายอากาศ ซึ่งจะหมุนสายอากาศตั้งแต่ 0 องศาจนถึง 360 องศา โดยจะทำการหมุนครั้งละ 5 องศา (จำนวน 73 ครั้ง) โดยการหมุนแต่ละครั้งก็จะมีค่าที่ทำการวัดไปเก็บไว้ที่คอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะนำค่าเหล่านั้นมาทำการวิเคราะห์ค่าของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นอีกครั้ง โดยการวัดการแพร่กระจายคลื่นนี้จะวัดเฉพาะแนวตั้ง (Vertical) เท่านั้น

#### 4.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

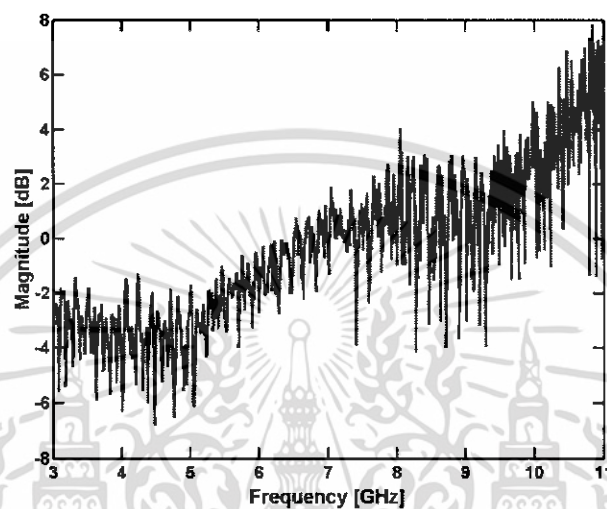
การทดลองนี้จะทำการวัดฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศ และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศฮอว์คแบนด์ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. จัดอุปกรณ์ตามบล็อกไดอะแกรม
2. ทำการปรับเทียบค่าสายส่ง โดยการนำสายส่งสัญญาณของสายอากาศภาครับกับภาคส่งนำมาต่อกัน โดยใช้ข้อต่อที่มีการสูญเสียต่ำและทำการปรับเทียบค่า
3. ติดตั้งสายอากาศทั้งด้านรับ และด้านส่งดังรูป 4.18 โดยวางให้ห่างกัน 100 เซนติเมตร กรณีของการวัดฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศ
4. ติดตั้งสายอากาศที่ต้องการจะวัดบนตัวหมุนในกรณีที่จะทำการวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยวางให้ห่างกัน 100 เซนติเมตร ซึ่งในการวัดจะหมุนสายอากาศครั้งละ 5 องศา ตั้งแต่ 0 องศา จนถึง 360 องศา
5. ต่อสายสัญญาณสายควบคุมรวมทั้งตรวจตราอุปกรณ์และจุดต่อต่าง ๆ ให้ถูกต้อง
6. ทำการส่งสัญญาณ
7. นำสัญญาณที่วัดได้มาทำการพล็อตกราฟแสดงค่าฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศ และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแต่ละชนิด
8. เปลี่ยนสายอากาศที่จะทำการวัดแล้วทำตามข้อ 3 – 7 อีกครั้ง

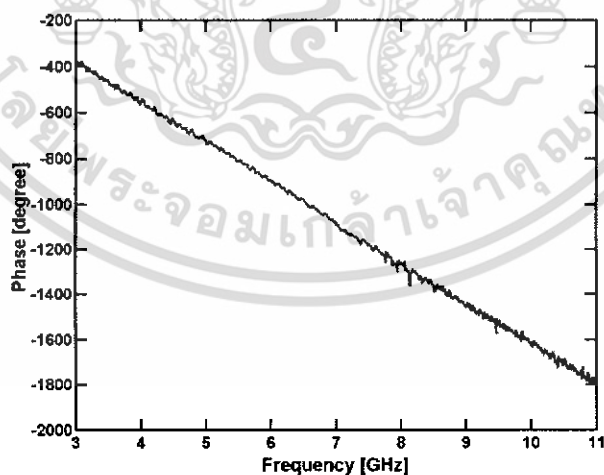
#### 4.3.4 ผลการทดลองการวัดฟังก์ชันการส่งผ่าน และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถบกว้างที่ได้ทำการออกแบบ

หลังจากผ่านขั้นตอนการทดลอง จะทำให้เราได้ค่า ซึ่งค่าดังกล่าวจะได้นำมาวิเคราะห์อีกครั้ง ซึ่งจะได้ผลจากการทดลองดังต่อไปนี้

#### 4.3.4.1 ค่าจากการวัดฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ โดยภาครับ และภาคส่งเป็นสายอากาศชนิดเดียวกัน

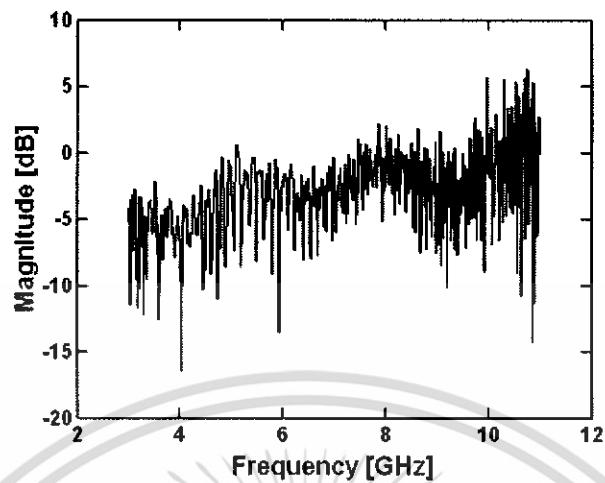


รูปที่ 4.19 ค่า Magnitude ของสายอากาศรวยคู่

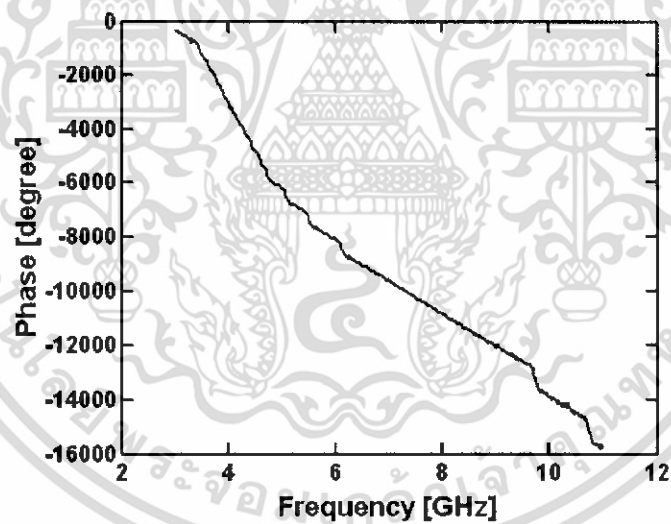


รูปที่ 4.20 ค่า Phase ของสายอากาศรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

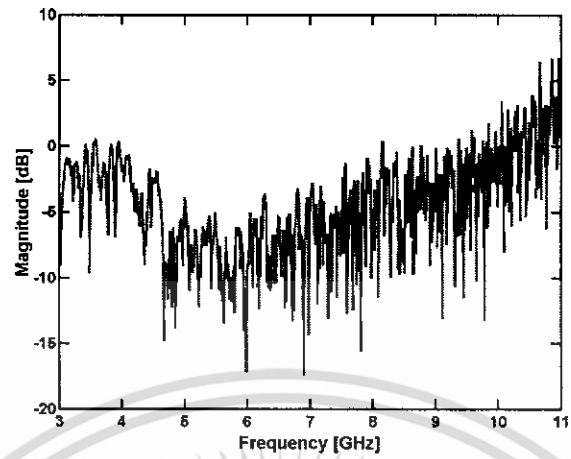


รูปที่ 4.21 ค่า Magnitude ของสายอากาศแบบจานกรวย

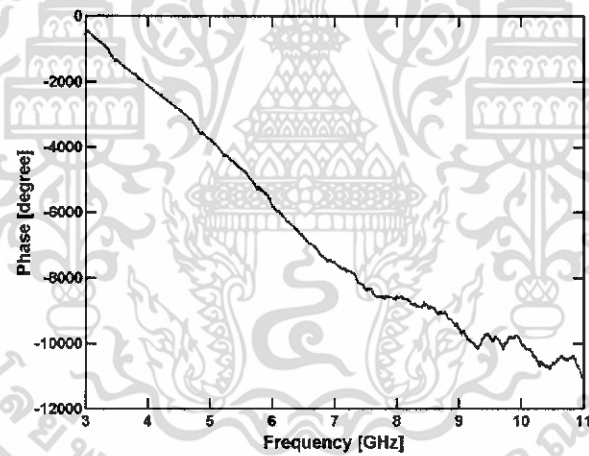


รูปที่ 4.22 ค่า Phase ของสายอากาศแบบจานกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



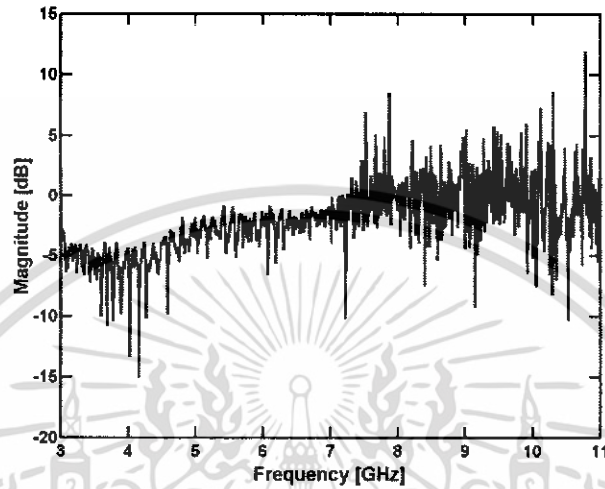
รูปที่ 4.23 ค่า Magnitude ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู



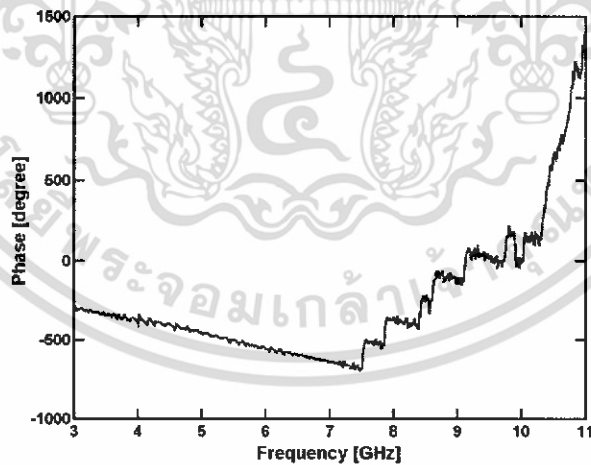
รูปที่ 4.24 ค่า Phase ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4.2 ค่าจากการวัดฟังก์ชันการส่งผ่านของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ โดยภาครับ และภาคส่งเป็นสายอากาศต่างชนิดกัน

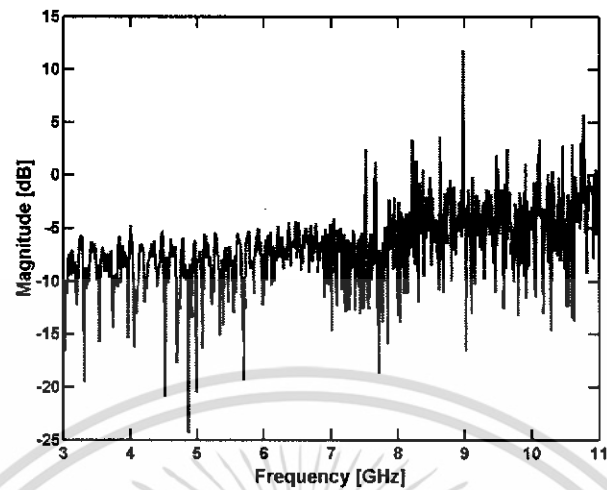


รูปที่ 4.25 ค่า Magnitude ของสายอากาศแบบจานกรวยในภาคส่ง และสายอากาศกรวยคู่ในภาครับ

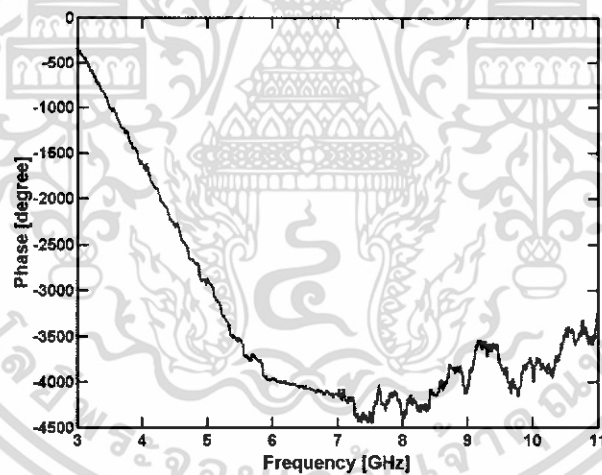


รูปที่ 4.26 ค่า Phase ของสายอากาศแบบจานกรวยในภาคส่ง และสายอากาศกรวยคู่ในภาครับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



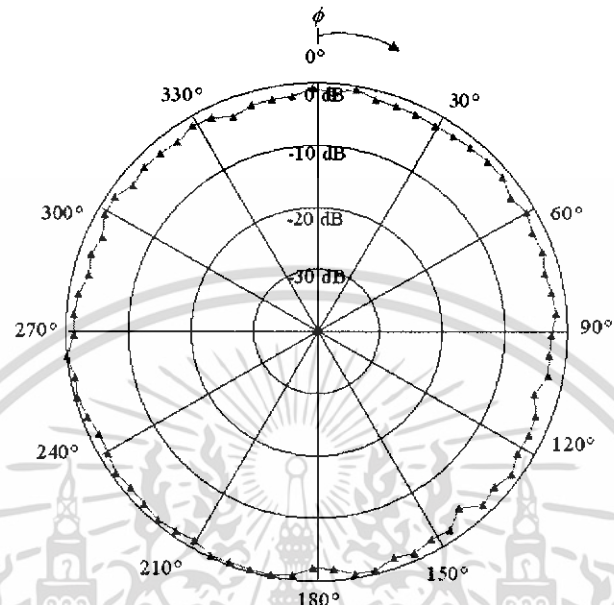
รูปที่ 4.27 ค่า Magnitude ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูในภาคส่ง และสายอากาศกรวยคู่ในภาครับ



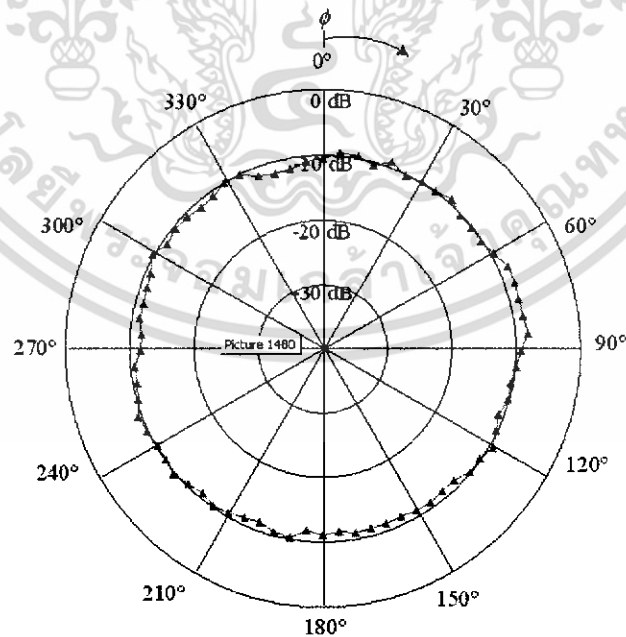
รูปที่ 4.28 ค่า Phase ของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูในภาคส่ง และสายอากาศกรวยคู่ในภาครับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ

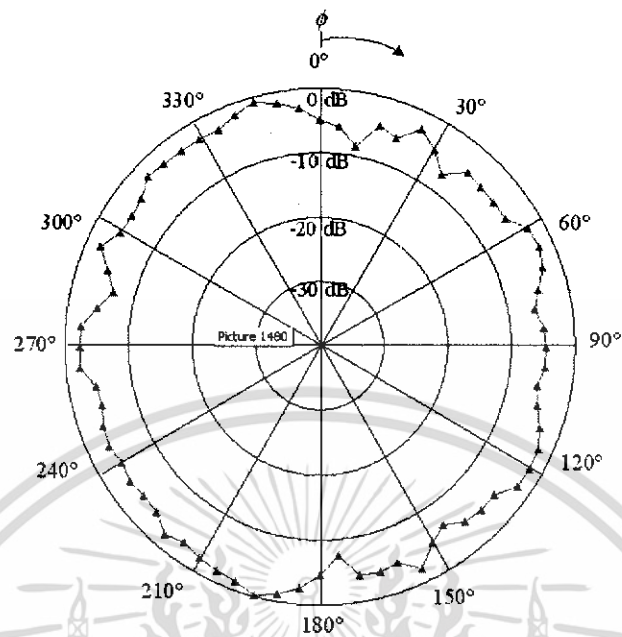


รูปที่ 4.29 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรวยคู่



รูปที่ 4.30 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบจานกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

#### 5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในบทที่ 4 สามารถนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศได้ดังนี้

ตาราง 5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแถบกว้าง ที่ได้ทำการทดลอง

	ค่า $S_{11}$	ค่าเฟส	ช่วง SWR ที่ต่ำกว่า 2 (GHz)
สายอากาศกรวยคู่ ขนาดกรวยเส้นผ่าศูนย์กลาง 67.5 มม.	-35	ปานกลาง	3 – 11
สายอากาศแบบจานกรวย ขนาดกรวยเส้นผ่าศูนย์กลาง 67.5 มม. ขนาดแผ่นจานเส้นผ่าศูนย์กลาง 67.5 มม.	-30	ปานกลาง	4.7 – 11
ขนาดแผ่นจาน 110 มม.	-22	ปานกลาง	3 – 11
สายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู ขนาดฟีด 90 องศา	-44	ปานกลาง	5 – 10
ขนาดฟีด 88 องศา	-55	ดี	3 – 11

ในส่วนของการวัดค่าฟังก์ชันการส่งผ่าน และหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากหัวข้อ 4.3 นั้น เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของสายอากาศแถบกว้างที่ได้ทำการออกแบบว่ามีคุณสมบัติในการส่งผ่านสัญญาณได้ดีมากน้อยเพียงใด และทิศทางใดที่ส่งสัญญาณไปได้ดีที่สุด ทั้งนี้จะเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นด้วยว่าการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแต่ละแบบมีคุณสมบัติเป็นเช่นไร เพื่อที่จะนำไปใช้งานในแต่ละประเภทได้อย่างเหมาะสม

## 5.2 ปัญหาที่พบในระหว่างการดำเนินโครงการ และแนวทางในการแก้ปัญหา

จากสายอากาศทั้งสามแบบที่ได้ทำการออกแบบ และสร้างขึ้นมานั้นพบว่า ในส่วนของสายอากาศที่มีทรงกรวยเป็นส่วนประกอบของสายอากาศ ซึ่งก็คือสายอากาศกรวยคู่ และสายอากาศแบบจานกรวยนั้น สามารถสร้าง ได้ยากกว่าสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูที่ไม่มีทรงกรวยเป็นส่วนประกอบ อีกทั้งยังมีราคาสูง และเมื่อขึ้นรูปกรวยแล้วจะไม่สามารถแก้ไขโครงสร้างได้ จึงต้องให้ความสำคัญในการคำนวณ และออกแบบโครงสร้างเป็นอย่างดี ส่วนสายอากาศสี่เหลี่ยมคางหมูเป็นสายอากาศที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในจำนวนของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ ซึ่งอาจจะสร้างได้ไม่ยากเท่าไรนัก หากเทียบกับสายอากาศที่เหลือนั้น แต่เมื่อสร้างออกมาแล้วจากการคำนวณ และออกแบบตามทฤษฎี อาจจะยังไม่สามารถใช้งานได้ หรือใช้งานได้ไม่ดีตามที่ต้องการ ซึ่งต้องมีการปรับขนาดเพื่อทำให้เกิดความสมมาตรมากขึ้น เช่น การปรับค่ามุมของตัวพีดสายอากาศ หรือการเพิ่มขนาดความยาวของระนาบสร้างเงาในส่วนที่พบบนเพื่อติดกับคอนเน็คเตอร์ โดยในโครงการชุดนี้ได้ออกแบบให้ระนาบสร้างเงามีความยาวเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัวจากจุดกึ่งกลางที่ติดคอนเน็คเตอร์ จึงทำให้สายอากาศสามารถใช้งานได้ดียิ่งขึ้น และปัญหาอีกประการที่พบในขั้นตอนการสร้างสายอากาศแบบที่มีการบัดกรีเพื่อเชื่อมคอคอนเน็คเตอร์เข้ากับแผ่นทองแดงนั้น จะต้องใช้ความร้อนสูงมาก เพื่อเชื่อมชิ้นงานดังกล่าวให้ติดกัน ซึ่งความร้อนที่ใช้ได้สร้างความเสียหายให้แก่คอนเน็คเตอร์เป็นอย่างมาก ในโครงการชุดจึงได้ทำการตัดแปลงเพื่อลดความเสียหายดังกล่าวที่เกิดขึ้นโดยการใช้เนื้อขนาดเล็กยึดคอคอนเน็คเตอร์เข้ากับแผ่นทองแดงแทนการเชื่อมติดโดยการบัดกรี ซึ่งเมื่อนำสายอากาศที่สร้างโดยวิธีนี้ไปวัดค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศก็พบว่าสายอากาศสามารถนำมาใช้งานได้เช่นกัน

## 5.3 สรุปผลการทดลอง

จากผลการดำเนินงานสามารถสรุปได้ดังนี้

- สายอากาศ Biconical ใช้งานบนช่วงความถี่ที่ต้องการได้  
ประสิทธิภาพการส่งผ่านดี ต้นทุนในการสร้างสูง
- สายอากาศ Discone ใช้งานบนช่วงความถี่ที่ต้องการได้  
ประสิทธิภาพการส่งผ่านต่ำ ต้นทุนในการสร้างสูง
- สายอากาศ Trapezoidal ใช้งานบนช่วงความถี่ที่ต้องการได้  
ประสิทธิภาพในการส่งผ่านปานกลาง ต้นทุนในการสร้างต่ำ

จากการคำนวณเพื่อออกแบบสายอากาศแถบกว้าง ให้สามารถใช้งานได้บนช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 – 10.6 GHz นั้น พบว่าไม่สามารถทำการคำนวณและออกแบบได้เพียงครั้งเดียวแต่อาจจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ ซึ่งอ้างอิงจากสมการการก่อสร้างสายอากาศ เพื่อคำนวณหาขนาดของสายอากาศ และปรับขนาดของสายอากาศให้มีความสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ ทั้งนี้จะต้องอาศัยความรู้พื้นฐาน และความเข้าใจในทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศ และทฤษฎีสายอากาศที่ต้องการออกแบบอีกด้วย

โครงการการออกแบบ และสร้างสายอากาศแถบกว้างสำหรับ วิทยุแถบกว้างยิ่งนี้ เป็นโครงการที่ทำการศึกษเกี่ยวกับสายอากาศแถบกว้างเพื่อนำมาใช้กับวิทยุแถบกว้างยิ่ง หรือเทคโนโลยีอุตสาหกรรมไวต์แบนด์ ซึ่งจากขั้นตอนการดำเนินงานที่ผ่านมาทีมงานได้ดำเนินงานตามขอบเขตที่วางไว้ได้ทั้งหมด อันได้แก่ การศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นประโยชน์แก่โครงการ ออกแบบ และสร้างสายอากาศแถบกว้าง รวมไปถึงการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศแถบกว้างที่ได้ทำการออกแบบ ซึ่งผลของการดำเนินงานทำให้ทีมงานสามารถสร้างสายอากาศแถบกว้าง สำหรับวิทยุแถบกว้างยิ่งอย่างง่ายได้ และสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแถบกว้างที่สร้างขึ้นมาได้ ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ให้เกิดการใช้งานจริงได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- (1) ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร การวิเคราะห์สายอากาศ พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ.2547
- (2) โมไนย ไกรฤกษ์ และวิวัฒน์ กิรานนท์ ทฤษฎีสายอากาศ พิมพ์ครั้งที่ 5, กรุงเทพฯ
- (2) C.A Balanis, Antenna Theory Analysis and Desing Singapore, John Wiley & Son, 1997
- (3) John D. Kraus, Ronald J. Marhefka, Antennas For All Applications, 2003



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้