



สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่  
A Bidirectional Antenna using Double Ridge Waveguide



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน... 61518  
วัน,เดือน,ปี... 18 ก.ค. 2549



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่  
A Bidirectional Antenna using Double Ridge Waveguide



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

นางสาวอภิญญา...

HN

ภาคศึกษา  
วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่

A Bidirectional Antenna Using Double Ridge Waveguide

ผู้จัดทำ

1. นายบุญญฤทธิ์ คำเขียน 45015058
2. นายระพีพันธ์ แก้วอ่อน 45015067



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่  
A Bidirectional Antenna using Double Ridge Waveguide

โดย นายบุญญฤทธิ์ คำเขียน 45015058

นายระพีพันธ์ แก้วอ่อน 45015067

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร

ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอสายอากาศแบบสองทิศทางโดยใช้ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ โครงสร้างสายอากาศมีลักษณะไม่ซับซ้อน ข้อดีของสายอากาศชนิดนี้คือให้อิมพีแดนซ์ประจำตัวที่น้อยลงและเป็นการเพิ่มช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งานให้สูงขึ้น โครงการนี้ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศแบบบริดจ์คู่ซึ่งประกอบด้วยคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ คุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ การโพลาไรซ์และช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศ ในการออกแบบสายอากาศได้ออกแบบที่ความถี่ปฏิบัติการ 1.8 GHz สำหรับติดตั้งเป็นสายอากาศที่สถานีฐานสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย

Abstract

This project is dealt with the bidirectional antenna using double ridge waveguide. The structure of antenna is simple. The advantage of this antenna is that the characteristic impedance can be reduced and the operating bandwidth can be enhanced. This project analyzes the antenna characteristics, i.e., the input impedance, radiation pattern, polarization and bandwidth. The antenna is designed at the operating frequency of 1.8 GHz for installing at the base station of wireless communication.

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	
สารบัญ	
สารบัญรูป	
สารบัญตาราง	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษา	2
1.3 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	4
2.1.1 ค่าคลื่นหลักของการแพร่กระจายคลื่น	4
2.1.2 บริเวณต่าง ๆ ของสนาม	4
2.2 ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง	5
2.3 ความกว้างลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรก	5
2.4 ช่วงกว้างแถบความถี่	5
2.4.1 ช่วงกว้างแถบความถี่แคบ	5
2.4.2 ช่วงกว้างความถี่กว้าง	5
2.5 การแมตช์ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ	5
2.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	5
2.7 อัตราการขยาย	6
2.8 พื้นฐานและโครงสร้างสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่น	6
2.8.1 พฤติกรรมคลื่นทั่วไปที่กระจายไปตามโครงสร้างท่อนำคลื่นแบบ สม่ำเสมอ	7
2.8.2 ระบายที่วางขนานกันในท่อนำคลื่น	9
2.8.3 คลื่นในตัวนำทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก	11
2.8.4 นิยามสำหรับตัวแปรของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์บางและแบบบริดจ์ทั่วไป	12
2.8.4.1 การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่โดยทฤษฎีกลุ่ม	12
2.9 พื้นฐานและโครงสร้างท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	17
2.10 แบบแผนคลื่นในท่อนำคลื่น	22
2.11 การแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่น	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 การโพลาริซ์	28
2.12.1 การโพลาริซ์เชิงเส้น	29
2.12.2 การโพลาริซ์วงกลม	30
2.12.3 การโพลาริซ์วงรี	33
2.13 การทดสอบโพลาริซ์ของคลื่น	36
บทที่ 3 การวิเคราะห์ คำนวณ และการออกแบบ	38
3.1 บทนำ	38
3.2 โครงสร้างของสายอากาศ	38
3.2.1 สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่	38
3.2.2 สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	39
3.3 วิธีการออกแบบสายอากาศ	39
3.3.1 การวิเคราะห์แบบรูปของสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่	40
3.3.2 การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศ	42
3.3.3 การเปลี่ยนแปลงความหนาของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่	42
3.3.4 สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า	44
3.3.5 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	45
3.3.6 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบบริดจ์คู่และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	46
3.3.7 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่ก้ำกึ่งลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบบริดจ์คู่และสี่เหลี่ยมผืนผ้า	48
3.3.8 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สนามเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศแบบบริดจ์คู่และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	49
3.3.9 คุณลักษณะการโพลาริซ์ของสายอากาศแบบบริดจ์คู่และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	50
3.4 การเปลี่ยนแปลงความยาวของสายอากาศแบบบริดจ์คู่	51
3.5 สรุป	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การสร้าง ทดสอบ และผลการทดสอบ	54
4.1 บทนำ	54
4.2 การสร้าง	54
4.3 การทดสอบและผลการทดสอบ	55
4.3.1 การทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง อิมพีแดนซ์ และค่าการสูญเสีย ย้อนกลับของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่	55
4.3.1.1 อุปกรณ์การทดสอบ	56
4.3.1.2 ลำดับขั้นตอนในการทดสอบ	56
4.3.1.3 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง อิมพีแดนซ์ และ ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ	57
4.3.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	58
4.3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่น	59
4.3.2.2 วิธีทดสอบ	59
4.3.2.3 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศ	61
4.3.2.4 ค่าความกว้างลำคลื่นจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	62
4.3.3 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ	65
4.3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาอัตราขยายของสายอากาศ	65
4.3.3.2 วิธีการทดสอบ	65
4.3.3.3 การหาอัตราขยายของสายอากาศ	66
4.3.4 การหาค่าสภาพแฉะงทิศทางของสายอากาศของสายอากาศบริดจ์คู่	67
4.3.5 การทดสอบการโพลาไรซ์ของสายอากาศแบบบริดจ์คู่	68
4.3.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการโพลาไรซ์	68
4.3.5.2 วิธีการทดสอบ	68
4.3.5.3 ผลการทดสอบการโพลาไรซ์	70
4.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่กับ สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	72
4.4.1 การสร้างสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบ สี่เหลี่ยมผืนผ้า	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 การทดสอบคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	73
4.4.2.1 อุปกรณ์การทดสอบ	73
4.4.2.2 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ	73
4.4.3 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ	73
4.4.4 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยาย การคำนวณค่าสภาพเจาะงทิสทางและการทดสอบการ โพลารไรซ์	75
4.4.5 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศแบบรีดจ์คู่และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	77
4.5 สรุป	78
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม	79
5.2 ข้อเสนอแนะ	80
ภาคผนวก ก.	81
ก-1 ขนาดของท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่และช่วงความถี่ใช้งาน	82
ก-2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ	83
ภาคผนวก ข.	84
ข-1 อนุพันธ์เวกเตอร์	85
ข-2 สมการแมกเวลล์	86
ข-3 สมการคลื่น	88
ข-4 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2D	93
กิตติกรรมประกาศ	100
หนังสืออ้างอิง	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 คลื่นระนาบสามารถแพร่กระจายไประหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่น	10
รูปที่ 2.2 การส่งคลื่นในแผ่นตัวนำที่มีระยะต่างกัน	10
รูปที่ 2.3 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก	11
รูปที่ 2.4 ลักษณะของคลื่นในท่อนำสี่เหลี่ยมมุมฉาก	11
รูปที่ 2.5 (ก) ภาพตัดตามขวางของพื้นที่ที่ล้อมด้วยสนามไฟฟ้าทั้งด้านบน และด้านล่าง และขนานด้านข้างด้วยสนามแม่เหล็ก (ข) การนำสนามแม่เหล็กออกแทนที่ด้วยสนามไฟฟ้า	13
รูปที่ 2.6 (ก) ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์บางขนาดสั้น (ข) ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์บางขนาดยาว	14
รูปที่ 2.7 ท่อตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่	15
รูปที่ 2.8 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีผนังนำไฟฟ้าสมบูรณ์ภายในเป็นวัสดุไม่มีการสูญเสีย	17
รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของสนาม EM ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	22
รูปที่ 2.10 ลักษณะการกวาดของลูกศรที่แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าขณะหนึ่ง	28
รูปที่ 2.11 การโพลาไรซ์แบบต่างๆ (ก) แบบเชิงเส้น (ข) แบบวงกลม (ค) แบบวงรี	29
รูปที่ 2.12 การโพลาไรซ์เชิงเส้นตามแกน X	30
รูปที่ 2.13 การโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา	31
รูปที่ 2.14 การโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย	32
รูปที่ 2.15 รูปวงรีที่หมุนเอียงที่เกิดจากสนามไฟฟ้ากวาดไปที่เวลาต่างๆ	34
รูปที่ 2.16 การทดสอบโพลาไรซ์ของคลื่นโดยใช้สายอากาศที่มีโพลาไรซ์เป็นเส้นตรง	36
รูปที่ 2.17 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ทดสอบได้โดยใช้สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์ของคลื่นเป็นแบบวงรีที่ทำมุมกับพื้นโลก	36
รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบของการโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้ายของคลื่นที่มีการโพลาไรซ์	37
รูปที่ 3.1 สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ (ก) โครงสร้างของสายอากาศ (Real Model) (ข) โครงสร้างแบบเส้นลวดตัวนำ (Wire – grid Model)	38
รูปที่ 3.2 สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ก) โครงสร้างของสายอากาศ (Real Model) (ข) โครงสร้างแบบเส้นลวดตัวนำ (Wire – grid Model)	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.3 รูปแบบการออกแบบท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่	40
รูปที่ 3.4 กราฟความยาวคลื่นตัดท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่	41
รูปที่ 3.5 การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนา ( $w$ )	43
รูปที่ 3.6 อัตราส่วนคลื่นนิ่งและค่าสภาพเจาะงทิสทางแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจาก การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม (NEC 2D)	44
รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอัตราขยายทงอค์ประกอบในแบบ 3 มิติ ของสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ (NEC 2D)	45
รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสองทิสทางจากท่อนำคลื่น แบบรีดจ์คู่ที่มีความกว้าง $0.06\lambda - 0.30\lambda$ ในระนาบสนามไฟฟ้า	45
รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสองทิสทางจากท่อนำคลื่น แบบรีดจ์คู่ที่มีความกว้าง $0.06\lambda - 0.30\lambda$ ในระนาบสนามแม่เหล็ก	46
รูปที่ 3.10 ค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศแบบสองทิสทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ เปรียบเทียบกับแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	47
รูปที่ 3.11 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบสองทิสทางจาก ท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่เปรียบเทียบกับแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	48
รูปที่ 3.12 ความกว้างลำคลื่นที่สนามเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศแบบสองทิสทางจาก ท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่เปรียบเทียบกับแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	49
รูปที่ 3.13 การวิเคราะห์การโพลาไรซ์โดยคำนวณจากโปรแกรม NEC2D ของสายอากาศ แบบสองทิสทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ (ก) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิสทาง $\theta$ (ข) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิสทาง $\phi$	50
รูปที่ 3.14 การวิเคราะห์การโพลาไรซ์โดยคำนวณจากโปรแกรม NEC2D ของสายอากาศแบบ สองทิสทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ก) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิสทาง $\theta$ (ข) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิสทาง $\phi$	50
รูปที่ 3.15 การเปลี่ยนความยาวรีดจ์ของสายอากาศแบบรีดจ์คู่	51
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบรีดจ์คู่ที่มีความยาวรีดจ์ เท่ากับ $0.108\lambda$ $0.132\lambda$ และ $0.156\lambda$	
รูปที่ 3.17 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบสองทิสทางจาก ท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ที่ขนาดความยาวรีดจ์ต่อความยาวคลื่น $0.108$ ถึง $0.156$	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 ลักษณะท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ที่ได้สร้างขึ้น	55
(ก) ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ที่ใช้ในการทดสอบ	
(ข) ลักษณะการต่อคอนเน็คเตอร์กับโพรมเข้ากับท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่	
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่	57
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่	57
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่	58
รูปที่ 4.5 ลักษณะการวางสายอากาศเมื่อทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก	58
รูปที่ 4.6 ลักษณะการวางสายอากาศเมื่อทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า	59
รูปที่ 4.7 ภาพฉายขณะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก	60
รูปที่ 4.8 ภาพฉายขณะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า	61
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	61
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ในระนาบสนามแม่เหล็กเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	62
รูปที่ 4.11 การหาค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ	63
รูปที่ 4.12 การหาค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์ (NEC 2D)	63
รูปที่ 4.13 การหาค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบ	64
รูปที่ 4.14 การหาค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวิเคราะห์	64
รูปที่ 4.15 รูปการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ	65
รูปที่ 4.16 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 สายอากาศส่งแบบไดโพล	69
รูปที่ 4.18 การจัดเตรียมเครื่องมือในการทดสอบสายอากาศ	69
รูปที่ 4.19 การทดสอบการโพลาไรซ์แบบร่วม (Co-Polarization)	69
รูปที่ 4.20 การทดสอบการโพลาไรซ์แบบไขว้ (CROSS-Polarization)	70
รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบการโพลาไรซ์ ที่ความถี่ 1.6 GHz	70
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบการโพลาไรซ์ ที่ความถี่ 1.8 GHz	71
รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบการโพลาไรซ์ ที่ความถี่ 2 GHz	71
รูปที่ 4.24 สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	72
รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบสองทิศทางจาก ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	73
รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่น แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	74
รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบสองทิศทาง จากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	74
รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับการวิเคราะห์	75
รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในระนาบสนามแม่เหล็กเทียบกับการวิเคราะห์	75
รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบการโพลาไรซ์ที่ความถี่ 1.8 GHz	76
รูปที่ 4.31 การทดสอบอัตรการขยายจากความถี่ 1.4-2.2 GHz	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมการสำคัญของแบบแผนคลื่น TE	25
ตารางที่ 4.1 ค่าการเปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่กับแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	77

## ภาคผนวก (ก)

ตาราง ก-1 ขนาดของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่และช่วงความถี่ที่ใช้งาน	82
ตาราง ก-2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ	83



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เรื่องเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นนักวิทยาศาสตร์ที่มีบทบาทอย่างสำคัญต่อการค้นพบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่หลายคนด้วยกันคือ แอมแปร์ได้สรุปผลการทดลองในปี ค.ศ. 1820 – 1826 และข้อเสนอนี้ถูกเรียกว่ากฎของแอมแปร์ หลังจากที่แอมแปร์ได้เสนอกฎแอมแปร์ออกมาไม่นานในปี ค.ศ.1831 ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ทำการทดลองและค้นพบว่าสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นได้จากการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้นับว่าเป็นก้าวสำคัญของการค้นพบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในเวลาต่อมาสิ่งที่ฟาราเดย์ค้นพบนี้เรียกว่ากฎของฟาราเดย์ ถึงแม้จะมีการค้นพบของแอมแปร์และฟาราเดย์ว่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ามีจริง ในเวลานั้นก็ยังไม่มีการอธิบายได้ว่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนี้จะเคลื่อนที่ออกไปได้อย่างไรจนกระทั่งปี ค.ศ. 1854 เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์ (James Clark Maxwell) ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับกระแสดิสเพลสเมนต์ ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าว่าจะเป็นกระแสที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ ด้วยแนวคิดของแมกซ์เวลล์ที่กล่าวมาทั้งหมดในสมัยนั้น ไม่สามารถทำการพิสูจน์ให้เห็นแน่ชัดลงไปว่าถูกต้องหรือไม่ จนกระทั่งหลังจากนั้นประมาณ 25 ปี ในปี 1888 ไฮน์ริค รูคอล์ฟ เฮิร์ตซ์ (Heinrich Rudolph Hertz) ได้ทำการทดลองแสดงให้เห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีอยู่จริงทางกายภาพ โดยทำการทดลองแสดงให้เห็นถึงการแทรกสอด (Interference) การสะท้อน (Reflection) และการหักเห (Refraction) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งทำให้เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป ในเวลาต่อมาสำหรับการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานสื่อสาร โทรคมนั้นเริ่มขึ้นครั้งแรกเมื่อในปี ค.ศ.1897 โดยมาร์โคนี (Marconi) ได้นำมาใช้ในการส่งโทรเลข จึงทำให้เกิดการพัฒนาการพัฒนาระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ที่เป็นไปอย่างต่อเนื่องจากปี ค.ศ.1969 ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเบลล์ (Bell Laboratories) ในอเมริกาได้ให้แนวคิดเบื้องต้นของระบบเซลลูลาร์ อาศัยระยะเวลาเพียงไม่กี่ปีมีระบบเซลลูลาร์ เกิดขึ้นมากมายทั้งในประเทศญี่ปุ่น (NTT:Nippon Telephone and Telegraph Company, JTACS:Japanese Tota; Access Communication System) สแกนดิเนเวีย (NMT:Nordic Mobile Telephone) อเมริกา (AMPS:Advanced Mobile Phone System) ยุโรป (TACS:Total Access Communications System) และมีการพัฒนาเป็นระบบที่สามารถใช้ร่วมกันได้ในหลายประเทศ เช่น ระบบ GSM (Global System for Mobile Communication) ในทวีปยุโรป นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาระบบโทรศัพท์ไร้สายเสียบ (Cordless- Telephone) เพื่อนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะเมื่อระบบโทรศัพท์ไร้สายเสียบ PHS (Personal Handy Phone System) ในประเทศญี่ปุ่นเริ่มใช้งานในปี ค.ศ. 1993 ทำให้เกิดความนิยมเป็นอย่างมากเพราะค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบเซลลูลาร์

ระบบ PHS นี้ นับว่าเป็นก้าวแรกที่สำคัญของบริการการสื่อสารส่วนบุคคล (Personal Communication Service:PCS) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้หลักการของเซลล์ขนาดเล็กหรือไมโครเซลล์

PHS เป็น โทรศัพท์ที่มีความสามารถอยู่ระหว่าง โทรศัพท์พื้นฐาน (Public Switched Telephone Network:PSTN) กับโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์โดยพัฒนาจากโทรศัพท์ไร้สายยุคที่ 2 หรือ CT2 ประเทศญี่ปุ่น

ในประเทศไทยบริษัทเทเลคอมเอเชีย (Telecom Asia Co.,Ltd) และบริษัท ทศท. คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) (TOT Corporation Public Company Limited) ได้นำระบบ PHS มาใช้งานกับโทรศัพท์ตามบ้านในกรุงเทพมหานครตั้งแต่ปลายปี ค.ศ. 1997 โดยใช้เทคโนโลยีที่สำคัญ 3 ประการ คือ PHS PSTN และ Intelligent Network (IN) และเรียกระบบที่เกิดขึ้นใหม่นี้ว่า PCT (Personal Communication Telephone) ซึ่งใช้งานในย่านความถี่ช่วง 1895.15-1917.95 เมกะเฮิรตซ์ โดยมีความถี่กลางอยู่ที่ 1900 เมกะเฮิรตซ์

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใช้งานโทรศัพท์ PCT หรือ PHS ในบริเวณที่มีลักษณะเป็นพื้นที่ตามแนวยาวและแคบ เช่น บนทางด่วน ในอุโมงค์ หรือโถงทางเดินภายในอาคาร ซึ่งมีลักษณะเป็นทางที่มีขอบเขตจำกัด มีพื้นที่ครอบคลุมประมาณ 200 เมตร ถึง 1 กิโลเมตร การใช้สายอากาศที่สถานีฐานเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทางจะให้ประสิทธิภาพในการครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้ไม่ดีนัก และจะเกิดการสูญเสียสัญญาณในบริเวณที่ไม่มีมีการใช้งานด้วย ดังนั้น จึงได้มีผู้แนะนำเสนอให้ใช้สายอากาศแบบสองทิศทาง (Bidirectional Antenna) ที่สถานีฐานในบริเวณดังกล่าว และในปัจจุบันได้มีผู้วิจัยในประเทศญี่ปุ่นจำนวนมากได้พัฒนาและนำเสนอสายอากาศแบบสองทิศทางรูปแบบใหม่ๆ ออกมาหลายชนิดด้วยกันเพื่อใช้งานในบริเวณดังกล่าว

สำหรับในประเทศไทยนั้นได้มีผู้วิจัยนำเสนอสายอากาศแบบสองทิศทางเพื่อใช้งานเป็นสายอากาศที่สถานีฐานในระบบ PCT โดยมีลักษณะเป็นวงแหวน ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอกรณีที่ใช้สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ ด้วยรูปแบบที่สร้างได้ง่ายและราคาไม่สูงนัก

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ของระบบ GSM ในบริเวณโถงทางเดินภายในอาคารและบนทางด่วน ซึ่งได้ออกแบบให้สายอากาศนี้มีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง เพื่อให้เหมาะสมกับพื้นที่ที่นำสายอากาศไปใช้งานด้วย โดยนำเสนอสายอากาศ 2 ชนิด มีโครงสร้างเป็นท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่และท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งข้อดีของสายอากาศที่นำเสนอคือ สายอากาศมีช่วงกว้างความถี่ใช้งานกว้าง และขนาดเล็กทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องใช้เนื้อที่มากในการติดตั้ง

สายอากาศในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ ออกแบบ ทดสอบ และประเมินคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ เช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio:VSWR) รวมทั้งการโพลาไรซ์และช่วงกว้างความถี่ใช้งานนอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบผลของคุณสมบัติและท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่และท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2D (Numerical Electromagnetics Code 2:NEC2D) และรวมถึงนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อโดยใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลของคุณสมบัติที่ต้องการ ส่วนผลการทดสอบนั้นได้มาจากการทดสอบจริงโดยการสร้างสายอากาศต้นแบบ และทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลการคำนวณของโปรแกรมคำนวณ

### 1.3 เนื้อหาของปฏิญญาพันธบัตร

บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นมาและความสำคัญ วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา อีกทั้งเนื้อหาโดยรวมที่ได้รวบรวมไว้ในปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้

บทที่ 2 เป็นส่วนที่กล่าวถึงพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่น นิยามสำหรับท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่และแบบบริดจ์ทั่วไป พื้นฐานของสายอากาศแบบทอสี่เหลี่ยมผืนผ้า การโพลารไรซ์ และการทดสอบโพลารไรซ์

บทที่ 3 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ถ้าวัด กล่าวถึง NEC2D ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ กล่าวคือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ เป็นการแสดงกระบวนการที่สำคัญในการวิเคราะห์ห้ออกแบบสายอากาศให้ได้ตามความต้องการ

บทที่ 4 เป็นขั้นตอนการสร้าง การทดสอบ และแสดงการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลทั้งหมด ตลอดจนวิจารณ์ และเสนอแนวทางสำหรับการพัฒนาสายอากาศต่อไป

สุดท้ายเป็นภาคผนวกที่รวบรวมหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในปฏิญญาพันธบัตรนี้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### 2. พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับสายอากาศ (Essential Antenna Parameters)

#### 2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น [1]

ความหมายของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เขียนให้อยู่ในรูปของ 2 มิติ (หรือ 3 มิติ) เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่จุดห่างไกลจากแหล่งกำเนิดคลื่นในทิศของ  $\theta$  หรือ  $\phi$  แบบรูปของการกระจายคลื่นโดยทั่วไปจะมี 2 แบบ ถ้าเขียนจากสนามไฟฟ้าจะเรียกว่าสนามการแพร่กระจาย (Field Pattern) ถ้าเป็นแบบรูปการแพร่กระจายที่เขียนจากกำลังคลื่นก็จะเรียกว่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่น (Power Pattern) และโดยปกติจะหารไว้ด้วยค่าสูงสุด ซึ่งจะทำให้แบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 หรือถ้ากำกับหน่วยเป็น dB ค่าสูงสุดก็จะเป็น 0 dB

##### 2.1.1 ลำคลื่นหลักของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นนั้นมีชื่อเรียกลักษณะสำคัญ ๆ ดังนี้ คือลำคลื่นหลัก (Main Beam) หรือเมเจอร์โลบ (Major Lobe) คือลำคลื่นส่วนที่มีกำลังคลื่นกระจายออกไปมากที่สุด และโดยทั่วไปจุดสูงสุดของการแพร่กระจายคลื่นจะอยู่ในลำคลื่นหลักนั้น

ลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe) หรือลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) คือลำคลื่นส่วนอื่นทั้งหมดนอกจากลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นด้านหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลักปกติแล้ว ลำคลื่นย่อยจะเกิดการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้น้อยที่สุด

##### 2.1.2 บริเวณต่าง ๆ ของสนาม [2]

เราแบ่งบริเวณพื้นที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ

สนามรีแอกทีฟระยะใกล้เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุดบริเวณนี้จะมีระยะทาง

$$R \leq 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (2.1)$$

สนามกระจายระยะใกล้เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณ สนามระยะไกลในบริเวณนี้จะมีระยะทาง

$$0.62\sqrt{D^3/\lambda} \leq R < (2D^2/\lambda) \quad (2.2)$$

บริเวณสนามระยะไกลเป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่สุดเท่ากับ  $D$  บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง

$$R \geq (2D^2/\lambda) \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ความกว้างลำคลื่นที่กึ่งลดครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth : HPBW)

เป็นมุมที่วัดระยะจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด

## 2.3 ค่าความกว้างลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width : FNBW)

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าลดลงเป็นศูนย์โดยจะวัดในหน่วยขององศา

## 2.4 ช่วงกว้างแถบความถี่ (Bandwidth : $\Delta f$ )

สายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศกำหนดให้อยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่น การโพลาไรซ์ อัตราขยายของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ

### 2.4.1 ช่วงกว้างความถี่แคบ (Narrow Band)

คือความถี่ที่มีช่วงความถี่ของความถี่ใช้งานน้อย

$$\Delta f = \left[ \frac{(f_H - f_L)}{f_o} \right] \times 100\% \quad (2.4)$$

### 2.4.2 ช่วงกว้างความถี่กว้าง (Broad Band)

คือความถี่ที่มีช่วงความถี่ของความถี่ใช้งานมาก

$$\Delta f = \frac{f_H}{f_L} \cdot 1 \quad (2.5)$$

## 2.5 การแมตช์ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ (Matching Impedance)

การเข้ากันได้ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ จะเป็นตัวบอกว่าคลื่นที่ออกจากแหล่งกำเนิดนั้นสามารถจะถูกส่งผ่านสายอากาศออกไปได้หมดหรือไม่ โดยพิจารณาองค์ประกอบที่สำคัญ 2 อย่างคือค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) ของสายอากาศ และค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance) ของสายนำสัญญาณ

## 2.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางคือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่าง ๆ มากน้อยแค่ไหน ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_a} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_o = \frac{U_{\max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \quad (2.7)$$

เมื่อ	$D_g$	=	ไดเรกทีฟเกน
	$D_o$	=	ไดเรกทีวิตี
	$U$	=	ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น
	$U_{\max}$	=	ค่าสูงสุดของความเข้มการแผ่กระจายคลื่น
	$U_o$	=	ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส
	$P_{rad}$	=	กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (2.8)$$

## 2.7 อัตราการขยาย (Gain)

คือความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ประสิทธิภาพของสายอากาศจะประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ ประสิทธิภาพตัวนำและประสิทธิภาพของฉนวน

$$\text{อัตราการขยาย} = \text{ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง} \times \text{ประสิทธิภาพของสายอากาศ} \quad (2.9)$$

## 2.8 พื้นฐานและโครงสร้างสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่น [3]

ท่อนำคลื่น (Wave Guide) หมายถึงอุปกรณ์ที่บังคับหรือนำส่งการแผ่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปในลักษณะที่ต้องการ โดยกำหนดจากรูปร่างของท่อนำคลื่นส่วนประกอบของท่อนำคลื่นสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่สูงกว่าย่านความถี่ SHF EHF การใช้สายส่งแบบ 2 ตัวนำ นั้นจะใช้ไม่ได้ผลเพราะว่าค่าคงตัวการลดทอนของคลื่น TEM ตามสายที่เป็นผลมาจากสภาพความนำจำกัดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นตามความต้านทานต่อความยาวหนึ่งหน่วยความต้านทานของสายเป็นปฏิภาคโดยตรงกับรากที่สองของความถี่และโดยเฉพาะการลดทอนไม่ควรมีค่าสูงที่ความถี่ไมโครเวฟ

ดังนั้นจึงควรจะศึกษาถึงคุณลักษณะเฉพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่แผ่กระจายภายในท่อโลหะกลวง(Hollow Metal Pipe) ทั้งนี้เพราะว่าท่อโลหะเป็นตัวนำเดี่ยวที่มีผิวขนาดใหญ่ ซึ่งต้อง ใช้การคาดหมายว่าการลดทอนอันเนื่องมาจากความต้านทานจะมีค่าที่ต่ำกว่า ท่อโลหะกลวงเป็นรูปแบบหนึ่งของโครงสร้างท่อนำคลื่นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Wave – Guiding Structure)

สายส่งสามารถใช้นำทางพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (EM) จากจุดหนึ่ง (เครื่องกำเนิด) ไปยังอีกจุดหนึ่ง (โหลด) ได้ซึ่งท่อนำคลื่น ก็เป็นอีกความหมายหนึ่งที่มีจุดมุ่งหมายอันเดียวกัน อย่างไรก็ตามท่อนำคลื่นก็มีความแตกต่างจากสายส่งในบางประการแม้ว่าจะพิจารณาในรูปแบบพิเศษก็ตาม กล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประการแรกสายส่งสามารถทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (TEM) ได้เท่านั้น ส่วนท่อนำคลื่นทำให้เกิดรูปแบบการแพร่กระจายของสนามต่าง ๆ (Field Configuration) ขึ้นมากมาย

ประการที่สองที่ความถี่ไมโครเวฟ (3 - 300 GHz) สายส่งกลับไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) และการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss) แต่ท่อนำคลื่นกลับใช้งานได้ดียิ่งกว่าในย่านความถี่นั้น เพื่อให้ได้รับแถบกว้างความถี่ที่กว้างกว่าและการลดทอนสัญญาณ (Signal Attenuation) ที่ต่ำกว่าและยิ่งไปกว่านั้นสายส่งอาจทำงานจากกระแสตรง ( $f=0$ ) ไปจนถึงที่ความถี่สูงมาก ๆ แต่ท่อนำคลื่นสามารถทำงานเหนือความถี่หนึ่งขึ้นไปซึ่งความถี่นั้นว่าความถี่ตัด (Cutoff Frequency) ได้เท่านั้น เพราะฉะนั้นพฤติกรรมของท่อนำคลื่นก็จะเป็นดังเช่น วงจรกรองผ่านสูง (High-pass Filter) แม้ว่าท่อนำคลื่นจะมีรูปแบบใด ๆ ก็ตาม แต่ภาคตัดขวางของมันก็จะสมมูลกับท่อนำคลื่นอาจเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือวงกลมก็ได้

การเริ่มต้นการวิเคราะห์พฤติกรรมทั่วไปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นสมมูลที่มีภาคตัดขวางใด ๆ จะได้ทราบว่ามันเกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (TEM) ที่ไม่มีส่วนประกอบสนามในทิศทางการกระจายคลื่นแล้ว ยังมีคลื่นแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic (TM) Wave) และคลื่นไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric (TE) Wave)

### 2.8.1 พฤติกรรมคลื่นทั่วไปที่กระจายไปตามโครงสร้างนำท่อนำคลื่นแบบสม่ำเสมอ (Wave Behaviors Along Uniform Guiding Structures)

ในการพิจารณาคลื่นที่แพร่กระจายไปตามโครงสร้างนำท่อนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางสม่ำเสมอ โดยจะสมมติว่าคลื่นแพร่กระจายไปตาม  $+z$  ที่มีค่าคงตัวแพร่กระจาย  $\gamma = \alpha + j\beta$  สำหรับการแปรตามแบบ (Harmonic Time Dependence) ไปกับความถี่เชิงมุม การแปรไปกับ  $z$  และ  $t$  สำหรับทุกส่วนประกอบสนาม สามารถอธิบายจากตัวประกอบเอ็กซ์โพเนนเชียล คือไปนี้

$$e^{-\gamma z} \cdot e^{j\omega t} = e^{(j\omega t - \gamma z)} = e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \tag{2.10}$$

พิจารณาท่อนำคลื่นในรูปแบบท่อโลหะตรงที่ภายในประกอบด้วยไดอิเล็กตริก โดยมีภาคตัดขวางและวางไปตามแนวแกน  $z$  ความเข้มสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามแม่เหล็กในบริเวณไดอิเล็กตริกที่ไม่มีประจุภายในท่อจะสอดคล้องกับสมการของเฮล์มโฮลทซ์เวกเตอร์เอกพันธ์ (ภาคผนวก ข-2) คือ

$$\nabla^2 \bar{E} + k^2 \bar{E} = 0 \tag{2.11}$$

$$\nabla^2 \bar{H} + k^2 \bar{H} = 0 \tag{2.12}$$

เมื่อ  $E$  และ  $H$  เป็นเวกเตอร์สามมิติและ  $k$  เป็นจำนวนคลื่น

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวดำเนินการลาปลาซเขียนสามมิติ  $\nabla^2$  อาจจะกระจายออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ พิกัดตามขวาง  $\nabla_{u1-u2}^2$  และพิกัดตามยาว  $\nabla_z^2$  และสำหรับท่อนำคลื่นซึ่งมีภาคตัดขวางรูปสี่เหลี่ยม เราสามารถใช้พิกัดคาร์ทีเซียนได้ว่า

$$\begin{aligned}\nabla^2 \bar{E} &= (\nabla_{xy}^2 + \nabla_z^2) \bar{E} \\ &= \left( \nabla_{xy}^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \bar{E} \\ &= \nabla_{xy}^2 \bar{E} + \gamma^2 \bar{E}\end{aligned}\quad (2.14)$$

แทนสมการที่ (2.14) ในสมการที่ (2.11) จะได้

$$\nabla_{xy}^2 \bar{E} + (\gamma^2 + k^2) \bar{E} = 0 \quad (2.15)$$

และในทำนองเดียวกันนี้ จากสมการที่ (2.12) จะได้

$$\nabla_{xy}^2 \bar{H} + (\gamma^2 + k^2) \bar{H} = 0 \quad (2.16)$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.15) และ (2.16) เป็นสมการข้อยู่อันเนื่องกันอันดับสองของส่วนประกอบ  $E$  และ  $H$  จากสมการในความเป็นจริงแล้ว  $E$  และ  $H$  ต่าง ๆ จะไม่เป็นอิสระต่อกันทั้งหมด ไม่จำเป็นต้องแก้สมการทั้งหมด และไม่จำเป็นต้องแก้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองทั้งหมดสมการของส่วนประกอบทั้งหมดของ  $E$  และ  $H$  ให้มาพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบทั้งหมดในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนโดยกระจายสมการเคิร์ลทั้งสองที่ปราศจากแหล่งกำเนิด โดยมี  $J = 0$

$\nabla \times \bar{E} = -j\omega\mu\bar{H}$ (2.17)	$\nabla \times \bar{H} = j\omega\epsilon\bar{E}$ (2.18)
$\frac{\partial \bar{E}_z}{\partial y} + \gamma \bar{E}_y = -j\omega\mu\bar{H}_x$ (2.17 ก)	$\frac{\partial \bar{H}_z}{\partial y} + \gamma \bar{H}_y = j\omega\epsilon\bar{E}_x$ (2.18 ก)
$-\gamma \bar{E}_x - \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial x} = -j\omega\mu\bar{H}_y$ (2.17 ข)	$-\gamma \bar{H}_x - \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial x} = j\omega\epsilon\bar{E}_y$ (2.18 ข)
$\frac{\partial \bar{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \bar{E}_x}{\partial y} = -j\omega\mu\bar{H}_z$ (2.17 ค)	$\frac{\partial \bar{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \bar{H}_x}{\partial y} = j\omega\epsilon\bar{E}_z$ (2.18 ค)

จะเห็นว่าอนุพันธ์ย่อยเมื่อเทียบกับ  $z$  จะถูกแทนที่โดยการคูณด้วย  $-\gamma$  ซึ่งสำหรับทุกส่วนประกอบ

ของปริมาณสนาม ในสมการข้างต้นจะเป็นเฟสเซอร์ที่ขึ้นอยู่กับ  $x$  และ  $y$  เท่านั้น โดยทั้งนี้ตัวประกอบร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ขึ้นอยู่กับ  $z$  ได้ถูกตัดทิ้งไปเมื่อทำการแก้สมการเหล่านี้ เราสามารถที่จะหาส่วนประกอบสนามตามขวางของ  $H_x, H_y, E_x, E_y$  ในพจน์ของส่วนประกอบตามยาว

เราจะนำเอาสมการที่ (2.17ก) รวมกับสมการที่ (2.18ข) และจะได้รับ  $H_x$  ในเทอมของ  $E_z$  และ  $H_z$  คือ

$$\bar{H}_x = \frac{1}{\omega^2 \mu \epsilon + \gamma^2} \left\{ j\omega \epsilon \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial y} - \gamma \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial x} \right\} \tag{2.19}$$

จะได้

$$\bar{H}_x = -\frac{1}{h^2} \left( \gamma \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial x} - j\omega \epsilon \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial y} \right) \tag{2.20}$$

$$\bar{H}_y = -\frac{1}{h^2} \left( \gamma \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial y} + j\omega \epsilon \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial x} \right) \tag{2.21}$$

$$\bar{E}_x = -\frac{1}{h^2} \left( \gamma \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial x} + j\omega \mu \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial y} \right) \tag{2.22}$$

$$\bar{E}_y = -\frac{1}{h^2} \left( \gamma \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial y} - j\omega \mu \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial x} \right) \tag{2.23}$$

เมื่อ

$$h^2 = \gamma^2 + k^2 \tag{2.24}$$

ในสมการที่ (2.15) และ (2.16) ตามลำดับภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการและใช้สมการที่ (2.19) ถึง (2.23) ก็จะได้รับส่วนประกอบของสนามอื่น ๆ เพื่อความสะดวก จะแบ่งคลื่นซึ่งกระจายอยู่ในท่อนำคลื่นแบบสม่ำเสมอ ออกเป็น 3 แบบตาม  $E_z$  และ  $H_z$  ดังนี้

- 1) โหมดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electromagnetic (TEM) Mode) จะพบว่าคลื่นในทิศ  $H_z = E_z = 0$  ในระบบสายคู่ขนาน หรือสายโคแอกเซียล
- 2) โหมดคลื่นแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic (TM) Mode) ซึ่งมีเฉพาะคลื่นในทิศ  $E_z$  เท่านั้นที่เกิดขึ้น ส่วน  $H_z = 0$  จะพบในท่อที่เป็นรูที่มีรูปแบบเช่น ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก ทรงกลม และวงรี
- 3) โหมดคลื่นไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric (TE) Mode) ซึ่งมี  $H_z$  เท่านั้นที่เกิดขึ้น ส่วน  $E_z = 0$

### 2.8.2 ระบายที่วางขนานกันในท่อนำคลื่น (Parallel Plane Waveguide) [4]

ขณะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายไปในที่ว่าง (Free space) ถ้าเรานำแผ่นตัวนำ 2 แผ่น มากันขวางบังคับให้คลื่นเดินทางอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองคลื่นที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำนี้มีชื่อเรียกว่า คลื่นระบาย (Plane Wave) ซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นมีสนามไฟฟ้า ( $E$ ) และสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นและมีหน้าคลื่น (Wave Front) เป็นระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากกันระหว่างแผ่นตัวนำที่เกิดขึ้นมาจากประจุที่

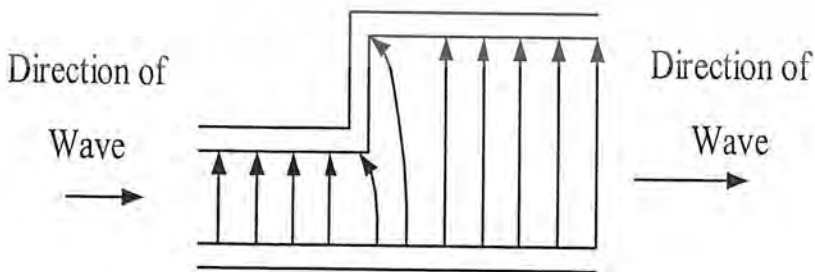
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

กระจายอยู่ตามพื้นผิวดำนำ และกระแสที่ไหลผ่านพื้นผิวดำนำเวกเตอร์ (Vector) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะตั้งฉากกับผิวดำนำ (โดยเริ่มจากประจุที่ผิวดำนำด้านหนึ่งไปสิ้นสุด (Terminated) ที่ประจุนผิวดำนำอีกด้านหนึ่ง) ส่วนสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสที่ไหลผ่านผิวดำนำ จะมีเวกเตอร์ของสนามขนานไปกับผิวดำนำ การเกิดสนามทั้งสองในลักษณะเช่นนี้ จะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบ (Plane Wave) สามารถแพร่กระจายไประหว่างแผ่นดำนำทั้ง 2 ได้ ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 คลื่นระนาบสามารถแพร่กระจายไประหว่างแผ่นดำนำสองแผ่น

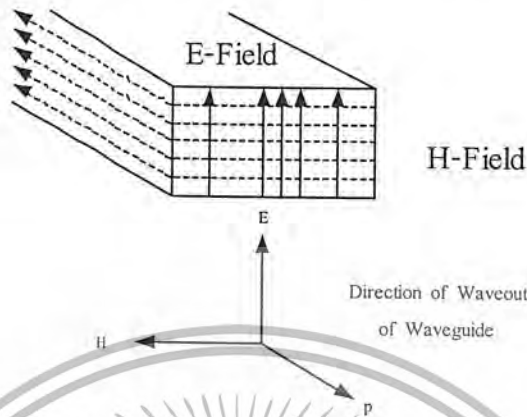
ถ้าระยะห่างระหว่างแผ่นดำนำเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันจะทำให้เกิดคลื่นลักษณะหนึ่งมีชื่อว่า คลื่นเชิงซ้อน (Complex Wave) ซึ่งคลื่นนี้จะเกิดในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของแผ่นดำนำ (หรือเมื่อคลื่นมีการเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่) สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นสนามตั้งฉากเคลื่อนที่ในระหว่างแผ่นดำนำขนานที่แคบ เมื่อมาถึงจุดต่อของการเปลี่ยนระยะห่างสนามไฟฟ้าจะเกิดการโค้งงอ และกลับกลายเป็นสนามตั้งฉากอีกครั้งหนึ่งเมื่อเข้าสู่แผ่นดำนำขนานที่มีระยะห่างกว้าง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การส่งคลื่นในแผ่นดำนำที่มีระยะต่างกัน

2.8.3 คลื่นในตัวนำทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Wave in Rectangular Guide)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ประกอบด้วสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีคุณลักษณะเฉพาะ ดังรูป 2.3

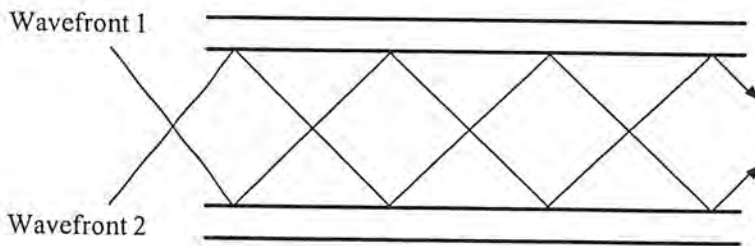


รูปที่ 2.3 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอยู่ภายในท่อนำคลื่นจุดที่มีความเข้มสูงสุด คือจุดกึ่งกลางของความยาวท่อนำคลื่นและความเข้มของสนามไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ที่ผนังด้านข้างคือสนามไฟฟ้าที่ขนานกับพื้นผิวตัวนำจะมีความเข้มเป็นศูนย์

สนาม  $H$  ที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นจะค่อเนื่องกันและวนไปรอบท่อนำคลื่น โดยที่เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็ก จะไม่ตั้งฉากกับผนังของแผ่นตัวนำสนามแม่เหล็กจะวนต่อกันเป็นวงรอบและขนานไปกับผนังตัวนำ คลื่น TEM นั้นไม่สามารถแพร่กระจายไปในท่อนำคลื่นซึ่งเป็นตัวกลางที่มีตัวนำเดี่ยวฉะนั้น โหมดของคลื่นในท่อนำคลื่นมี 2 โหมด คือ TE และ TM

จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงระนาบคลื่นจาก 2 แหล่งซึ่งมีขนาดและความถี่เท่ากันเข้าไปในท่อนำคลื่น ในลักษณะซิกแซกขึ้นลงเนื่องจากกระทบย้อนกับผิวตัวนำ แต่คลื่นทั้งสองจะหักล้างกันและให้สนามไฟฟ้าที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นเป็นศูนย์ไปตลอด แนวการแพร่กระจายของคลื่นจากคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะให้มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนกลับ โดยที่มุมตกกระทบซึ่งให้แนวของสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ตรงกันไปตามผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของคลื่นที่ใช้งานและขนาดของท่อนำคลื่น



รูปที่ 2.4 ลักษณะของคลื่นในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนบุคคลเท่านั้น ไม่สามารถนำออกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารได้  
 3. ไม่สามารถนำเอกสารไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 4. ไม่สามารถนำเอกสารไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา  
 5. ไม่สามารถนำเอกสารไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด ๆ ทั้งสิ้น  
 6. หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ  
 7. หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า  
 8. หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า  
 9. หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า  
 10. หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า

## 2.8.4 นิยามสำหรับตัวแปรของท่อนำคลื่นแบบริดจ์บางและแบบริดจ์ทั่วไป [5]

นิยามสำหรับความถี่ตัด (Cutoff Frequency) และการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของท่อนำคลื่นริดจ์แบบบาง (Finned Waveguides) และแบบทั่วไป ถูกนำมากล่าวถึงเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขสำหรับทุกตัวแปรจากการติดตามผลการทดลองใช้ สมการที่ได้สามารถสร้างให้ง่ายขึ้น โดยการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ และวิเคราะห์โครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบริดจ์ เพื่อเพิ่มความถูกต้องและความคงทนต่อชิ้นงาน

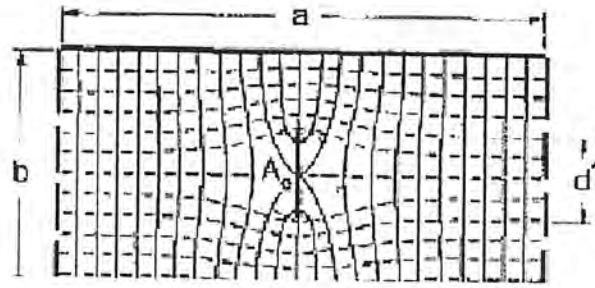
ท่อนำคลื่นแบบริดจ์ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพราะคุณสมบัติที่ดี คือมีช่วงความถี่ที่กว้าง และมีการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ (Impedance) ต่ำ นอกจากนั้นการออกแบบไมโครเวฟและวงจรถิ่นมิลลิเวฟ (Millimeter-Wave Circuits) ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นบางก็ถูกวิเคราะห์และออกแบบ โดยใช้ทฤษฎีของท่อนำคลื่นชนิดนี้ด้วย อย่างไรก็ตามผู้ออกแบบต้องวางใจถึงผลที่อยู่ในรูปแบบตาราง และไดอะแกรมการออกแบบและกราฟต่าง ๆ ซึ่งจำกัดอยู่ในขอบเขตของภาพตัดขวางที่มีมิติต่างกัน แต่ถ้ามีความจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเชิงเรขาคณิตจำเป็นต้องแก้สมการ (Transverse Resonance Method) หรือวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Technique) ซึ่งวิธีการเหล่านี้ขาดความยืดหยุ่นและความรวดเร็วในการออกแบบ โดยเฉพาะในกรณีที่มีมิติของตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (เช่นในส่วนของรีโซนาเตอร์) นอกจากนี้การวิเคราะห์โครงสร้างก็ไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีการนี้ได้

ในโครงงานนี้นิยามเริ่มต้นของความถี่ตัดและการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของโหมดพื้นฐานหลัก (Dominant Mode) ในท่อนำคลื่นแบบริดจ์เดี่ยวและคู่ ถูกนำมาประยุกต์ใช้โดยนำท่อนำคลื่นแบบริดจ์บาง ถูกนำมาใช้ทดสอบก่อนเป็นกรณีพิเศษ จากนั้นท่อนำคลื่นแบบริดจ์อื่นที่ถูกแบ่งแยกตามขนาดความหนาจึงถูกนำมาทดสอบเป็นลำดับต่าง ๆ ไป นิยามที่ใช้มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีการดอกรวน และมีเทอมที่ได้จากค่าผิดพลาดจากการทดลองใช้ เพื่อยืนยันว่าตัวเลขที่ได้มันจะดีกว่าด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขหลาย ๆ แบบ

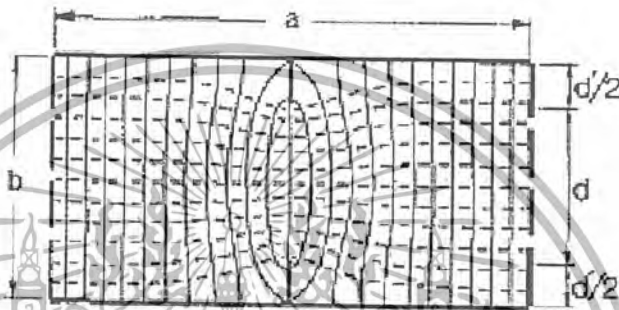
### 2.8.4.1 การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่โดยทฤษฎีการก่อกวน

ความถี่ตัดเป็นที่รู้จักกันว่าท่อนำคลื่นแบบริดจ์ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของท่อนำคลื่นจะมีความถี่ตัดที่ต่ำในโหมดพื้นฐานตลอดการเพิ่มความจุ ถ้าท่อนำคลื่นแบบริดจ์มีขนาดสั้นและบางผลที่ได้จะถูกคำนวณได้แม่นยำขึ้นแม้ว่าจะมีสิ่งรบกวนอื่น ๆ อยู่

1. ท่อนำคลื่นแบบริดจ์บางขนาดสั้น (Wave Guide with Short Fins) ดังรูปที่ 2.5 (ก) แสดงให้เห็นภาพตัดตามขวางของพื้นที่ ที่ล้อมด้วยสนามไฟฟ้า ทั้งด้านบนด้านล่างและขนานด้านข้างด้วยสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าเริ่มต้นถูกรบกวนด้วยความถี่ชักนำ (Conducting bond) จากอุปกรณ์ที่แขวนไว้ตรงกลาง การเพิ่มขึ้นภายในตัวเก็บประจุสถิต (Static Capacitance) ของเส้นในภาพ เนื่องจากช่วงความถี่สามารถแสดงให้ดูในรูปอัตราส่วนของพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 (ก) ภาพตัดตามขวางของพื้นที่ที่ล้อมด้วยสนามไฟฟ้าทั้งด้านบนและด้านล่างและขนานด้านข้างด้วยสนามแม่เหล็ก  
 (ข) การนำสนามแม่เหล็กออกและแทนที่ด้วยสนามไฟฟ้า

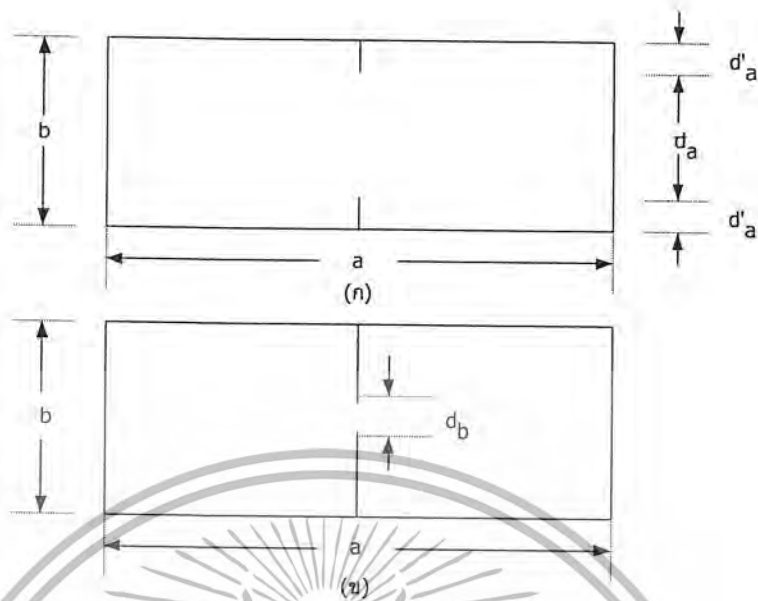
$$\frac{\Delta C_0}{C_0} = \frac{A_e}{A} \quad (d' \ll b, a) \tag{2.25}$$

โดย  $A_e = d'^2 \pi / 4$  คือพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ (ภายในวงกลมที่ล้อมกรอบไว้) ของย่านความถี่  
 $A = ab$  คือภาพตัดขวางของเส้น  
 $C_0$  คือความจุสถิตของมัน ก่อนที่จะถูกนำเข้าสู่ย่านความถี่

นิยามเดียวกันนี้ถูกนำมาประยุกต์สร้างเป็นโครงสร้างในภาพที่ 2.5 (ข) ซึ่งเป็นส่วนกลับของภาพที่ 2.5 (ก) ตอนนี้อยากพิจารณาที่อนาคตแบบรีดิวซ์ที่สร้าง โดยการนำเส้นแถบแม่เหล็กในภาพที่ 2.5 (ข) แทนที่ในเส้นแถบไฟฟ้าออกไป ซึ่งส่วนนี้จะกำหนดการกระจายคลื่นของความถี่ตัด เส้นที่สมมาตรของความจุเป็นสัดส่วนของพื้นที่ที่เก็บพลังงาน คือการแบ่งครึ่งค่าประจุสถิตนั่นเอง

$$C_1 = \frac{1}{2} C_0 \tag{2.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 (ก) ท่อนำคลื่นแบบรีดจ์บางขนาดสั้น  
(ข) ท่อนำคลื่นแบบรีดจ์บางขนาดยาว

รูปที่ 2.6 (ก) ท่อนำคลื่นแบบรีดจ์บางขนาดสั้นซึ่งค่าความถี่ตัดทั่วไปได้จากสมการ (2.29) (ข) ท่อนำคลื่นแบบรีดจ์บางขนาดยาว โครงสร้างที่เห็นมีความสัมพันธ์กับภาพ 2.5 (ก) คือค่าความถี่ตัดทั่วไปได้จากสมการ (2.33)

ค่าการเปลี่ยนแปลง  $\Delta C_1$  ที่นำเข้ามาโดยท่อนำคลื่นแบบรีดจ์มีค่าเท่ากับ  $\Delta C_0$  เนื่องจากพื้นที่ตรงกลางที่มีลักษณะคล้ายกัน ดังนั้น

$$\frac{\Delta C_1}{C_1} = \frac{\Delta C_0}{C_0^{1/2}} = \frac{d^2 \pi}{2ab} = \frac{(b-d)^2 \pi}{2ab} \quad (d' \ll b, a) \tag{2.27}$$

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไม่ถูกรบกวนเมื่อใช้งานจริงโดยรีดจ์ตรงกลางดังนั้นการเปลี่ยนแปลงในความถี่ตัดมีอยู่เพียงอันเดียว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในตัวเก็บประจุ

$$\frac{f_{c0}}{f_{cr}} = \frac{\lambda_{cr}}{\lambda_{c0}} = \sqrt{\frac{c_1 + \Delta c_1}{c_1}} = \sqrt{1 + \frac{\Delta c_1}{c_1}} \tag{2.28}$$

โดย  $f_{c0} = c / \lambda_{c0}$  เป็นค่าความถี่ตัดของท่อนำคลื่นที่ไม่ถูกรบกวนและ  $f_{cr} = c / \lambda_{cr}$  คือค่าความถี่ตัดของท่อนำคลื่น C คือความเร็วแสงเมื่อให้  $\lambda_{c0} = 2a$  ค่าความถี่ตัดมาตรฐานของท่อนำคลื่นจะเป็น

$$\frac{b}{\lambda_{cr}} = \frac{b}{2a} \left( 1 + \frac{\pi b}{2a} \left( 1 - \frac{d}{b} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (b-d \ll b, a) \tag{2.29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามนี้ให้ผลที่น่าพอใจกับท่อนำคลื่นแบบรีดจ์บางขนาด

2. ท่อนำคลื่นแบบรีดจ์บางขนาดยาว (Wave Guide with Long Fins) ในการใช้งานท่อนำคลื่นรีดจ์บางขนาดยาว ( $d/b \ll 1$ ) ถูกนำมาใช้มากที่สุด แต่มันมีการรบกวนที่สูงมากทำให้ไม่สามารถนำสมการที่ (2.29) มาใช้ได้แต่จากผลงานของมารคูริช (Marcuritz) แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ของทั้งท่อแบบสั้นและยาวสามารถถูกพิสูจน์ได้ รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็น โครงสร้างที่สมบูรณ์ มารคูริชได้แสดงให้เห็นว่าค่าซัสเซพแตนซ์ (Susceptance) ของท่อนำคลื่นขนาดสั้น คือ

$$\frac{B_a}{Y_0} \cdot \frac{\lambda_{ca}}{b} \cong 2 \left( \frac{\lambda d'}{2b} \right)^2 \left( \frac{d'}{b} \ll 1 \right) \tag{2.30}$$

และของท่อนำคลื่นขนาดยาว คือ

$$\frac{B_b}{Y_0} \cdot \frac{\lambda_{cb}}{b} \cong \ln \frac{2b}{\pi d_b} \left( \frac{d_a}{b} \ll 1 \right) \tag{2.31}$$



รูปที่ 2.7 ท่อตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่

โดย  $\lambda_{ca}$  และ  $\lambda_{cb}$  คือความยาวคลื่นตัดเมื่อ  $d'_a = d'_b$  อัตราส่วนของความจุของรีดจ์บางได้จาก การนำสมการ (2.31) มารวด้วยสมการ (2.30)

$$\frac{\Delta C_b}{\Delta C_a} = \frac{(B_b/Y_0) (\lambda_{cb}/b)}{(B_a/Y_0) (\lambda_{ca}/b)} = 2 \left( \frac{2b}{\pi d_b} \right)^2 \ln \frac{2b}{\pi d_b} \left( \frac{d_b}{b} \ll 1 \right) \tag{2.32}$$

ผลที่ตามมาทำให้ค่าความถี่ตัดมาตรฐานของรีดจ์ตัวนำแบบบางยาว สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{b}{\lambda_{cr}} &\cong \frac{b}{2a} \left( 1 + \frac{\Delta C_b}{C_1} \cdot \frac{\Delta C_b}{\Delta C_a} \right)^{-1/2} \\ &= \frac{b}{2a} \left( 1 + \frac{4b}{\pi d_b} \ln \frac{2b}{\pi d_b} \right)^{-1/2} \quad (b-d \ll b, a) \end{aligned} \tag{2.33}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ท่อนำคลื่นแบบริคค์บางที่มีความยาวใด ๆ (Wave Guide with Fins of any Length) ทั้งสมการ (2.29) และ (2.33) สืบทอดมาจากนิยามเดียวกัน คือ

$$\frac{b}{\lambda_{cr}} = \frac{b}{2a} \left( 1 + \frac{4b}{\pi a} \ln \csc \frac{\pi d}{2b} \right)^{-1/2} \quad (2.34)$$

ซึ่งใช้แทนสมการ (2.29) และ (2.33) เมื่อ  $d/b \ll 1$

เนื่องจากสมการนี้ได้มาจากการสมมติว่า พื้นที่ของท่อนำคลื่นถูกแก้ไขในบริเวณใกล้เคียงของริคค์ ความแม่นยำของสมการ (2.34) มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ  $b/a$  มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นมันจำเป็นที่ต้องทำให้ถูกต้องขึ้น โดยการนำผลของส่วนนี้เข้ามาคิดด้วย โดยค่านี้ไม่สามารถนำมาจากการคำนวณแต่ได้จากการเก็บค่าจากการปฏิบัติจริงถ้าทอมที่ 2 ของสมการ (2.34) ถูกนำมาคูณด้วย  $1 + 0.2\sqrt{b/a}$  จะได้สมการ (2.35) ซึ่งรับกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขหลาย ๆ แบบซึ่งอยู่ในช่วง  $0 < b/a \leq 1$  และ  $0.01 \leq d/b < 1$

$$\frac{b}{\lambda_{cr}} = \frac{b}{2a} \left( 1 + \frac{4}{\pi} (1 + 0.2\sqrt{b/a}) \frac{b}{a} \ln \csc \frac{\pi d}{2b} \right)^{-1/2} \quad (2.35)$$

เนื่องจากเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเข้ากันได้กับส่วนที่ได้ ดังนั้นสมการ (2.35) นั้นเชื่อถือได้มีความแม่นยำและมีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่าเทคนิคการออกแบบด้วยข้อมูลที่ได้จากกราฟ

4. ท่อนำคลื่นแบบริคค์คู่ที่มีความยาวใด ๆ (Wave Guide with thick ridge of any Length) ริคค์ที่มีความกว้างจำกัดเพิ่มความจูนับ 2 คือ  $\Delta C_2$  เข้าไปในท่อนำคลื่นเพื่อที่จะเริ่มประมาณค่า  $\Delta C_2$  เป็นค่าความจุของเพลตขนานที่มีความยาว  $s$  และระยะห่าง  $d$  ดังรูปที่ 2.7

$$\Delta C_2 \triangleq \epsilon_0 s/d \quad (2.36)$$

ในเวลาเดียวกัน ความกว้างของส่วนที่ไม่ถูกรบกวนของท่อนำคลื่นลดลงจาก  $a$  ไปถึง  $a-s$  ซึ่งนี้หมายถึงตอนนี้ท่อนำอ้างอิงที่ไม่ถูกรบกวนได้ความจุอัตราส่วนของ  $b/(a-s)$  และวงจรคาปาซิแตนซ์ (Equivalent Capacitance) นั้นลดลงถึง

$$C_2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{a-s}{b} \quad (2.37)$$

ขณะที่ค่าย้อนกลับจากส่วนของคลื่นของพื้นที่ในท่อนำคลื่นนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงของความจุ คือ

$$\frac{\Delta C_2}{C_2} \triangleq \frac{2sb}{d(a-s)} \quad (2.38)$$

โดยการเพิ่มเทอมนี้เข้าไปในสูตรการรบกวน (2.35) สำหรับริคค์บางและหลังจากแทนที่  $a$  ด้วย  $a-s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย  
ทำให้ได้นิยามใหม่ สำหรับความถี่ตัดมาตรฐานในตัวนำที่เป็นแบบริคค์คู่แต่สมการ (2.38) ไม่ได้คำนวณผล  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทบของ second-order ซึ่งต้องคำนวณเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขผลที่ได้ คือสมการที่ถูกต้องที่คิดรวมค่ารบกวนสำหรับท่อนำคลื่น คือ

$$\frac{b}{\lambda_{cr}} = \frac{b}{2(a-s)} \left( 1 + \frac{4}{\pi} \left( 1 + 0.2 \sqrt{\frac{b}{a-s}} \right) \frac{b}{a-s} \ln \csc \frac{\pi d}{2b} + (2.45 + 0.2 \frac{s}{a}) \frac{sb}{d(a-s)} \right)^{-1/2} \quad (2.39)$$

สมการนี้เข้ากันได้กับวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ในช่วงของตัวแปรเหล่านี้ คือ

$$0.01 \leq \frac{d}{b} \leq 1$$

$$0 \leq \frac{d}{a} \leq 1$$

$$0 \leq \frac{s}{a} \leq 0.45$$

ถ้าสำหรับเมื่อ  $s/a > 0.45$  ความแม่นยำจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากผนังที่ตั้งขึ้นเหนือพื้นที่ของท่อนำคลื่นที่ตำแหน่ง  $s/a = 0.5$  (ความยาวของท่อนำคลื่นที่มากที่สุดจากการติดตามผลการใช้งาน) มีค่า 2% ซึ่งเป็นกรณีที่แย่ที่สุด โดยทั่วไปสมการ (2.35) และ (2.39) มีค่าเท่ากันเมื่อ  $s = 0$

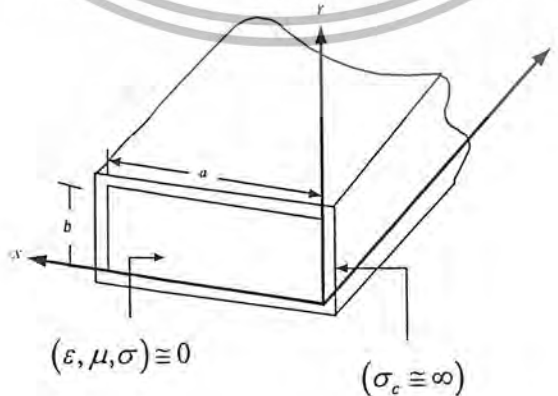
สุดท้ายทิศทางของความยาวคลื่น สำหรับความถี่ใดๆ ถูกนำเชื่อมโยงกับความยาวคลื่นตัดโดย

$$\lambda_g' = \frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda - \lambda_{cr})^2}} \quad (2.40)$$

คือความยาวคลื่นกลุ่มในท่อนำคลื่นแบบบริดจ์

### 2.9 พื้นฐานและโครงสร้างท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Waveguides) [6]

ท่อนำคลื่นในทางปฏิบัติที่ใช้กันทั่วไปจึงเป็นโครงสร้างสมมาตรที่มีภาคตัดขวางหลายรูปแบบ ซึ่งสำหรับหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมคลื่นในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากลวง (ภาคตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า)



รูปที่ 2.8 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีผนังนำไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ภายในเป็นวัสดุไม่มีการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 61518  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นท่อนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ประกอบด้วยด้าน  $a$  และ  $b$  เราจะสมมติว่าภายในท่อ ประกอบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีการสูญเสียไม่มีแหล่งกำเนิด ( $\sigma = 0$ ) และผนังของมันนำไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ ( $\sigma_c \cong \infty$ ) ซึ่งใช้สำหรับตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียทำให้สมการของแมกซ์เวลล์ในรูปแบบเฟสเซอร์กลายเป็น

$$\nabla^2 \bar{E}_s + k^2 \bar{E}_s = 0 \quad (2.41)$$

และ

$$\nabla^2 \bar{H}_s + k^2 \bar{H}_s = 0 \quad (2.42)$$

เมื่อ

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (2.43)$$

และจะสมมติตัวแปรประกอบเวลา  $e^{j\omega t}$  ขึ้นมา ถ้าเรากำหนดให้

$$\bar{E}_s = (\bar{E}_{xs}, \bar{E}_{ys}, \bar{E}_{zs})$$

และ

$$\bar{H}_s = (\bar{H}_{xs}, \bar{H}_{ys}, \bar{H}_{zs})$$

ดังนั้นสมการที่ (2.41) และ (2.42) จะเป็นส่วนประกอบของสมการเวกเตอร์ไฮลด์ซ์สเกลาร์ 3 สมการ หรืออีกนัยหนึ่งการที่จะได้สนาม  $E$  และสนาม  $H$  นั้นจะต้องแก้สมการสเกลาร์ 6 สมการยกตัวอย่างเช่นสำหรับส่วนประกอบ  $z$  ทำให้สมการที่ (2.41) กลายเป็น

$$\frac{\partial^2 \bar{E}_{zs}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{E}_{zs}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{E}_{zs}}{\partial z^2} + k^2 \bar{E}_{zs} = 0 \quad (2.44)$$

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการหาโซลูชันของสมการคลื่น (2.42) ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตสำหรับท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง สมมติว่าท่อนำคลื่นเป็นตัวนำสมบูรณ์เราจะได้เงื่อนไขขอบเขตว่าองค์ประกอบในทิศทาง  $z$  ของสนามไฟฟ้าจะต้องเป็นศูนย์ที่ผิวของท่อนำคลื่น ในการหาโซลูชันของสมการคลื่นที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตนี้ จะใช้วิธีแยกตัวแปร (Method of Separation of Variables) ดังนี้

$$E_{zs}(x, y, z) = X_{(x)} Y_{(y)} Z_{(z)} \quad (2.45)$$

เมื่อ  $X_{(x)}$ ,  $Y_{(y)}$  และ  $Z_{(z)}$  เป็นฟังก์ชันของ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ตามลำดับ

เมื่อแทนสมการที่ (2.45) ลงในสมการที่ (2.44) และหารด้วย  $XYZ$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} + \frac{Z''}{Z} = -k^2 \quad (2.46)$$

เนื่องจากตัวแปรเป็นอิสระต่อกันซึ่งแต่ละพจน์ในสมการที่ (2.46) จะต้องเป็นค่าคงตัว ดังนั้นสมการสามารถเขียนได้เป็น

$$-k_x^2 - k_y^2 + r^2 = k^2 \quad (2.47)$$

เมื่อ  $-k_x^2$ ,  $-k_y^2$  และ  $\gamma^2$  เป็นค่าคงตัวที่แยกจากกัน ดังนั้นสมการที่ (2.46) จะถูกแยกออกเป็น

$$X'' + k_x^2 X = 0 \quad (2.48ก)$$

$$Y'' + k_y^2 Y = 0 \quad (2.48ข)$$

$$Z'' - \gamma^2 Z = 0 \quad (2.48ค)$$

เราจะได้รับผลเฉลยของสมการที่ (2.48) คือ

$$X(x) = C_1 \cos k_x x + C_2 \sin k_x x \quad (2.49ก)$$

$$Y(y) = C_3 \cos k_y y + C_4 \sin k_y y \quad (2.49ข)$$

$$Z(z) = C_5 e^{\gamma z} + C_6 e^{-\gamma z} \quad (2.49ค)$$

แทนสมการที่ (2.49) ลงในสมการที่ (2.45) จะได้รับ

$$E_{zs}(x, y, z) = (C_1 \cos k_x x + C_2 \sin k_x x)(C_3 \cos k_y y + C_4 \sin k_y y)(C_5 e^{\gamma z} + C_6 e^{-\gamma z}) \quad (2.50)$$

เช่นเคย ถ้าสมมติว่าคลื่นแพร่กระจายไปตามท่อนำคลื่นในทิศทาง  $+z$  ค่าคงตัวการคูณ  $C_5 = 0$  เพราะว่าการเคลื่อนที่จำกัดอยู่ที่ระยะอนันต์ (นั่นคือ  $E_{zs}(x, y, z = \infty) = 0$ ) ดังนั้นสมการที่ (2.50) จะเป็น

$$E_{zs}(x, y, z) = (A_1 \cos k_x x + A_2 \sin k_x x)(A_3 \cos k_y y + A_4 \sin k_y y)e^{-\gamma z} \quad (2.51)$$

เมื่อ  $A_1 = C_1 C_5$ ,  $A_2 = C_2 C_5$  เป็นต้น เมื่อกำหนดตามขั้นตอนเดียวกันนี้ จะได้รับผลเฉลยของส่วนประกอบ  $z$  ในสมการที่ (12-53) เป็น

$$H_{zs}(x, y, z) = (B_1 \cos k_x x + B_2 \sin k_x x)(B_3 \cos k_y y + B_4 \sin k_y y)e^{-\gamma z} \quad (2.52)$$

แทนการแก้สมการกับส่วนประกอบสนาม  $E_{zs}$ ,  $E_{ys}$ ,  $H_{zs}$  และ  $H_{ys}$  ในสมการที่ (2.41) และ (2.42) ด้วยวิธีเดียว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูโงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ทั้งนี้ใช้สมการของแมกซ์เวลล์เพื่อหาจาก  $E_{zs}$  และ  $H_{zs}$  ได้อย่างง่าย ๆ ซึ่งจากไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

จะ ได้รับ

$$\nabla \times \bar{E}_s = -j\omega\mu\bar{H}_s$$

$$\nabla \times \bar{H}_s = -j\omega\epsilon\bar{E}_s$$

$$\frac{\partial \bar{E}_{zs}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{E}_{ys}}{\partial z} = -j\omega\mu\bar{H}_{xs} \tag{2.53ก}$$

$$\frac{\partial \bar{H}_{zs}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{H}_{ys}}{\partial z} = j\omega\epsilon\bar{E}_{xs} \tag{2.53ข}$$

$$\frac{\partial \bar{E}_{xs}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{E}_{zs}}{\partial x} = -j\omega\mu\bar{H}_{ys} \tag{2.53ค}$$

$$\frac{\partial \bar{H}_{xs}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{H}_{zs}}{\partial x} = j\omega\epsilon\bar{E}_{ys} \tag{2.53ง}$$

$$\frac{\partial \bar{E}_{ys}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{E}_{xs}}{\partial y} = -j\omega\mu\bar{H}_{zs} \tag{2.53จ}$$

$$\frac{\partial \bar{H}_{ys}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{H}_{xs}}{\partial y} = j\omega\epsilon\bar{E}_{zs} \tag{2.53ฉ}$$

ในตอนนี้เราจะแสดง  $E_{xs}, E_{ys}, H_{xs}$  และ  $H_{ys}$  ให้อยู่ในพจน์ของ  $E_{zs}$  และ  $H_{zs}$  ยกตัวอย่างเช่น สำหรับ  $E_{xs}$  จะรวมสมการที่ (2.53ข) และ (2.53ค) เข้าด้วยกัน และจะ ได้รับ

$$j\omega\epsilon\bar{E}_{xs} = \frac{\partial \bar{H}_{zs}}{\partial y} + \frac{1}{j\omega\mu} \left( \frac{\partial^2 \bar{E}_{zs}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \bar{E}_{zs}}{\partial x \partial z} \right) \tag{2.54}$$

จากสมการที่ (2.51) และ (2.52) จะเห็นได้ชัดว่าส่วนประกอบสนามจะแปรผันไปกับ  $z$  ซึ่งเป็นไปตาม  $e^{-\gamma z}$  นั่นคือ

$$E_{zs} \sim e^{-\gamma z}, E_{xs} \sim e^{-\gamma z}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial \bar{E}_{zs}}{\partial z} = -\gamma \bar{E}_{zs} \qquad \frac{\partial^2 \bar{E}_{xs}}{\partial z^2} = \gamma^2 \bar{E}_{xs}$$

และสมการที่ (2.54) จะกลายเป็น

$$j\omega\epsilon\bar{E}_{xs} = \frac{\partial \bar{H}_{zs}}{\partial y} + \frac{1}{j\omega\mu} (\gamma^2 \bar{E}_{xs} + \gamma \frac{\partial \bar{E}_{zs}}{\partial x})$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\frac{1}{j\omega\mu}(\gamma^2 + \omega^2\mu\epsilon)\bar{E}_{xs} = \frac{\gamma}{j\omega\mu} \frac{\partial\bar{E}_{zs}}{\partial x} + \frac{\partial\bar{H}_{zs}}{\partial y}$$

ดังนั้น ถ้าเรากำหนดให้  $h^2 = \gamma^2 + \omega^2\mu\epsilon = \gamma^2 + k^2$

$$\bar{E}_{xs} = -\frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial\bar{E}_{zs}}{\partial x} - \frac{j\omega\mu}{h^2} \frac{\partial\bar{H}_{zs}}{\partial y}$$

เมื่อได้กระทำในทำนองเดียวกับสมการที่ (2.53) จะได้รับนิพจน์  $E_{ys}$ ,  $E_{zs}$  และ  $H_{ys}$  ในพจน์ของ  $E_{zs}$  และ  $H_{zs}$  ดังนี้

$$\bar{E}_{xs} = -\frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial\bar{E}_{zs}}{\partial x} - \frac{j\omega\mu}{h^2} \frac{\partial\bar{H}_{zs}}{\partial y} \quad (2.55ก)$$

$$\bar{E}_{ys} = -\frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial\bar{E}_{zs}}{\partial y} + \frac{j\omega\mu}{h^2} \frac{\partial\bar{H}_{zs}}{\partial x} \quad (2.55ข)$$

$$\bar{H}_{xs} = \frac{j\omega\epsilon}{h^2} \frac{\partial\bar{E}_{zs}}{\partial y} - \frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial\bar{H}_{zs}}{\partial x} \quad (2.55ค)$$

$$\bar{H}_{ys} = \frac{j\omega\epsilon}{h^2} \frac{\partial\bar{E}_{zs}}{\partial x} + \frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial\bar{H}_{zs}}{\partial y} \quad (2.55ง)$$

เมื่อ

$$h^2 = \gamma^2 + k^2 = k_x^2 + k_y^2 \quad (2.56)$$

ดังนั้นสามารถใช้สมการที่ (2.55) ร่วมกับสมการที่ (2.51) และ (2.52) เพื่อจะได้รับ  $E_{xs}$ ,  $E_{ys}$ ,  $H_{xs}$  และ  $H_{ys}$

จากสมการที่ (2.51) (2.52) และ (2.55) เราจะเห็นได้ว่ามีแบบต่างๆ ของแบบรูปสนามหรือโครงสร้างสนามที่ต่างกัน ซึ่งแบบรูปสนามที่ต่างกันอย่างชัดเจนเหล่านี้จะถูกเรียกว่า โหมดหรือแบบแผนคลื่น (Mode) ซึ่งจะมีลำดับชั้นที่ต่างกันของแบบแผนคลื่นเกิดขึ้น 4 แบบ กล่าวคือ

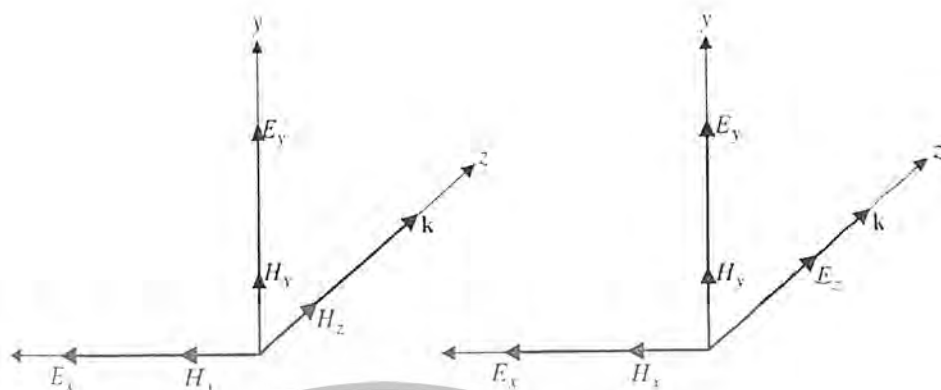
1)  $E_{zs} = 0 = H_{zs}$  (แบบแผนคลื่น TEM) ซึ่งเป็นแบบแผนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง ซึ่งทั้งสนาม E และสนาม H จะขวางทิศทางการแพร่กระจายคลื่น จากสมการที่ (2.55) ทุกส่วนประกอบสนามไม่เกิดขึ้นที่  $E_{zs} = 0 = H_{zs}$  ผลที่ตามมาก็คือ ทำให้เราลดความเห็นได้ว่าท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะไม่สามารถทำให้เกิดแบบแผนคลื่น TEM ได้

2)  $E_{zs} = 0$   $H_{zs} \neq 0$  (แบบแผนคลื่น TE) ในกรณีนี้ส่วนประกอบที่เหลือนั้นคือ  $E_{xs}$  และ  $E_{ys}$  ของสนามไฟฟ้าจะขวางทิศทางการแพร่กระจาย  $a_z$  ซึ่งสนามจะถูกเรียกว่าแบบแผนคลื่นไฟฟ้าตามขวาง ภายใต้เงื่อนไข รูป 2.9(ก)

3)  $E_{zs} \neq 0$   $H_{zs} = 0$  (แบบแผนคลื่น TM) ในกรณีนี้สนาม H จะขวางทิศทางการแพร่กระจายคลื่น ดังนั้นเราจึงเรียกแบบแผนคลื่นแม่เหล็กตามขวาง รูปที่ 2.9(ข)

4)  $E_{zs} \neq 0$   $H_{zs} \neq 0$  (แบบแผนคลื่น HE) เป็นกรณีที่ทั้งสนาม E และสนาม H ไม่ได้ขวางทิศทางการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งมันจะถูกอ้างอิงแบบแผนคลื่นไฮบริด (Hybrid Mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แบบแผนคลื่น TE ซึ่ง  $E_z = 0$  (ข) แบบแผนคลื่น TM ซึ่ง  $H_z = 0$

รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของสนาม EM ในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ควรสังเกตถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $k$  ในสมการที่ (2.43) กับค่าคงตัวเฟส  $\beta$  ซึ่งสำหรับแบบแผนคลื่น TEM จะมี  $h = 0$  ดังนั้นสมการที่ (2.56)  $\gamma^2 = -k^2 \rightarrow \gamma = jk$  นั่นคือ  $\beta = k$  สำหรับแบบแผนคลื่นอื่นจะมี  $\beta \neq k$  สำหรับหัวข้อต่อไปจะพิจารณาเฉพาะแบบแผนคลื่นแพร่กระจาย TM และ TE เท่านั้น แต่ในที่นี้จะกล่าวถึง TE เพียงอย่างเดียวเพราะว่า TM มีหลักการเช่นเดียวกัน

### 2.10 แบบแผนคลื่นไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric (TE) Mode)

สำหรับแบบแผนคลื่น TE นี้ สนามไฟฟ้าจะขวาง (หรือตั้งฉากกับ) ทิศทางการแพร่กระจายคลื่น เราจะกำหนดให้  $E_z = 0$  (ดังรูปที่ 2.9ก) และจะหาส่วนประกอบสนามอื่นๆ คือ  $E_x, E_y, H_x, H_y$  และ  $H_z$  ได้จากสมการ (2.52) และ (2.55) และหาเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งจะได้มาจากความจริงที่ว่า ส่วนประกอบสัมผัสของสนามไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่องที่ผนังของท่อนำคลื่น นั่นคือ

$$E_{zs} = 0 \quad \text{ที่ } y = 0 \quad (2.57ก)$$

$$E_{zs} = 0 \quad \text{ที่ } y = b \quad (2.57ข)$$

$$E_{zs} = 0 \quad \text{ที่ } x = 0 \quad (2.57ค)$$

$$E_{zs} = 0 \quad \text{ที่ } x = a \quad (2.57ง)$$

ซึ่งสมการที่ (2.57ก) และ (2.57ค) ต้องการใช้สมการที่ (2.52) มี  $B_z = 0 = B_r$  ดังนั้นสมการที่ (2.52) จะกลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{zs} = H_0 \cos k_x x \cos k_y y e^{-\gamma z} \quad (2.58)$$

เมื่อ  $H_0 = B_1 B_3$  ซึ่งสมการที่ (2.57ข) และ (2.57ง) เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับสมการ (2.58) จะกลายเป็น

$$\cos k_x a = 0 \quad , \quad \sin k_y b = 0 \quad (2.59)$$

ซึ่งหมายความว่า

$$k_x a = m\pi \quad , \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.60)$$

$$k_y b = n\pi \quad , \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.61)$$

หรือ

$$k_x = \frac{m\pi}{a} \quad , \quad k_y = \frac{n\pi}{b} \quad (2.62)$$

จำนวนเต็มลบจะไม่นำมาใช้กับ  $m$  และ  $n$  ในสมการที่ (2.62) เมื่อแทนสมการ (2.62) ในสมการที่ (2.58) ก็จะได้

$$H_{zs} = H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (2.63)$$

ซึ่งเราจะได้รับส่วนประกอบสนามอื่นๆ จากสมการ (2.63) และ (2.55) โดยให้จำไว้ว่า  $E_{zs} = 0$  ดังนั้น จะได้

$$E_{zs} = \frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cdot H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (2.64ก)$$

$$E_{ys} = -\frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \cdot H_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (2.64ข)$$

$$H_{xs} = \frac{\gamma}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \cdot H_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (2.64ค)$$

$$H_{ys} = \frac{\gamma}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cdot H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (2.64ง)$$

สำหรับแบบแผนคลื่น TE ค่า  $(m, n)$  อาจเป็น  $(0, 1)$  หรือ  $(1, 0)$  แต่ต้องไม่ใช่  $(0, 0)$  ทั้ง  $m$  และ  $n$  ไม่สามารถเป็น 0 ในเวลาเดียวกันได้ เพราะว่าจะบังคับให้ส่วนประกอบสนามในสมการที่ (2.64) ไม่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความหมายได้ว่าแบบแผนคลื่นที่ต่ำที่สุดจะเป็นแบบแผนคลื่น  $TE_{10}$  หรือ  $TE_{01}$  นั่นก็ขึ้นอยู่กับค่า  $a$  และ  $b$  ซึ่งเป็นมิติของท่อนำคลื่นซึ่งมาตรฐานในทางปฏิบัติจะต้องมีค่า  $a > b$  ดังนั้นจึงทำให้  $1/a^2 < 1/b^2$  ด้วยเหตุนี้เองแบบแผนคลื่น  $TE_{10}$  จึงเป็นแบบแผนคลื่นที่ต่ำสุด เนื่องจากการลดทอนต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกแบบแผนคลื่นในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งจะเรียกแบบแผนคลื่นนี้ว่า แบบแผนคลื่นเป็นใหญ่ ของท่อนำคลื่นและเป็นการปฏิบัติที่สำคัญ แบบแผนคลื่นเป็นใหญ่เป็นแบบแผนคลื่นที่มีความถี่ตัดต่ำสุด (ความยาวคลื่นตัดยาวที่สุด) และสำหรับความถี่ตัดขวางแบบแผนคลื่น  $TE_{10}$  นี้จะได้มาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{c_n} = \frac{u'}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2.65)$$

$\lambda_{co}$  จะกำหนดได้โดย  $\lambda_{co} = \frac{u'}{f_{co}}$

หรือ 
$$\lambda_{co} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (2.66)$$

เมื่อ  $u' = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$  = ความเร็วเฟสของคลื่นระนาบสม่ำเสมอในตัวกลางไม่มีการสูญเสีย

( $\sigma = 0$ ,  $\mu, \varepsilon$ ) ที่ประกอบอยู่ในท่อนำคลื่นและสำหรับความยาวคลื่นตัด

และความยาวคลื่นตัดของแบบแผนคลื่น  $TE_{10}$  นี้จะได้อาจสมการที่ (2.65) (เมื่อ  $m = 1, n = 0$ ) คือ

$$f_{co(10)} = \frac{u'}{2a} \text{ Hz} \quad (2.67)$$

และความยาวคลื่นตัดของแบบแผนคลื่น  $TE_{10}$  จะได้อาจสมการที่ (2.66) โดยแทน ( $m = 1, n = 0$ )

$$\lambda_{co(10)} = 2a \quad (2.68)$$



ตารางที่ 2.1 สมการสำคัญของแบบแผนคลื่น TE

$$\begin{aligned}
 \bar{E}_{xs} &= \frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cdot H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \\
 \bar{E}_{ys} &= -\frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \cdot H_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \\
 \bar{E}_{zs} &= 0 \\
 \bar{H}_{xs} &= \frac{j\beta}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \cdot H_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \\
 \bar{H}_{ys} &= \frac{j\beta}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cdot H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \\
 \bar{H}_{zs} &= H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \\
 f_{co} &= \frac{u'}{\lambda_{co}} = \frac{u'}{h} = \frac{u'}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \\
 h^2 &= \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \\
 u' &= \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.63) และ (2.64) เราจะได้รับแบบรูปสนามของแบบแผนคลื่น TE ที่  $TE_{10}$  โดยการแทน  $m=1$  และ  $n=0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 การแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่น (Wave Propagation)

เมื่อพิจารณาที่ (2.64) จะเห็นว่าทุกส่วนประกอบสนามจะเกี่ยวกับพจน์ของฟังก์ชันไซน์หรือฟังก์ชันโคไซน์ของ  $(\frac{m\pi}{a})x$  หรือ  $(\frac{n\pi}{b})y$  คูณกับ  $e^{-\gamma z}$  เนื่องจาก

$$\sin \theta = \frac{1}{2j}(e^{j\theta} - e^{-j\theta}) \tag{2.69ก}$$

$$\cos \theta = \frac{1}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \tag{2.69ข}$$

คลื่นภายในท่อนำคลื่นสามารถถูกแยกออกเป็นการจัดหมู่ของคลื่นระนาบที่สะท้อนจากผนังท่อนำคลื่น ยกตัวอย่างเช่น สำหรับแบบแผนคลื่น  $TE_{10}$

$$\begin{aligned} \vec{E}_{ys} &= -\frac{j\omega\mu a}{\pi} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-j\beta z} \\ &= -\frac{j\omega\mu a}{\pi} \frac{1}{2j} (e^{j\pi x/a} - e^{-j\pi x/a}) e^{-j\beta z} \\ \vec{E}_{ys} &= \frac{\omega\mu a}{2\pi} (e^{-j\beta(z+\pi x/\beta a)} - e^{-j\beta(z-\pi x/\beta a)}) \end{aligned} \tag{2.70}$$

พจน์แรกของสมการที่ (2.70) แสดงถึงคลื่นที่เคลื่อนที่ในทิศทาง  $+z$  ที่มุม

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\pi}{\beta a}\right) \text{ ที่แกน } z \tag{2.71}$$

พจน์ที่สองของสมการที่ (2.70) แสดงถึงคลื่นที่เคลื่อนที่ในทิศทาง  $+z$  ที่มุม  $-\theta$  สนามอาจจะถูกแสดงเป็นผลรวมของคลื่นระนาบ  $TE_{10}$  สองคลื่นที่แพร่กระจายไปตามทางซิกแซกระหว่างผนังท่อนำคลื่นที่  $x=0$  และ  $x=a$  การแยกแบบแผนคลื่น

$TE_{10}$  ออกเป็นคลื่นระนาบ 2 คลื่น จะสามารถขยายไปเป็นแบบแผนคลื่น  $TE$  และ  $TM$  ใดๆก็ได้ ซึ่งเมื่อใดก็ตามที่  $n = m$  ไม่ได้เป็น 0 ทั้งคู่ในเวลาเดียวกัน จะเกิดคลื่นระนาบได้ 4 คลื่น ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกนั่นเอง

ส่วนประกอบคลื่นในทิศทาง  $z$  จะมีความยาวคลื่นต่างไปจากส่วนประกอบคลื่นของคลื่นระนาบ ความยาวคลื่นตามแกนท่อนำคลื่นนี้จะถูกเรียกว่า ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (Waveguide Wavelength) และจะกำหนดได้โดย

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\frac{\lambda}{\lambda_{co}})^2}} \tag{2.72}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

 $\lambda_g =$  ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น $\lambda =$  ความยาวคลื่นในสุญญากาศ

ผลอันสืบเนื่องมาจากทางเดินซิกแซกจะทำให้เรามีความเร็ว 3 แบบ คือ ความเร็วปานกลาง  $u'$  ความเร็วเฟส  $u_p$  และความเร็วกลุ่ม  $u_g$  เกิดขึ้น รูปที่ 2.10 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วทั้งสามนี้ ความเร็วปานกลาง  $u' = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$  เป็นความเร็วที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนความเร็วเฟส  $u_p$  เป็นความเร็วที่วิถีการเคลื่อนที่ของเฟสคงตัวซึ่งแพร่กระจายลดต่ำลงในท่อนำคลื่นและจะกำหนดได้จากสมการ

$$u_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.73)$$

$$u_p = \frac{u'}{\cos\theta} = \frac{u'}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{co}}{f}\right)^2}} \quad (2.74)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า  $u_p \geq u'$  ดังนั้นถ้าเมื่อได้  $u' = c$  จะทำให้  $u_p$  มากกว่าความเร็วแสงในสุญญากาศ ซึ่งถือว่าการละเมิดทฤษฎีสัมพันธภาพของไอน์สไตน์ การละเมิดนี้จะทำให้ข่าวสารไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าความเร็วแสงจริงหรือไม่ ตอบได้โดยว่าไม่จริง เพราะข้อมูลข่าวสาร (หรือพลังงาน) ในท่อนำคลื่นโดยปกติจะไม่เคลื่อนที่ที่ความเร็วเฟสอยู่แล้ว ข้อมูลข่าวสารจะเคลื่อนที่ที่ความเร็วกลุ่มซึ่งน้อยกว่าความเร็วแสง ความเร็วกลุ่ม  $u_g$  เป็นความเร็วซึ่งเป็นผลให้คลื่นสะท้อนลงสัญญาณเข้าเคลื่อนที่ลดต่ำลงในท่อนำคลื่นและจะกำหนดได้โดย

$$u_g = \frac{1}{d\beta/d\omega} \quad (2.75)$$

หรือ

$$u_g = u' \cos\theta = u' \sqrt{1 - \left(\frac{f_{co}}{f}\right)^2} \quad (2.76)$$

แม้ว่าแนวคิดเรื่องความเร็วกลุ่มจะดูซับซ้อนและเกินขอบเขตของปริญญาโทไปบ้าง แต่ความเร็วกลุ่มก็เป็นความเร็วที่จำเป็นสำหรับการแพร่กระจายของกรอบคลื่นของกลุ่มความถี่ มันเป็นความเร็วการแพร่กระจายพลังงานในท่อนำคลื่น

## 2.12 การโพลาไรซ์ [7]

การโพลาไรซ์ได้ถูกกำหนดให้เป็นคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อธิบายทิศทางและขนาดสัมพัทธ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเป็นรูปที่แสดงการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งหนึ่งๆ เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ในการสังเกตลักษณะการกวาดของสนามไฟฟ้านี้จะมองตามหลังคลื่นที่เดินทางออกไป เราอาจสรุปได้อีกนัยหนึ่งว่าโพลาไรซ์จะเป็นรูปกราฟที่วาดขึ้นจากการกวาดของปลายลูกศรที่แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าขณะหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะการกวาดของลูกศรที่แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าขณะหนึ่ง

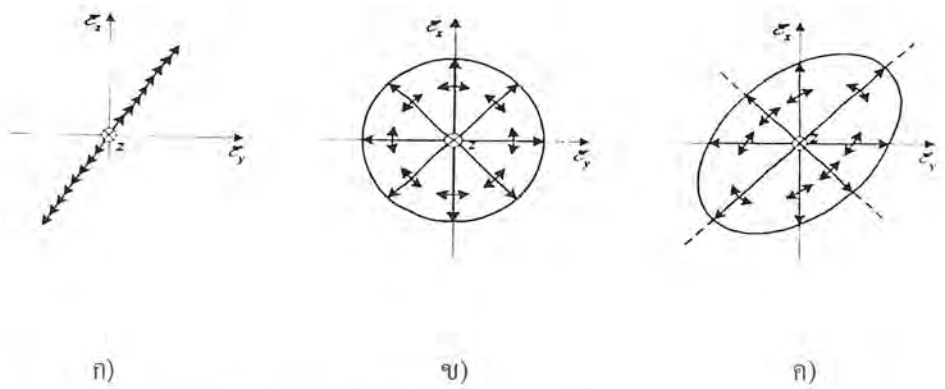
จากรูปที่ 2.10 แสดงลูกศรที่แสดงขนาดและทิศทางสัมพัทธ์ของสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งคงที่ตำแหน่งหนึ่ง โดยลูกศรนี้จะมีควมยาวทิศทางการชี้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาต่างๆ สำหรับการกวาดแบบวงรี เมื่อเรามองตามหลังคลื่นที่เดินทางไปในทิศทาง  $-z$  (ที่  $z$  คงที่ค่าหนึ่ง) จะเห็นว่าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ลูกศรจะกวาดเป็นลักษณะวงรีในทิศทางตามเข็มนาฬิกา สำหรับการกวาดแบบเชิงเส้นจะเห็นว่าการกวาดของลูกศรเป็นลักษณะเส้นตรง

เราจะแบ่งการโพลาไรซ์เป็น 3 แบบ ด้วยกันคือ

1. การโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear Polarization)
2. การโพลาไรซ์วงกลม (Circular Polarization)
3. การโพลาไรซ์วงรี (Elliptical Polarization)

ซึ่งสามารถอธิบายด้วยรูปดังแสดงในรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การโพลาไรซ์แบบต่างๆ

ก) เชิงเส้น    ข) วงกลม    ค) วงรี

## 2.12.1 การโพลาไรซ์เชิงเส้น

ถ้ามีคลื่นระนาบที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาเป็นฮาร์มอนิกมีสนามไฟฟ้าสองส่วน คือ  $\xi_x$  และ  $\xi_y$  เดินทางในทิศทาง  $+z$  (พุ่งเข้าไปในหน้ากระดาษ) สามารถแสดงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กขณะหนึ่งของคลื่นนี้ได้ด้วย

$$\begin{aligned}\bar{\xi} &= \hat{a}_x \xi_x + \hat{a}_y \xi_y \\ &= \text{Re}(\hat{a}_x E_x^+ e^{j(\omega t - \beta z)} + \hat{a}_y E_y^+ e^{j(\omega t - \beta z)}) \\ &= \hat{a}_x E_{x0}^+ \cos(\omega t - \beta z + \phi_x) + \hat{a}_y E_{y0}^+ \cos(\omega t - \beta z + \phi_y)\end{aligned}\quad (2.77)$$

$$\begin{aligned}\bar{H} &= \hat{a}_y H_y + \hat{a}_x H_x \\ &= \text{Re}\left(\hat{a}_y \frac{E_x^+}{\eta} e^{j(\omega t - \beta z)} - \hat{a}_x \frac{E_y^+}{\eta} e^{j(\omega t - \beta z)}\right) \\ &= \hat{a}_y \frac{E_{x0}^+}{\eta} \cos(\omega t - \beta z + \phi_x) + \hat{a}_x \frac{E_{y0}^+}{\eta} \cos(\omega t - \beta z + \phi_y)\end{aligned}\quad (2.78)$$

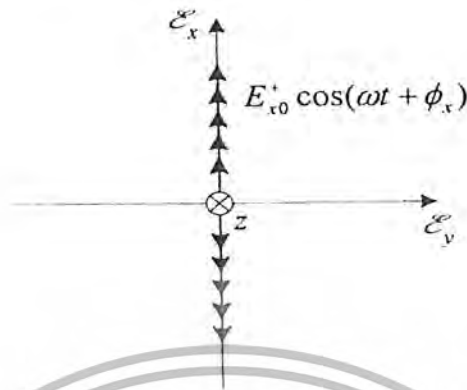
ในสมการ (2.77) และ (2.78)  $E_x^+$  และ  $E_y^+$  เป็นปริมาณเชิงซ้อนที่แสดงทั้งขนาดและเฟสซึ่งมีค่า  $E_{x0}^+ e^{j\phi_x}$  และ  $E_{y0}^+ e^{j\phi_y}$

ถ้าสมมติให้พิจารณาสนามที่ตำแหน่ง  $z=0$  และ  $E_{y0}^+=0$  ดังนั้น สนามไฟฟ้าในสมการ (2.77) จะกลายเป็น

$$\bar{\xi} = \hat{a}_x E_{x0}^+ \cos(\omega t + \phi_x)\quad (2.79)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่ามีส่วนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ชี้ในทิศทางแกน  $x$  เท่านั้น ดังนั้นเมื่อเราวาดกราฟแสดง ลูกศรที่แทนสนามไฟฟ้าขณะหนึ่งทีเวลาต่างๆ ( $\omega t$  ต่าง ๆ) ในรูปที่ 2.12 จะได้ลักษณะของรูปกราฟเป็นดังนี้



รูปที่ 2.12 การโพลาไรซ์เชิงเส้นตามแกน  $x$

### 2.12.2 การโพลาไรซ์วงกลม

ในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าสองส่วนที่มีขนาดและเฟสที่เหมาะสม จะมีผลทำให้ลักษณะการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้ารวมมีขนาดเท่ากันตลอดทุกเวลาซึ่งจะเป็นวงกลม ซึ่งเรียกสนามแบบนี้ว่าการโพลาไรซ์วงกลม การโพลาไรซ์วงกลมนี้ยังแบ่งออกเป็นสองแบบ คือการโพลาไรซ์วงกลมวนขวา (Right Hand Circular Polarization) ซึ่งมีการกวาดสนามไฟฟ้าตามเข็มนาฬิกาและการโพลาไรซ์วงกลมวนซ้าย (Left Hand Circular Polarization) ซึ่งมีการกวาดสนามไฟฟ้าทวนเข็มนาฬิกา

#### การโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา

การโพลาไรซ์ของคลื่นจะเป็นแบบวงกลมหมุนขวาได้เมื่อเวกเตอร์สนามไฟฟ้ากวาดเป็นวงกลมในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เมื่อมองตามทิศทางคลื่นที่เดินทางออกจากผู้สังเกตไป

ถ้าพิจารณาสนามไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ระนาบ  $z$  เท่ากับ 0 และกำหนดให้  $\phi_x = 0$   $\phi_y = -\frac{\pi}{2}$  และ

$E_{x0}^+ = E_{y0}^+ = E_R$  ในกรณีนี้ขนาด ( $E_x = E_y$ ) และเฟสต่างกัน 90 องศา จะทำให้เกิดโพลาไรซ์เป็นวงกลม

$$\xi_x = E_R \cos(\omega t) \quad (2.80ก)$$

$$\xi_y = E_R \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = E_R \sin(\omega t) \quad (2.80ข)$$

สนามรวมของสนามไฟฟ้านี้จะมีขนาด

$$\xi = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2} = \sqrt{E_R^2(\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t)} = E_R \quad (2.81)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ชี้ในทิศทางที่ทำมุม  $\varphi$  กับแกน  $x$  มีค่า

$$\varphi = \tan^{-1} \left[ \frac{\xi_y}{\xi_x} \right] = \tan^{-1} \left[ \frac{E_R \sin(\omega t)}{E_R \cos(\omega t)} \right] = \tan^{-1} [\tan(\omega t)] = \omega t \tag{2.82}$$

ซึ่งเห็นได้ว่ามุม  $\varphi$  นี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อวาดการกวาดลูกศรที่แสดงไฟฟ้าขณะหนึ่งเป็นเวลาต่าง ๆ บนระนาบ  $z = 0$  จะพบว่า เป็นวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ  $E_R$  และมีทิศทางการกวาดตามเข็มนาฬิกา ด้วยความเร็ว  $\omega$  ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งทำให้เรียกว่าเป็นการโพลาริซวงกลมหมุนขวา

เวกเตอร์สนามไฟฟ้าขณะหนึ่งของคลื่นนี้จะมีค่า

$$\xi = \text{Re} \left[ \hat{a}_x E_R e^{j(\omega t - \beta z)} + \hat{a}_y E_R e^{j(\omega t - \beta z - \frac{\pi}{2})} \right] \tag{2.83}$$

เมื่อ

$$e^{-j\frac{\pi}{2}} = \cos \frac{\pi}{2} - j \sin \frac{\pi}{2} = -j \text{ จะได้}$$

$$\xi = E_R \text{Re} \left\{ (\hat{a}_x - j\hat{a}_y) e^{j(\omega t - \beta z)} \right\} \tag{2.84}$$



รูปที่ 2.13 การโพลาริซวงกลมหมุนขวา

**การโพลาริซวงกลมหมุนซ้าย**

ถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้ารวมของคลื่นการโพลาริซเส้นตรงสองส่วนที่ตั้งฉากกันที่มีขนาดเท่ากัน กวาดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเป็นวงกลมจะเรียกว่า การโพลาริซวงกลมหมุนซ้าย

เช่นกรณีที่  $\phi_x = 0$ ,  $\phi_y = \frac{\pi}{2}$  และ  $E_{x0}^+ = E_{y0}^+ = E_L$

จะมีสนาม

$$\xi_x = E_L \cos(\omega t) \tag{2.85ก}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\xi_y = E_L \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -E_L \sin(\omega t) \quad (2.85ข)$$

สนามไฟฟ้ารวมจะมีขนาด

$$\xi = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2} = \sqrt{E_L^2(\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t)} = E_L \quad (2.86)$$

และทิศทางของสนามไฟฟ้ารวมที่ทำมุม  $\varphi$  กับแกน  $x$  จะเป็น

$$\varphi = \tan^{-1} \left[ \frac{\xi_y}{\xi_x} \right] = \tan^{-1} \left[ \frac{-E_L \sin(\omega t)}{E_L \cos(\omega t)} \right] = -\omega t \quad (2.87)$$

ลักษณะการกวาดของลูกศรที่แสดงสนามไฟฟ้ารวมขณะหนึ่งจะเป็นวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ  $E_L$  หมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega$  ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การโผลาโรซังกลมหมุนซ้าย

เนื่องจากสนามไฟฟ้ากวาดเป็นวงกลมในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจึงเรียกว่าเป็นการโผลาโรซังกลมหมุนซ้าย

สนามไฟฟ้ารวมขณะหนึ่งของสนามนี้จะมีค่า

$$\bar{\xi} = \text{Re} \left( \hat{a}_x E_L e^{j(\omega t - \beta z)} + \hat{a}_y E_L e^{j(\omega t - \beta z + \frac{\pi}{2})} \right) \quad (2.88)$$

ซึ่งเขียนได้ใหม่ว่า

$$\bar{\xi} = E_L \text{Re} \{ (\hat{a}_x + j\hat{a}_y) e^{j(\omega t - \beta z)} \} \quad (2.89)$$

จะเห็นได้ว่า  $\xi_x$  มีเฟสหน้า  $\xi_y$  อยู่  $90^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.12.3 การโพลาริซัวงรี

คลื่นจะเป็นการโพลาริซัวงรีเมื่อปลายลูกศรของเวกเตอร์สนามไฟฟ้ากวาดเป็นวงรี ซึ่งจะเหมือนกับในกรณีของโพลาริซัวงกลมคือที่ทั้งกวาดตามเข็มนาฬิกาจะทำให้เกิดการโพลาริซัวงรีหมุนขวา และกวาดทวนเข็มนาฬิกาซึ่งทำให้เกิดการโพลาริซัวงรีหมุนซ้าย

ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $\phi_x = \frac{\pi}{2}$   $\phi_y = 0$

$$E_{x0}^+ = (E_R + E_L)$$

$$E_{y0}^+ = (E_R - E_L)$$

ในกรณีนี้ความต่างเฟสจะเป็น  $90^\circ$  แต่ขนาดของสนามไฟฟ้า  $E_{x0}^+$  ไม่เท่ากับ  $E_{y0}^+$  สนามไฟฟ้าขณะหนึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\xi_x = (E_R + E_L) \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = -(E_R + E_L) \sin(\omega t) \quad (2.90ก)$$

$$\xi_y = (E_R - E_L) \cos(\omega t) \quad (2.90ข)$$

จะหาขนาดของสนามไฟฟ้ารวมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_x^2 + \xi_y^2 = (E_R + E_L)^2 \sin^2(\omega t) + (E_R - E_L)^2 \cos^2(\omega t) \\ &= E_R^2 \sin^2 \omega t + E_L^2 \sin^2 \omega t + 2E_R E_L \sin^2 \omega t \\ &\quad + E_R^2 \cos^2 \omega t + E_L^2 \cos^2 \omega t - 2E_R E_L \cos^2 \omega t \\ &= E_R^2 + E_L^2 + 2E_R E_L (\sin^2 \omega t - \cos^2 \omega t) \end{aligned} \quad (2.91)$$

จาก  $\sin \omega t = -\frac{\xi_x}{(E_R + E_L)}$  และ  $\cos \omega t = \frac{\xi_y}{(E_R - E_L)}$

เมื่อแทนกลับในสมการ (2.91) จะได้

$$\xi_x^2 + \xi_y^2 = E_R^2 + E_L^2 + 2E_R E_L \left[ \frac{\xi_x^2}{(E_R + E_L)^2} - \frac{\xi_y^2}{(E_R - E_L)^2} \right] \quad (2.92)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\left\{ \frac{\xi_x}{E_R + E_L} \right\}^2 + \left\{ \frac{\xi_y}{E_R - E_L} \right\}^2 = 1 \quad (2.93)$$

สมการ (2.93) เป็นสมการของวงรีที่มีแกนหลักตัดค่า  $|\xi_{\max}| = |E_R + E_L|$  และแกนรองตัดค่า

$|\xi_{\min}| = |E_R - E_L|$  ถ้าจุดศูนย์กลางของสนามไฟฟ้า  $\xi_{\max}$  จะเกิดขึ้นเมื่อ  $\omega t$  มีค่าเท่ากับ  $(2n+1)\frac{\pi}{2}$  เมื่อ  $n=0, 1, 2, \dots$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2, 3,..... ในขณะทีค่าต่ำสุดของสนามไฟฟ้า  $\xi_{\min}$  จะเกิดขึ้นเมื่อ  $\omega t$  มีค่าเท่ากับ  $(n\pi)$ ;  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  จะใช้อัตราส่วนของแกน (Axial Ratio : AR) เป็นตัวบ่งชี้ถึงความเป็นการโพลาไรซ์วงรีมากน้อยเพียงใด ซึ่งนิยามจากอัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรองของการโพลาไรซ์วงรี มีค่า

$$AR = -\frac{\xi_{\max}}{\xi_{\min}} = -\frac{(E_R + E_L)}{(E_R - E_L)} \quad (2.94)$$

เมื่อ  $E_R$  และ  $E_L$  เป็นปริมาณบวกจริง AR จะเป็นบวกสำหรับการโพลาไรซ์หมุนซ้าย และเป็นลบสำหรับการโพลาไรซ์หมุนขวา จะมีค่าอยู่ในช่วง  $1 \leq |AR| \leq \infty$  สามารถเขียนสนามไฟฟ้าขณะหนึ่งได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{\xi} &= \text{Re} \left\{ \hat{a}_x (E_R + E_L) e^{j(\omega t - \beta z + \frac{\pi}{2})} + \hat{a}_y (E_R - E_L) e^{j(\omega t - \beta z)} \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ (\hat{a}_x j (E_R + E_L) + \hat{a}_y (E_R - E_L)) e^{j(\omega t - \beta z)} \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ (E_R (j\hat{a}_x + \hat{a}_y) + E_L (j\hat{a}_x - \hat{a}_y)) e^{j(\omega t - \beta z)} \right\} \end{aligned} \quad (2.95)$$

จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้ารวมของคลื่นแบบการโพลาไรซ์วงรีจะเป็นผลรวมของคลื่นการโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวารวมกับคลื่นการโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย



รูปที่ 2.15 รูปวงรีทำมุมเอียงที่เกิดจากสนามไฟฟ้ากวาดไปที่เวลาต่างๆ

ถ้า  $E_R$  มีค่ามากกว่า  $E_L$  อัตราส่วนตามแกนจะมีค่าเป็นลบ และส่วนของการโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวามีมากกว่าส่วนของโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย ซึ่งผลลัพธ์ของสนามไฟฟ้าจะมีการกวาดไปตามการโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา ทำให้คลื่นนี้เป็นแบบการโพลาไรซ์วงรีหมุนขวา

ในทางกลับกัน ถ้า  $E_L$  มีค่ามากกว่า  $E_R$  อัตราส่วนตามแกนจะมีค่าเป็นบวก และส่วนของการโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้ายจะมีมากกว่าส่วนของโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา สนามไฟฟ้าลัพธ์จะกวาดไปในทิศทางของการโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย และสนามนี้จะเป็นแบบการโพลาไรซ์วงรีหมุนซ้าย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน  $x$  และแนวแกน  $y$  แต่ถ้าหากความต่างที่แสดงการกวาดของสนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ จะอยู่ในแนวแกน  $x$  หรือแนวแกน  $y$  แต่ถ้าหากความต่างเฟสไม่เป็น  $90^\circ$  จะทำให้วงรีวางเอียงทำมุมกับแกน  $x$  ดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะแสดงสนามไฟฟ้าลัพธ์จากเงื่อนไข

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \frac{n\pi}{2} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\geq 0 \quad \begin{array}{l} \text{สำหรับตามเข็มนาฬิกา ถ้า } E_R > E_L \\ \text{สำหรับทวนเข็มนาฬิกา ถ้า } E_R < E_L \end{array} \quad (2.96)$$

$$\leq 0 \quad \begin{array}{l} \text{สำหรับตามเข็มนาฬิกา ถ้า } E_R < E_L \\ \text{สำหรับทวนเข็มนาฬิกา ถ้า } E_R > E_L \end{array} \quad (2.97)$$

$$E_{x0}^+ = E_R + E_L \quad (2.98ก)$$

$$E_{y0}^+ = E_R - E_L \quad (2.98ข)$$

จะพบว่าแกนหลักและแกนรองจะไม่อยู่ในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  หากความต่างเฟสระหว่างสนามไฟฟ้าทั้งสองส่วนที่ตั้งฉากกันไม่เป็นจำนวนเลขคี่เท่าของ  $\pm 90^\circ$  อัตราส่วนตามแกนจะมีค่า

$$AB \equiv \text{แกนหลัก/แกนรอง} = \pm \frac{OA}{OB} \quad 1 \leq |AB| \leq \infty \quad (2.99)$$

เครื่องหมายบวกในสมการ (2.99) แสดงถึงการโพลาไรซ์หมุนซ้ายและเครื่องหมายลบแสดงถึงการโพลาไรซ์หมุนขวา

ความเอียงของวงรีเมื่อเทียบกับแกน  $x$  จะแสดงด้วยมุม  $\tau$  ซึ่งมีค่า

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2E_{x0}^+ E_{y0}^+}{(E_{x0}^+)^2 - (E_{y0}^+)^2} \cos(\Delta\phi) \right) \quad (2.100)$$

### 2.13 การทดสอบโพลาริซ์ของคลื่น [8]

การทดสอบโพลาริซ์ของคลื่นนั้นนับว่าเป็นสิ่งจำเป็น ในกรณีที่เราต้องการส่งคลื่นที่มีโพลาริซ์อย่างใดอย่างหนึ่งออกจากสายอากาศ และทำการตรวจสอบจากการทดสอบว่าได้คลื่นที่มีโพลาริซ์ตามที่ต้องการหรือไม่ นอกจากนั้นการวัดโพลาริซ์ของคลื่นก็ทำให้รูปร่างของคลื่นที่บริเวณที่สนใจว่ามีโพลาริซ์อยู่ในรูปใด ในกรณีแรกนั้นจะมีความจำเป็นอย่างมาก ถ้าเราต้องการใช้โพลาริซ์ตั้งฉากกันในการส่งสัญญาณคนละช่องกันโดยใช้สายอากาศตัวเดียวกัน เช่น ในระบบไมโครเวฟซึ่งมีการใช้โพลาริซ์ในแนวขนานกับพื้นโลกและในแนวตั้งฉากกับพื้นโลก ในการส่งสัญญาณคนละช่องกัน การใช้งานในลักษณะนี้สายอากาศจะต้องสร้างโพลาริซ์ตรงตามที่ถูกกระตุ้น เช่น ถ้าถูกกระตุ้นด้วยโพลาริซ์แบบขนานกับพื้นโลกจากพีดฮอร์น ก็ควรที่จะส่งคลื่นที่มีโพลาริซ์แบบขนานกับพื้นโลกออกไปเท่านั้น ถ้ามีคลื่นที่มีโพลาริซ์แบบตั้งฉากกับพื้นโลกออกไปด้วย คลื่นนั้นก็จะเป็นคลื่นรบกวนของโพลาริซ์ในแนวตั้งฉากของอีกช่องสัญญาณหนึ่ง เราเรียกคลื่นที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับที่ต้องการนี้ว่าโพลาริซ์ในแนวตั้งฉากกับที่ต้องการ การวัดโพลาริซ์ของคลื่นส่วนใหญ่จะเป็นการตรวจสอบอัตราส่วนของโพลาริซ์นี้ ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่บ่งบอกคุณสมบัติของสายอากาศในการสร้างโพลาริซ์

วิธีการทดสอบโพลาริซ์ของคลื่นนี้ทำได้โดยใช้สายอากาศที่รับคลื่นที่มีโพลาริซ์แบบเส้นตรง เช่น สายอากาศแบบไดโพลและสายอากาศแบบฮอร์นรูปพีระมิด การวัดโพลาริซ์ก็ทำได้โดยนำสายอากาศดังกล่าวรับคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามา แล้วหมุนสายอากาศนั้นรอบตัวเองดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 ขนาดของสนามไฟฟ้าที่วัดได้ที่มุมต่างๆ จะขึ้นอยู่กับโพลาริซ์ของคลื่นนั้น รูปที่ 2.17 แสดงสนามไฟฟ้าที่วัดได้ในกรณีที่โพลาริซ์ของคลื่นเป็นแบบวงรีที่ทำมุมกับพื้นโลก อัตราส่วนของแกนหลักของวงรี  $r$  จะได้เป็น

$$r = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \quad (2.101)$$



รูปที่ 2.16 การทดสอบโพลาริซ์ของคลื่นโดยใช้สายอากาศสายอากาศที่มีโพลาริซ์เป็นเส้นตรง

รูปที่ 2.17 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่วัดได้โดยใช้ที่มีโพลาริซ์แบบเส้นตรงกรณีที่โพลาริซ์ของคลื่นเป็นแบบวงรีที่ทำมุมกับพื้นโลก

ถ้าโพลาริซซ์ของคลื่นเป็นแบบวงกลม  $r$  จะเท่ากับ 1 และถ้าโพลาริซซ์เป็นแบบเส้นตรง  $r$  จะเท่ากับ  $\infty$  การทดสอบที่ได้ผลตามรูปที่ 2.17 นั้นเพียงแต่บอกรูปร่างของโพลาริซซ์เท่านั้น ยังไม่ได้บอกว่าเป็นแบบหมุนซ้ายหรือหมุนขวา ซึ่งจะต้องทำการวัดเฟสของคลื่นในทิศตั้งฉากกันด้วยจึงจะระบุออกมาได้ว่าเป็นแบบไหน การวัดทิศทางของการหมุนนี้จะทำได้โดยอาศัยหลักการที่ว่าคลื่นที่มีโพลาริซซ์แบบใดก็ตามจะสามารถแยกออกเป็นส่วนประกอบของคลื่นที่มีโพลาริซซ์แบบวงกลมหมุนขวาและแบบวงกลมหมุนซ้าย ดังนั้นการวัดนั้นจะทำได้โดยใช้สายอากาศแบบโพลาริซซ์ชันวงกลม เช่น สายอากาศแบบครอสดีโคโพล และแบบเฮลิคซ์ เป็นต้น โดยใช้แบบที่รับคลื่นวงกลมหมุนขวา และรับคลื่นวงกลมหมุนซ้ายมาวัดทั้งคู่ แล้วพิจารณาจากค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ ถ้าให้  $|E_R|$  และ  $|E_L|$  เป็นขนาดของสนามไฟฟ้าที่วัดได้สำหรับแบบหมุนขวาและแบบหมุนซ้ายตามลำดับ อัตราส่วนของแกนหลักของวงรี  $r$  จะคำนวณได้ดังนี้คือ

$$r = \frac{|E_R| + |E_L|}{|E_R| - |E_L|} \quad (2.102)$$

ในขณะเดียวกันก็จะได้ว่าถ้า  $|E_R|$  ใหญ่กว่า  $|E_L|$  ก็คือค่า  $r$  เป็นบวกคลื่นนั้นก็จะจะเป็นแบบหมุนขวา และถ้า  $|E_R|$  เล็กกว่า  $|E_L|$  คลื่นนั้นจะเป็นแบบหมุนซ้าย ในกรณีพิเศษที่คลื่นนั้นมีโพลาริซซ์แบบวงกลมก็จะมีเฉพาะ  $|E_R|$  หรือ  $|E_L|$  เท่านั้น และ  $r$  จะมีค่าเป็น 1 หรือ -1 สำหรับกรณีที่เป็นโพลาริซซ์แบบเส้นตรง เนื่องจาก  $|E_R| = |E_L|$  ดังนั้น  $r$  จะเป็น  $\infty$  และคลื่นนั้นไม่มีการหมุน จะมีแต่การแกว่งในแนวเส้นตรงเท่านั้น รูปที่ 2.18 แสดงการแยกส่วนประกอบของโพลาริซซ์แบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้ายในคลื่นที่มีโพลาริซซ์แบบต่าง ๆ



(ก) กรณีของการโพลาริซซ์  
แบบเส้นตรง

(ข) กรณีของการโพลาริซซ์  
แบบวงรีหมุนขวา

รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบของโพลาริซซ์ชันแบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้ายของคลื่นที่มีการโพลาริซซ์แบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การวิเคราะห์ ทำนวน และการออกแบบ

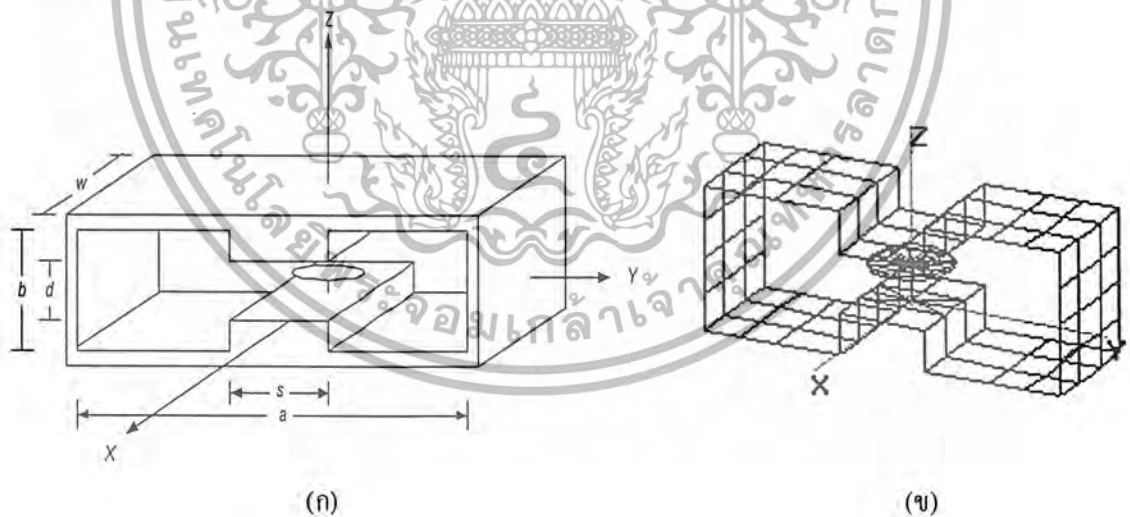
##### 3.1 บทนำ

สายอากาศที่นำเสนอในปริภูมิตวินพจน์ฉบับนี้นั้น มีลักษณะเป็นสายอากาศที่มีเชิงการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง โดยมีโครงสร้างประกอบด้วยโพรบตั้งฉากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ ซึ่งจะได้นำเสนอทั้งในกรณีที่เป็นโครงสร้างท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยสายอากาศนี้มีคุณลักษณะข้อดีอยู่ตรงที่มีแบนด์กว้าง ดังนั้นจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศสำหรับสถานีฐานในบริเวณพื้นที่ให้บริการที่มีลักษณะเป็นเส้นทางจำกัดและมีทิศทางการเคลื่อนที่ของผู้ใช้ที่แน่นอนในระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ซึ่งแบ่งพื้นที่การใช้งานออกเป็นหลายกรณีด้วยกัน เช่นเมื่อใช้งานเป็นสถานีฐาน คือบนทางด่วน หรืออุโมงค์ จึงจำเป็นต้องพิจารณาคูสมบัติของสายอากาศเมื่อมีการนำไปใช้งาน

##### 3.2 โครงสร้างของสายอากาศ

###### 3.2.1 สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่

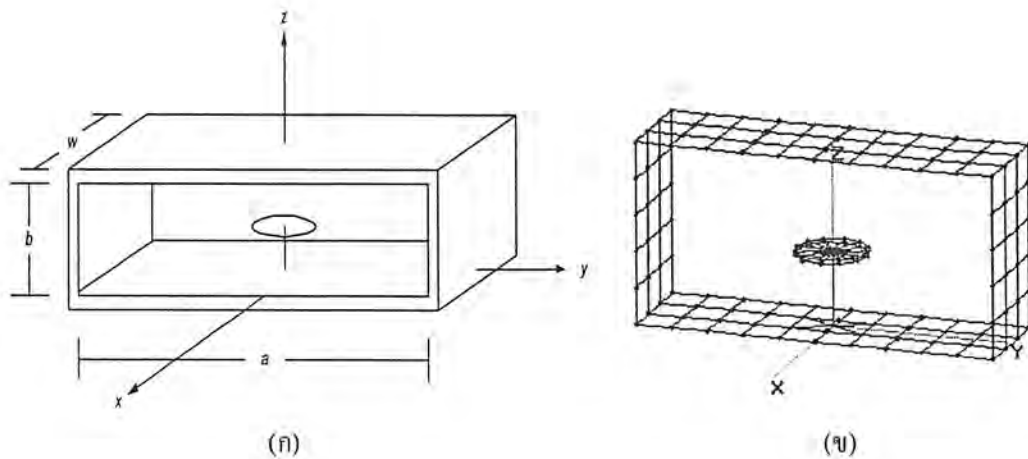
ลักษณะของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ แสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งสายอากาศมีลักษณะโครงสร้างเป็นสายอากาศปลายเปิดสองด้าน โดยในรูปที่ 3.1 (ก) เป็นโครงสร้างจริงของสายอากาศ และในรูปที่ 3.1 (ข) เป็นโครงสร้างของสายอากาศเมื่อจำลองด้วยเส้นลวดตัวนำเพื่อนำไปหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2D



รูปที่ 3.1 สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่

(ก) โครงสร้างจริง (Real Model)

(ข) โครงสร้างแบบเส้นลวดตัวนำ (Wire – grid Model)



รูปที่ 3.2 สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

(ก) โครงสร้างจริง (Real Model)

(ข) โครงสร้างแบบเส้นลวดตัวนำ (Wire – grid Model)

### 3.2.2 สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ลักษณะของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งสายอากาศมีลักษณะโครงสร้างเป็นสายอากาศปลายเปิดสองด้าน โดยในรูปที่ 3.2 (ก) เป็นโครงสร้างจริงของสายอากาศและ ในรูปที่ 3.2 (ข) เป็นโครงสร้างของสายอากาศเมื่อจำลองด้วยเส้นลวดตัวนำโดยใช้โปรแกรม NEC 2D เพื่อนำไปหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ

### 3.3 วิธีการออกแบบสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศเพื่อนำไปใช้งานนั้น จำเป็นจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ เช่น อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และค่าพารามิเตอร์อื่นๆอีกหลายอย่าง และเราจะใช้คุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ในการออกแบบเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบบริจก์คู่อและสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เนื่องจากสายอากาศในปริณูณานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเพื่อนำไปใช้เป็นสายอากาศ ที่สถานีฐานภายในอาคารและภายนอกอาคารจึงจำเป็นต้องพิจารณาทั้งในกรณีที่นำสายอากาศไปใช้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาคุณสมบัติอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันของสายอากาศเมื่อมีการนำไปใช้งานที่ความถี่ใช้งานจริงด้วย เพราะอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันจะเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บอกความสามารถในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศหมายความว่า เมื่อให้กำลังงานด้านเข้าแก่สายอากาศ 100% แล้วจะมีกำลังงานที่สายอากาศแพร่กระจายคลื่นออกไปที่เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่า 1 นั้นสายอากาศจะสามารถแพร่กระจายคลื่นออกไปได้ 100 % และในกรณีที่สายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่า 1.5:1 สายอากาศจะสามารถแพร่กระจายคลื่นออกไปได้ 90 % ซึ่งอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในอุดมคติต้องการให้มีค่า 1 แต่ โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันของสายอากาศที่มีค่า 1.5 :1 ก็ถือว่าสามารถนำไปใช้งานได้แล้ว

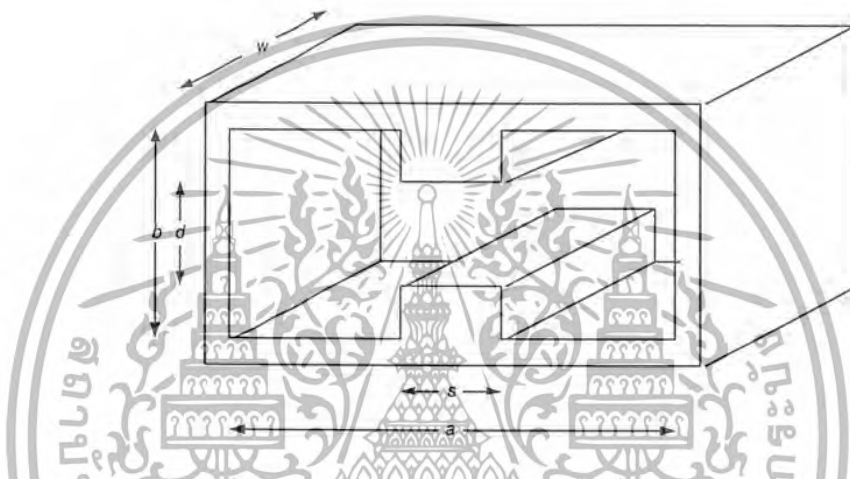
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศ จึงจำเป็นต้องให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันมีค่าใกล้เคียง 1 เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด โดยที่คุณสมบัติอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันสายอากาศ สามารถหาได้โดย NEC2D

### 3.3.1 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ในการออกแบบสายอากาศนั้น คือ ความยาว( $a$ )และความกว้าง( $b$ ) แต่ในการวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศนั้นเราจะใช้หลักการออกแบบตามสมการการออกแบบท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ ซึ่งจะมีตัวแปรหลัก ที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบอยู่ 4 ตัว คือ  $a$   $b$   $s$   $d$  และ  $w$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

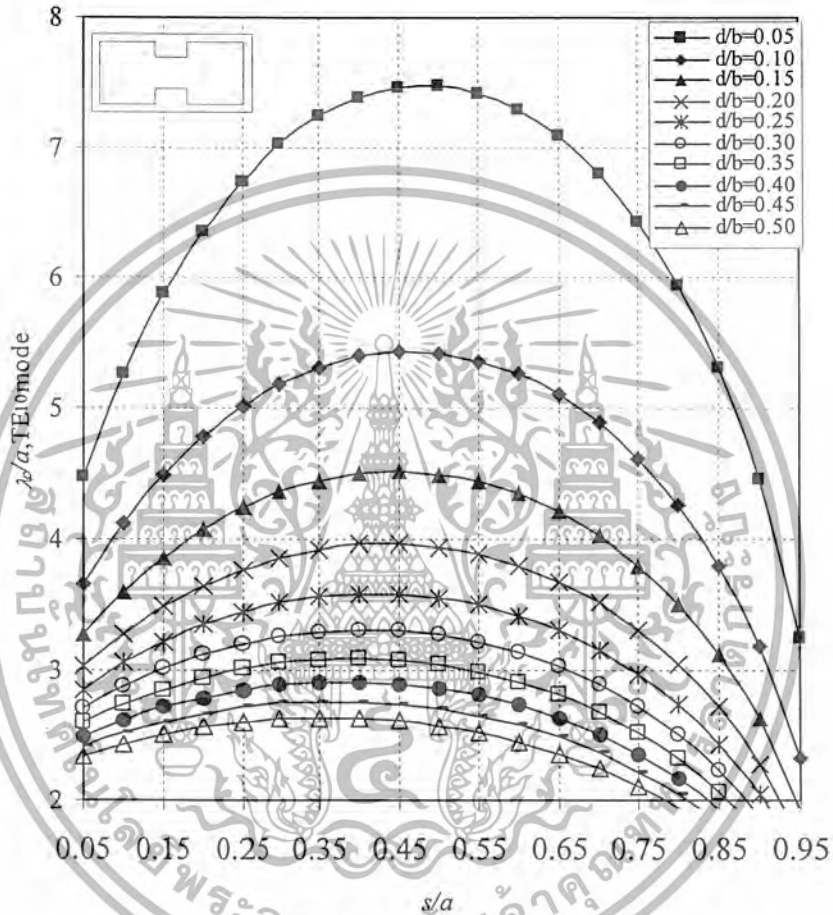


รูปที่ 3.3 รูปแบบการออกแบบท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่

ซึ่งให้ตัวแปรด้านยาวและกว้างเป็น  $a$  และ  $b$  มีหน่วยเป็นเซนติเมตร ความกว้างของริคจ์ใช้ตัวแปร  $s$  มีหน่วยเซนติเมตร และจะทำการพิจารณาอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของท่อนำคลื่นโดยใช้ตัวแปร  $w$  เป็นความหนาของท่อนำคลื่นมีหน่วยเป็นเซนติเมตร ซึ่งเราจะอาศัยโปรแกรม NEC2D ในการเปลี่ยนแปลงความหนา ( $w$ ) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมและด้าน  $a$   $b$   $s$  และ  $d$  เราจะใช้กราฟความยาวคลื่นตัด ในการหาค่าที่ใช้งานได้ดีและเหมาะสมที่สุดเพื่อเป็นการง่ายต่อการออกแบบจะนำค่ามาเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่นทั่วไปที่โหมคพื้นฐาน โดยที่โหมคพื้นฐานนี้ขนาดของท่อนำคลื่นทั่วไปจะเป็น  $b/a = 0.5$  และนำขนาดของความยาวคลื่นตัดต่อขนาดด้านยาวท่อนำคลื่น ( $a$ ) เปรียบเทียบกับด้าน ความกว้างของริคจ์ต่อความยาวท่อนำคลื่น ( $s/a$ ) และระยะห่างระหว่างริคจ์ต่อความสูงของท่อนำคลื่น ( $d/b$ ) ก็จะได้เป็นกราฟความยาวคลื่นตัดของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ โดยนำมาเปรียบเทียบกับสมการการออกแบบท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่

$$\frac{a}{\lambda_{cr}} = \frac{a}{2(a-s)} \left[ 1 + \frac{4}{\pi} \left( 1 + 0.2 \sqrt{\frac{b}{a-s}} \right) \left( \frac{b}{a-s} \right) \ln \cos ec \left( \frac{\pi d}{2b} \right) + \left( 2.45 + 0.2 \frac{s}{a} \right) \left( \frac{sb}{d(a-s)} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

คังสมการ 3.1 นำมาสร้างกราฟโดยใช้โปรแกรม Math Cad 2000 ก็จะได้กราฟการออกแบบท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่คังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กราฟความยาวคลื่นตัดของท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่

จากกราฟจะได้ว่าระยะห่างระหว่างรีดจ์ต่อความสูงของท่อนำคลื่น ( $d/b$ ) จะต้องไม่เกิน 0.5 และด้านกว้างรีดจ์ต่อความยาวของท่อนำคลื่น ( $s/a$ ) จะต้องไม่เกิน 0.45

$$0 \leq d/b \leq 0.5$$

$$0 \leq s/a \leq 0.45$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่

ดังรูปที่ 3.4 เราจะนำกราฟความยาวคลื่นตัดของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่นี้มาใช้ในการออกแบบสายอากาศจะทำให้เราทราบค่าพารามิเตอร์ที่เราไม่ทราบค่า 4 ตัว คือ  $a$   $b$   $s$  และ  $d$  โดยจะนำมาพิจารณากับค่าความยาวคลื่นตัด ( $\lambda_{cr}$ ) ซึ่งได้จาก การคำนวณ

จากสมการ

$$f_0 = \sqrt{3} f_{cr} \quad (3.2)$$

และสมการที่

$$\lambda_{cr} = \frac{C}{f_{cr}} \quad (3.3)$$

ทำให้ต้องออกแบบความถี่ที่ใช้งานก่อนโดยทำการออกแบบความถี่ใช้งานที่ 1.8 GHz จะใช้

$$f_{cr} = 1039 \text{ MHz}$$

$$\lambda_{cr} = 26.86 \text{ cm}$$

การพิจารณาต่อทำหลังจากทราบค่าความยาวคลื่นตัดแล้วจะทำการกำหนด ความยาวของท่อนำคลื่น ( $a$ ) เทียบกับมาตรฐานการออกแบบท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ จะได้ค่าประมาณ 9 เซนติเมตร จากข้อกำหนดของกราฟเมื่อทราบค่าทั้งด้าน ความกว้างของริคค์และความยาวคลื่นตัดแล้วเราจะนำไปเปรียบเทียบกับกราฟโดยยึดที่โหมดพื้นฐาน เป็นสำคัญ คือจะได้พารามิเตอร์ค่าระยะห่างระหว่างริคค์ต่อความยาวของริคค์ ( $d/b$ ) มีค่า 0.4 และจะทราบค่าความกว้างของริคค์ต่อความกว้างของท่อนำคลื่น ( $s/a$ ) มีค่า 0.25 ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

$$a \approx 0.539\lambda \quad (9 \text{ cm})$$

$$b \approx 0.245\lambda \quad (4.1 \text{ cm})$$

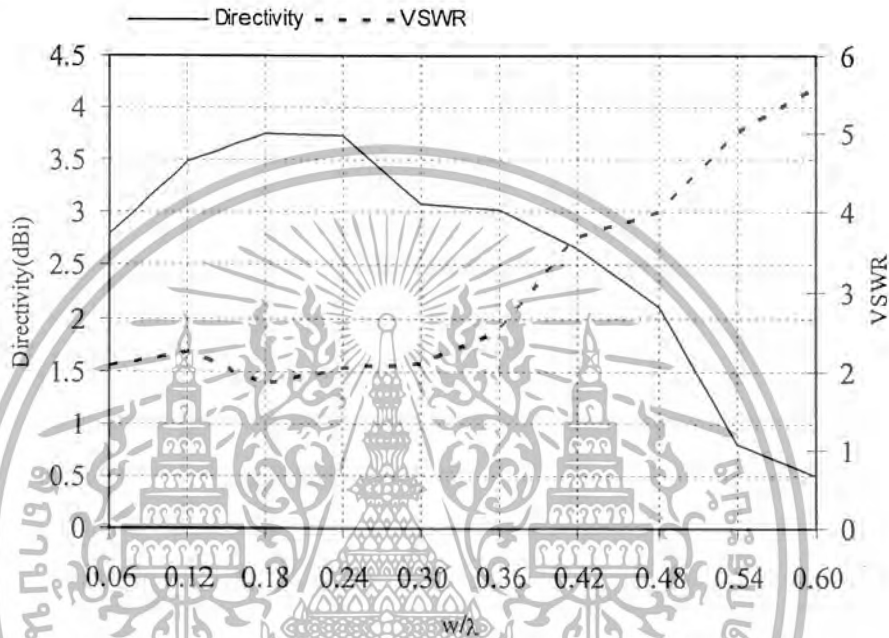
$$s \approx 0.132\lambda \quad (2.2 \text{ cm})$$

$$d \approx 0.101\lambda \quad (1.7 \text{ cm})$$

### 3.3.3 การเปลี่ยนแปลงความหนาของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่

ในการพิจารณานั้นจะใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กเชิงไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2D มาทำการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยการเปลี่ยนค่าความหนาของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์จากรูปที่ 3.3 ตั้งแต่ 1 เซนติเมตรไปจนถึง 10 เซนติเมตร และในการสุ่มสร้างรูปร่างของสายอากาศต้องพิจารณาค่าความยาวโพรบซึ่งค่าความยาวโพรบนั้นจำเป็นต้องทำให้เข้าใกล้การเกิดรีโซแนนซ์ (Resonance) ให้มากที่สุด เพื่อให้คลื่นที่ส่งออกไปมีพลังงานมากที่สุดก็จะทำให้สามารถส่งไปได้ไกลโดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับการออกแบบสายอากาศนั้นมีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$  เพื่อให้คลื่นที่ออกมาจากสายนำสัญญาณซึ่งมีอิมพีแดนซ์

เท่ากับ 50 สามารถผ่านสายอากาศไปได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นก็ต้องทำให้สายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกินกว่า 2 ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้วและจากข้อกำหนดข้างต้นจึงได้สายโพรบที่ทำให้ได้ค่า VSWR ต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 1 เซนติเมตร หรือ  $0.06\lambda$  โดยต้องทำการกระตุ้นโพรบ (Excite by a Probe) คือทำการใส่โลหะแบบกลมที่ปลายโพรบเพื่อทำให้ค่า VSWR ลดค่าลงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ โดย NEC2D จะทำโดยทำการเปลี่ยนค่าความหนาตั้งแต่ 0.06 (1 เซนติเมตร) ไปจนถึง 0.60 (10 เซนติเมตร) ทำให้ได้ผลดังนี้



รูปที่ 3.5 อัตราส่วนคลื่นนิ่งและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC2D

การเปลี่ยนแปลงของความหนา ( $w/\lambda$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.06 (1 เซนติเมตร) ไปจนถึง 0.60 (10 เซนติเมตร) จะพบว่าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ ( $w/\lambda$ ) เท่ากับ 0.18 มีค่าต่ำสุด (หรือประมาณ 3 เซนติเมตร) และที่ ( $w/\lambda$ ) เท่ากับ 0.60 มีค่าสูงสุด (ประมาณ 10 เซนติเมตร) ได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 5.7

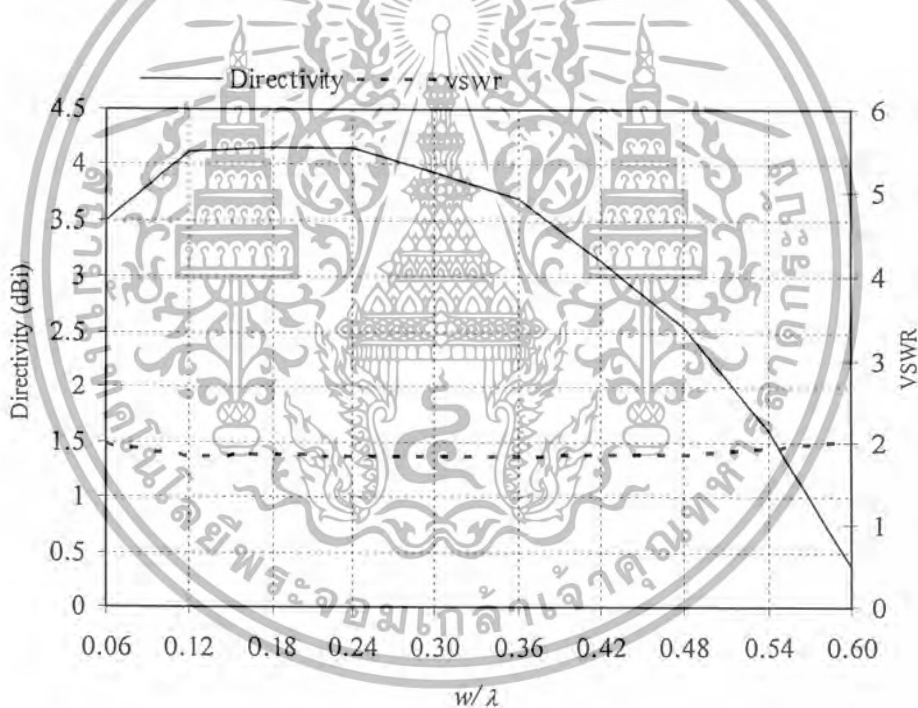
ในส่วนของคุณภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เมื่อเพิ่มขนาดความหนา ( $w/\lambda$ ) มีค่าเพิ่มจาก 0.06 (1 เซนติเมตร) ไปจนถึง 0.60 (10 เซนติเมตร) ซึ่งทำการพิจารณาเหมือนเดิมทำให้ทราบว่าคุณภาพเจาะจงทิศทางที่ ( $w/\lambda$ ) เท่ากับ 0.18 (หรือประมาณ 3 เซนติเมตร) มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 3.8 dBi และที่ ( $w/\lambda$ ) เท่ากับ 0.6 (ประมาณ 10 เซนติเมตร) มีสภาพเจาะจงทิศทางต่ำสุดซึ่งมีค่าสภาพเจาะจงทิศทาง 0.5 dBi

เมื่อทำการพิจารณาทั้งสองค่า คือค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันทำให้เราสามารถสรุปได้ค่าความหนาของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ คือที่ ( $w/\lambda$ ) = 0.18 (ประมาณ 3 เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบคือ ความยาวและความกว้างของท่อนำคลื่นซึ่งความยาวใช้ตัวแปรแทนด้วย  $a$  มีหน่วยเป็นเซนติเมตรและความกว้างใช้ตัวแปร  $b$  ทำให้สามารถออกแบบสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีค่าต่าง ๆ ดังนี้คือ ความยาว ( $a$ ) =  $0.539\lambda$  ( $9\text{cm}$ ) ความกว้าง  $b = 4.1\text{cm}$  โดยใช้ความถี่ปฏิบัติการที่  $1.8\text{GHz}$  สิ่งที่เราต้องการคือการเปรียบเทียบชี้ให้เห็นถึงช่วงกว้างความถี่ใช้งานของสายอากาศทั้งสองประเภทนี้ โดยจะทำการทดสอบและผลการทดสอบในบทที่ 4 ต่อไป โดยในหัวข้อนี้จะแสดงถึงค่าคุณลักษณะทั่วไปที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบกับสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ที่ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกันเพื่อเป็นแนวทางในการทดสอบสายอากาศทั้งสองแบบต่อไป ประสิทธิภาพในการส่งผ่านคลื่นซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม NEC2D โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาตั้งแต่ 1 เซนติเมตร จนถึง 10 เซนติเมตร ทำให้ได้ผลดังนี้

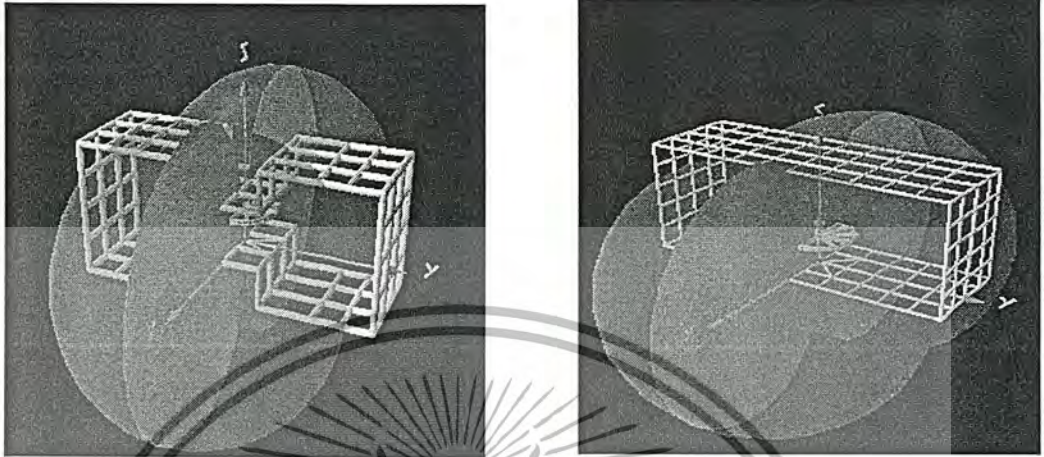


รูปที่ 3.6 อัตราส่วนคลื่นนิ่งและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC2D

จากรูปที่ 3.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่และค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ ( $w/\lambda$ ) เท่ากับ 0.12 ถึง 0.30 มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต่ำและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงดังนั้นจึงทำการเลือกค่าที่ ( $w/\lambda$ ) เท่ากับ 0.18 เพื่อที่จะได้เปรียบเทียบกับสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่

### 3.3.5 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

#### 3.3.5.1 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า



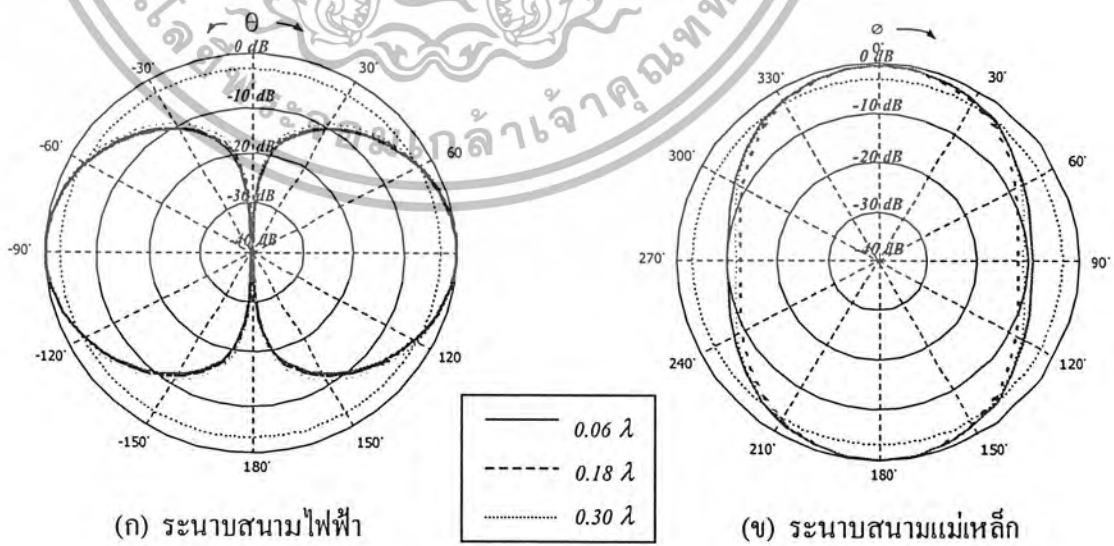
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอัตรายขยายทุกองค์ประกอบในแบบ 3 มิติของสายอากาศจากการจำลองด้วยโปรแกรม NEC2D

(ก) สายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ (ข) สายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

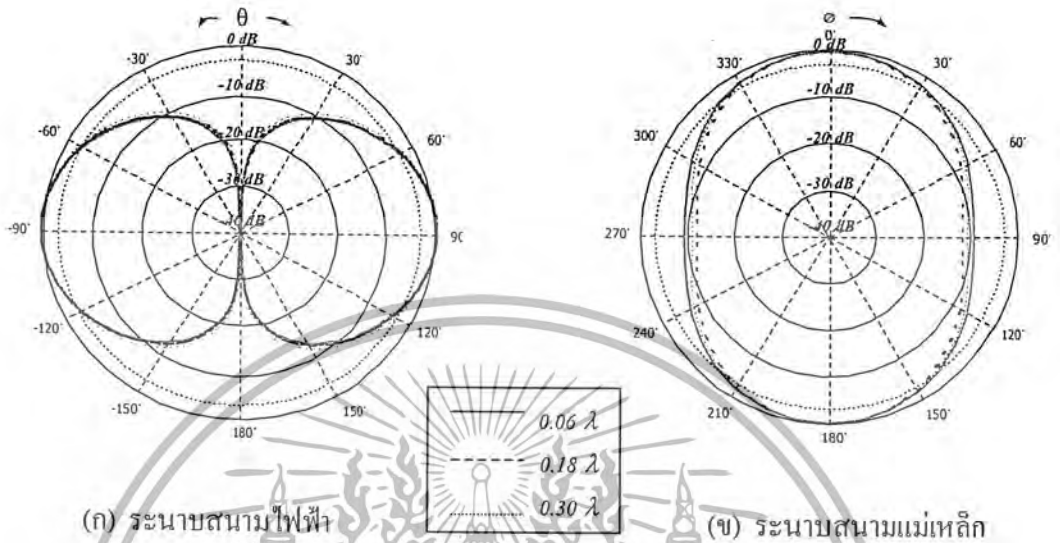
#### 3.3.5.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ที่มีความกว้าง (w) เท่ากับ $0.06\lambda$ $0.18\lambda$ $0.30\lambda$



รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับแบบรีดจ์คู่ที่มีความกว้าง (w) เท่ากับ  $0.06\lambda$   $0.18\lambda$   $0.30\lambda$  ไปใช้ประโยชน์ด้านกำไรค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง ( $w$ ) เท่ากับ  $0.06\lambda$   $0.18\lambda$   $0.30\lambda$



รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง ( $w$ ) เท่ากับ  $0.06\lambda$   $0.18\lambda$   $0.30\lambda$

จากรูปที่ 3.8 และ 3.9 เมื่อทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าจะพบว่ากรณีที่ความกว้าง ( $w$ ) ของสายอากาศยาวเท่ากับ  $0.06\lambda$   $0.18\lambda$  และ  $0.30\lambda$  ตามลำดับ ในระนาบสนามไฟฟ้าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางตามแนวของการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดอยู่ที่ 90 องศา และในระนาบสนามแม่เหล็กจะพบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง เช่นเดียวกันแต่ความแรงของการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดอยู่ที่ 0 องศา และจะสังเกตเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า จะมีลักษณะของลำคลื่นที่ใกล้เคียงกันทั้งแบบรีดจ์คู่และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

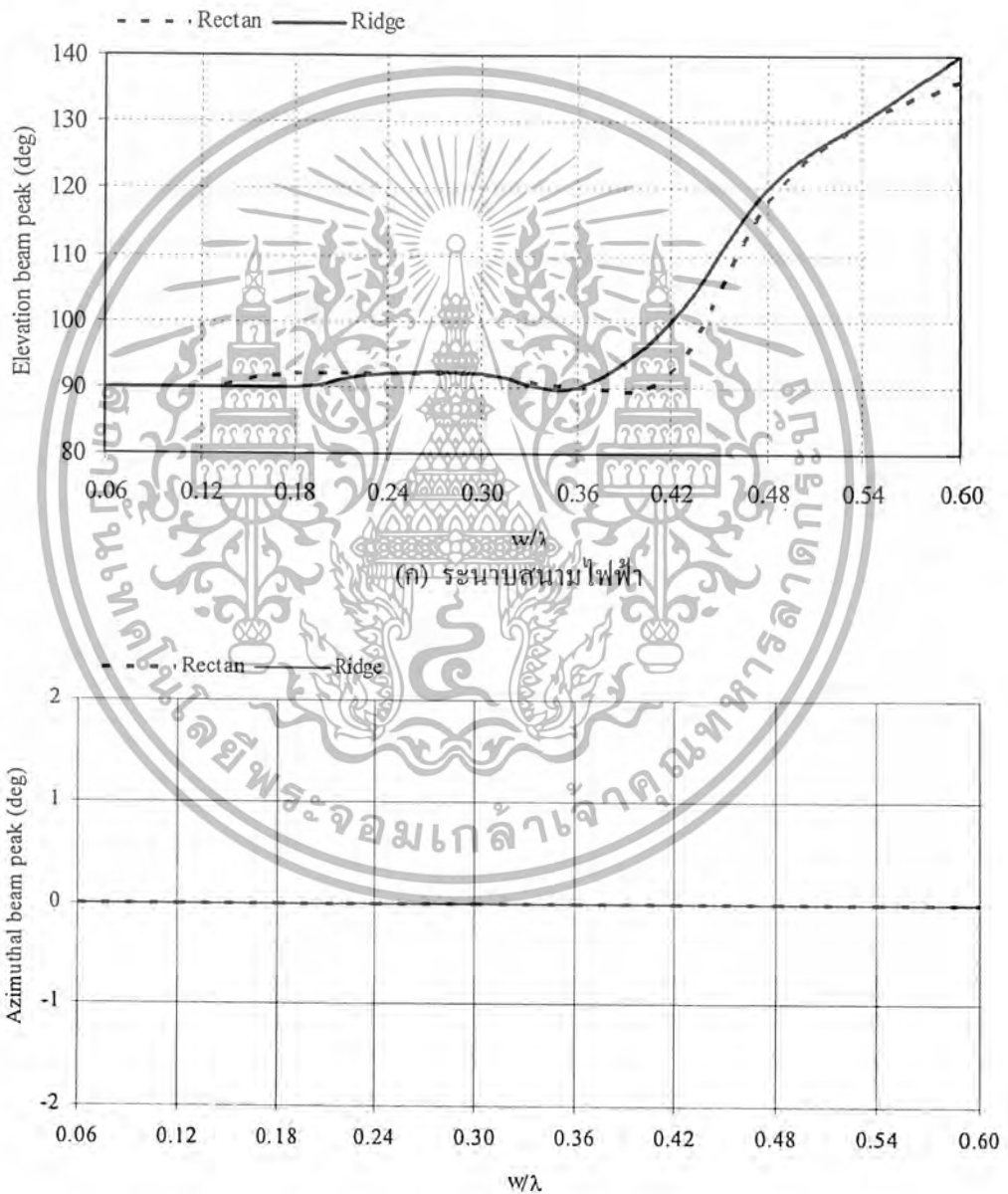
3.3.6 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในการออกแบบสายอากาศแบบสองทิศทางจะดูค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยก และระนาบมุมกวาด เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งจำเป็นต้องพิจารณาค่าคือ หากต้องการให้การแพร่กระจายสนามแรงไปด้านหน้าของสายอากาศ ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าต้องมีค่าเท่ากับ 90° และค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามแม่เหล็กต้องเท่ากับ 0° และเงื่อนไขนี้ต้องเกิดทั้ง 2 ระนาบด้วย จากรูปที่ 3.10 (ก) และ 3.10 (ข) แสดงการเปรียบเทียบค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้า และค่ามุมที่

สนามสูงสุดในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่และสนามการคำนวณค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีแนวทางเปรียบเทียบที่เหมือนกับในหัวข้อที่ผ่านมาโดยใช้การเปรียบเทียบค่าความหนาของท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่กับค่าความยาวคลื่น โดยมีค่าจากช่วง 0.06 ถึง 0.60 จะพบว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่งและ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศทั้งสองแบบ ตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะนำมาสร้างคือที่  $w/\lambda$  เท่ากับ 0.18 หรือด้านหนาเท่ากับ 3 เซนติเมตร ผลจากการวิเคราะห์คือค่าสนามสูงสุดในระนาบสนามแม่เหล็กสายอากาศทั้งสองแบบนี้มีค่าเท่ากันที่ 180 องศา ส่วนค่าสนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้านั้นปรากฏว่าค่าของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่มีค่า 90 องศา ส่วนของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีค่า 92 องศา

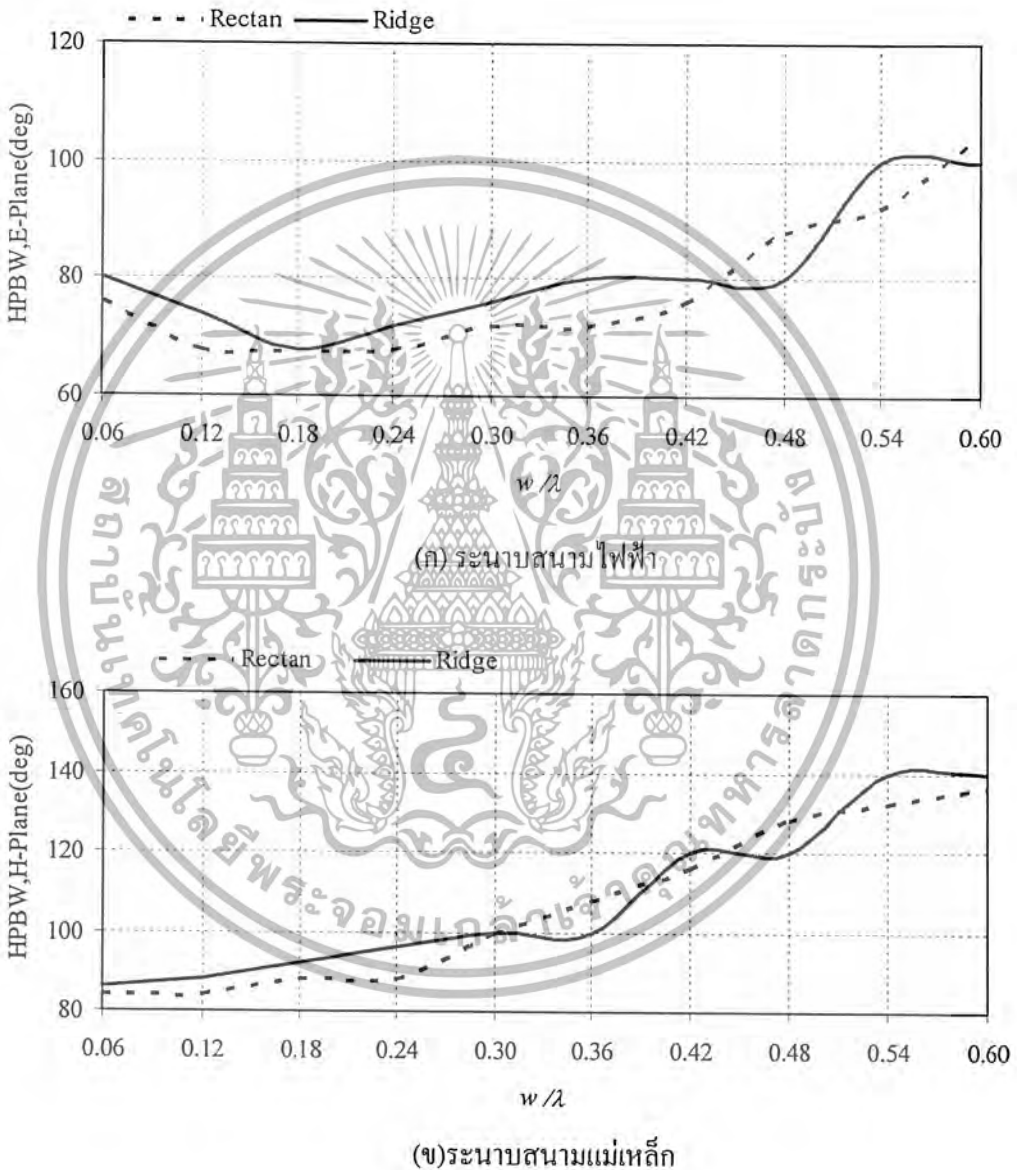


รูปที่ 3.10 ค่าที่สนามสูงสุดของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่เปรียบเทียบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศ จากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เป็นคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศโดยค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ต้องการคือ มีลักษณะแคบ ๆ ทั้งนี้เพื่อให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการได้แม่นยำยิ่งขึ้นและมีการสูญเสียกำลังงานในทิศทางอื่นน้อย ๆ ด้วย

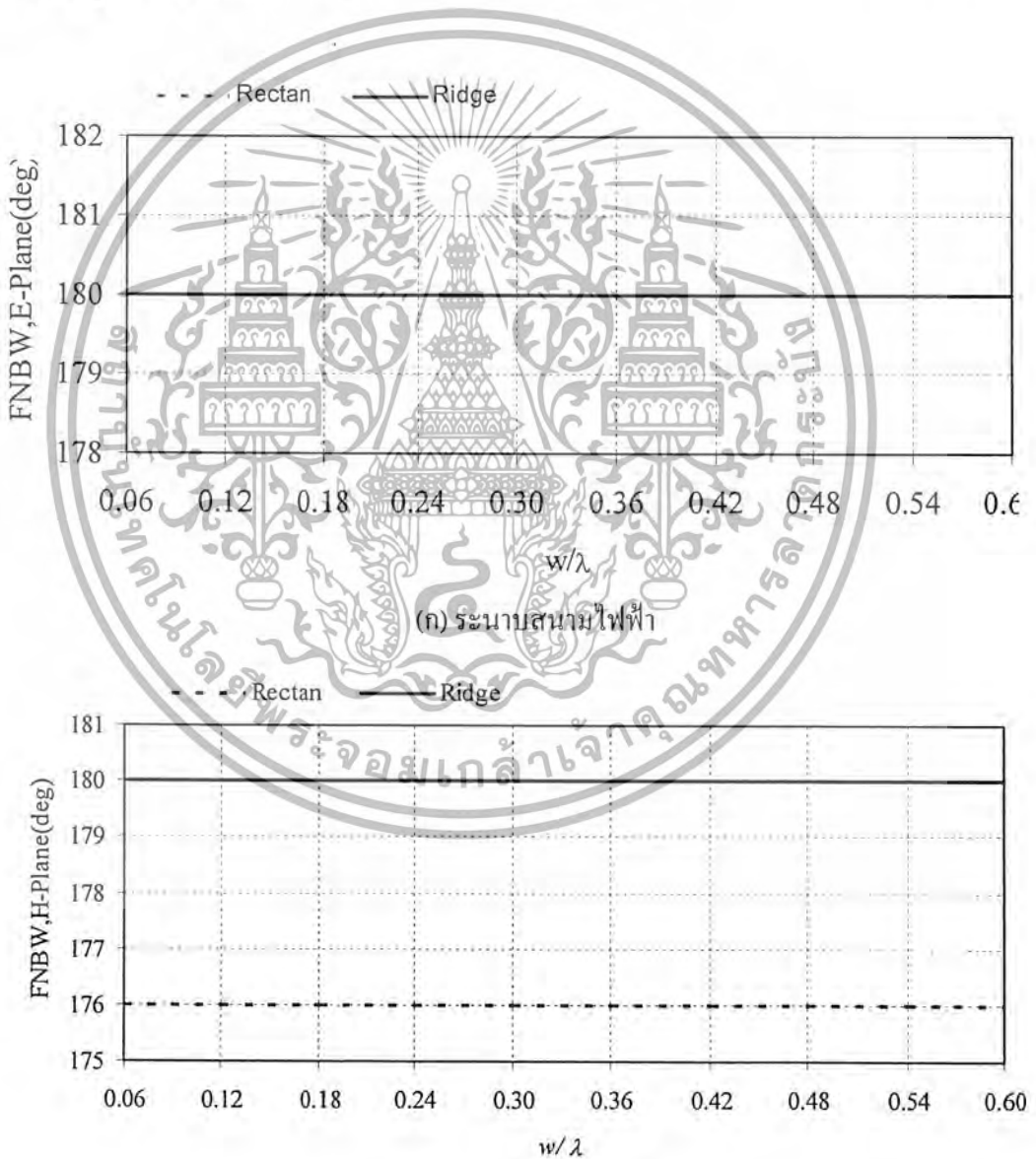


รูปที่ 3.11 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่เปรียบเทียบกับสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.11 (ก) และ 3.11 (ข) ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่พิจารณาจากการเปรียบเทียบความหนาของท่อนำคลื่นกับค่าความยาวคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าจะพบว่าที่  $(w/\lambda)$  เท่ากับ 0.18 ของสายอากาศทั้งสองแบบแล้วจะได้ว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้ามีขนาดลำคลื่นที่เท่ากัน ซึ่งเท่ากับ 68 องศา และในระนาบสนามแม่เหล็กสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่จะมีขนาดของลำคลื่นที่กว้างกว่าสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีค่า 92 องศา และ 90 องศา ตามลำดับ

3.3.8 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สนามเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

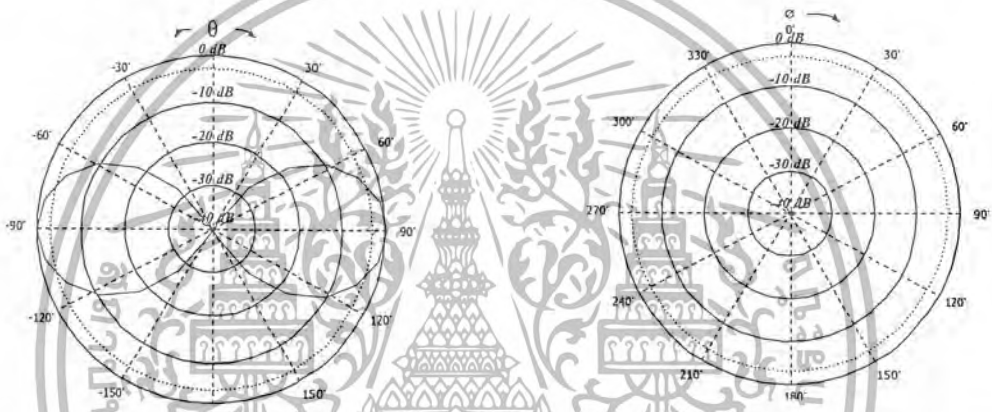


รูปที่ 3.12 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สนามเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คัดลอกแบบรีดจ์คู่และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

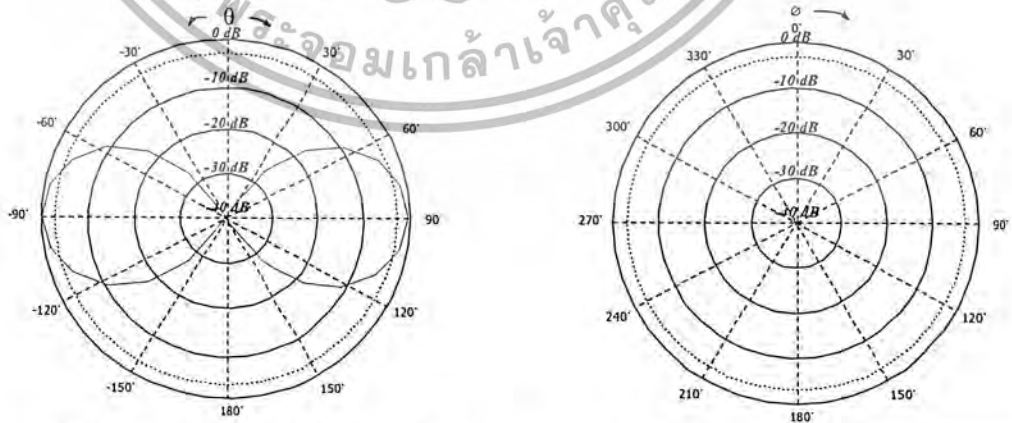
จากรูปที่ 3.12 (ก) และ 3.12 (ข) ค่าความกว้างลำคลื่นที่สนามเป็นศูนย์กลางครั้งแรกของสายอากาศ จากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ที่พิจารณา จากค่าการเปรียบเทียบความหนาของท่อนำคลื่นกับค่าความยาวคลื่น ในระนาบสนามไฟฟ้าที่จะพบว่า  $(w/\lambda)$  เท่ากับ 0.18 จะมีค่ามุมที่ลำคลื่นเป็นศูนย์กลางแรกนั้นคล้ายคลึงกับ บริเวณอื่น และมีขนาดลำคลื่นเท่ากับแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กที่  $(w/\lambda)$  เท่ากับ 0.18 จะพบว่าค่าความกว้างของลำคลื่นที่สนามเป็นศูนย์กลางแรกมีการเกิดลำคลื่นที่เป็นมุมที่มีขนาดผลที่ คล้ายคลึงกันไปในทิศทางเดียวกันดังนั้นจึงวิเคราะห์ได้ว่า ที่  $(w/\lambda)$  เท่ากับ 0.18 จะมีขนาดลำคลื่นที่เกิด ครั้งแรกที่เท่ากันทุกขนาดส่วนสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้ผลที่เหมือนกัน

3.3.9 คุณลักษณะการโพลาริไรซ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่และ แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า



(ก) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิศทาง  $\theta$  (ข) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิศทาง  $\phi$

รูปที่ 3.13 การวิเคราะห์โพลาริไรซ์โดยคำนวณจากโปรแกรม NEC2D ของสายอากาศแบบสองทิศทาง จากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่



(ก) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิศทาง  $\theta$  (ข) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิศทาง  $\phi$

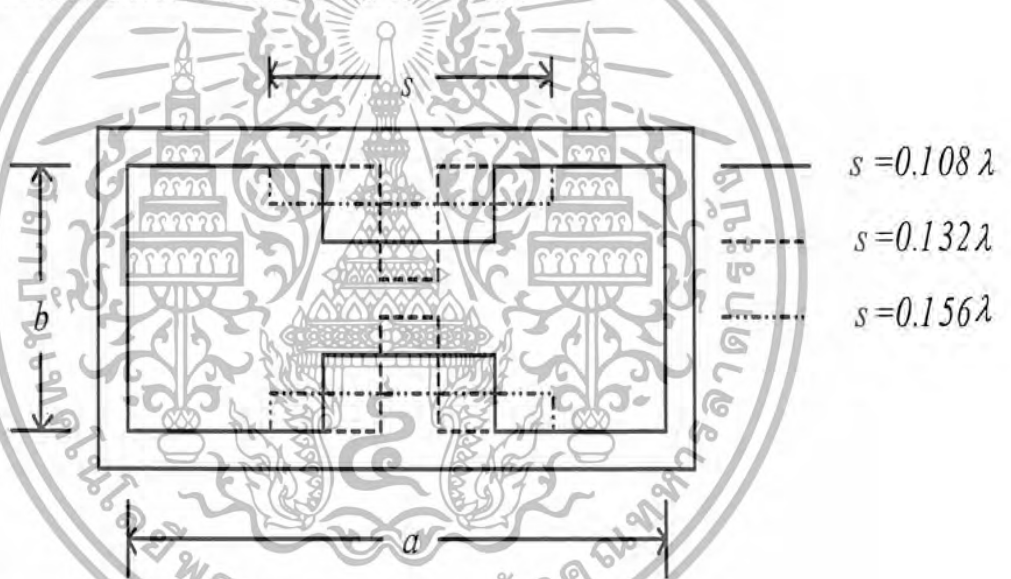
รูปที่ 3.14 การวิเคราะห์โพลาริไรซ์โดยคำนวณจากโปรแกรม NEC2D ของสายอากาศแบบสองทิศทาง จากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์โดยคำนวณจากโปรแกรม NEC2D พบว่ามีเฉพาะองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าเฉพาะในทิศทาง  $\theta$  เท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่นี้มีการโพลาริเซชันเป็นแบบเชิงเส้นแนวตั้ง (กรณีที่ว่าสายอากาศให้สายโพรบชี้แนวตั้ง) ดังรูป 3.13 (ก) และ 3.13 (ข) โดยผลที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โพลาริเซชันของสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะได้ว่ามีผลในลักษณะเดียวกันคือจะมีสนามเฉพาะทิศทาง  $\theta$  เท่านั้นจึงสรุปได้ว่าการเพิ่มบริดจ์เข้าไปไม่มีผลทำให้การโพลาริเซชันเปลี่ยนแปลง

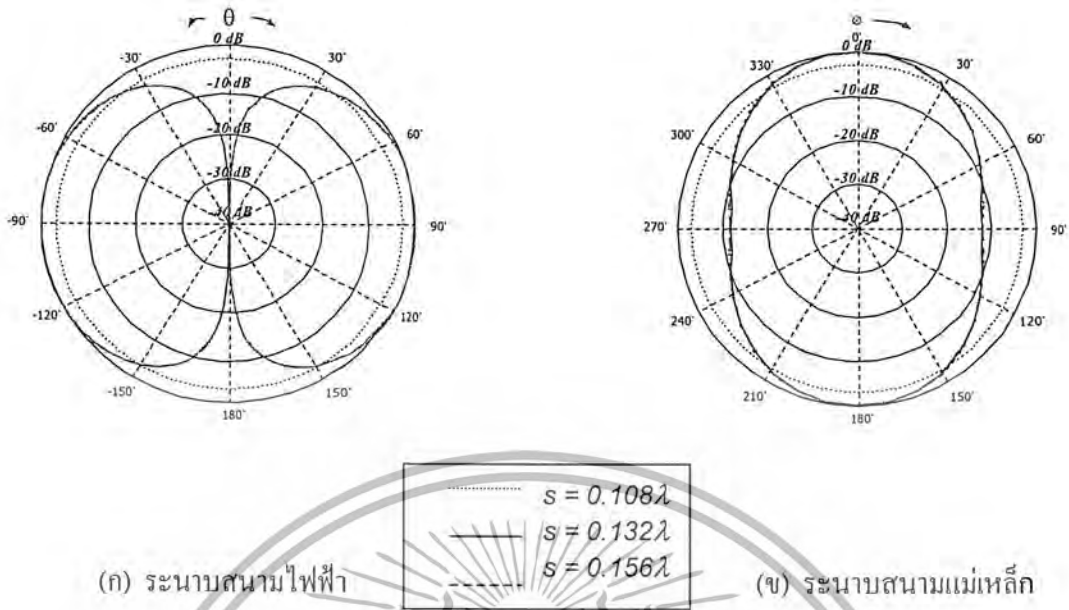
### 3.4 การเปลี่ยนแปลงความยาวบริดจ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู

จากการที่วิเคราะห์ข้างต้นทำให้ทราบรายละเอียดด้านการแพร่กระจายคลื่นอันเนื่องมาจากการออกแบบจากสมการเพียงค่าเดียวผลที่ได้เมื่อลองเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะได้ผลคล้ายคลึงในระนาบสนามแม่เหล็กที่กว้างกว่าส่วนในระนาบสนามไฟฟ้านั้นมีขนาดที่เท่ากันซึ่งเป็นข้อสังเกตในการพิจารณาในส่วนนี้ขึ้น



รูปที่ 3.15 การเปลี่ยนความยาวบริดจ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู

จากรูปที่ 3.15 ได้ทำการเปลี่ยนขนาดของบริดจ์โดยไม่เปลี่ยนแปลงขนาดความยาวและสูงของท่อ ความยาวของบริดจ์ได้มาจากการคำนวณจากสมการ 3.1 โดยความยาวบริดจ์จะสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างบริดจ์ ก็คือถ้ามีความกว้างบริดจ์มากกว่าระยะห่างระหว่างบริดจ์ก็จะมากตามไปด้วยจากการเปลี่ยนขนาดความยาวบริดจ์ดังรูปที่ 3.15 ทำให้ได้ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นคือ



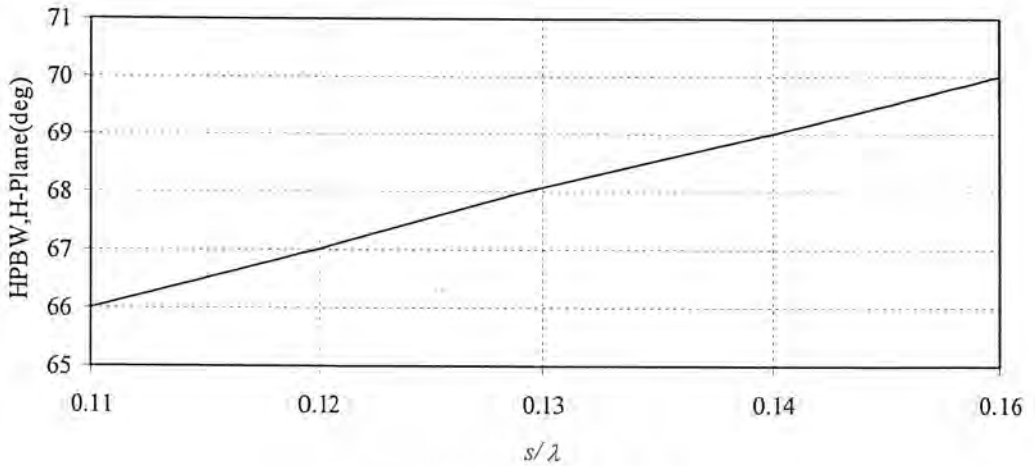
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ที่มีความยาวรีดจ์เท่ากับ  $0.108\lambda$ ,  $0.132\lambda$  และ  $0.156\lambda$

จากรูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของระบายสนามไฟฟ้าที่ขนาดความยาวรีดจ์  $0.108\lambda$ ,  $0.132\lambda$  และ  $0.156\lambda$  (1.8 เซนติเมตร, 2.2 เซนติเมตร และ 2.6 เซนติเมตร) นั้นก็ยังคงมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยที่ในระบายสนามไฟฟ้าจะมีมุมที่สนามสูงสุดอยู่ที่  $90^\circ$  และ  $-90^\circ$  องศา และในระบายสนามแม่เหล็กจะมีมุมที่สนามสูงสุดที่  $0^\circ$  และ  $180^\circ$  องศา



(ค) ระบายสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.17 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ที่  
ขนาด ความยาวรีดจ์ต่อความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.108 ถึง 0.156

จากรูปที่ 3.17 ขนาดลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งจะเปลี่ยนตามขนาดความยาวรีดจ์ คือ 66 องศา 68 องศา และ 70 องศา ตามลำดับ ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กจะมีค่าความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 92 องศา ทั้ง 3 ขนาด จากการทดสอบนี้จะได้ผลการทดสอบ คือ ที่การคำนวณขนาดพ้อที่ โหมดพื้นฐาน จากสมการที่ 3.1 เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของความยาวรีดจ์มากขึ้น ความสูงของรีดจ์ก็จะลดลงเป็นผลให้ขนาดลำคลื่นทางระนาบสนามไฟฟ้ามีขนาดที่เพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกันถ้าจะลดขนาดลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กลงได้ในกรณีที่มีขนาดความยาวรีดจ์ลดลง

### 3.5 สรุป

ในบทนี้จะใช้หลักการวิเคราะห์และการคำนวณจากบทที่ 2 และ NEC2D มาวิเคราะห์สายอากาศที่ต้องการออกแบบให้ใช้งานที่ความถี่ 1800 GHz และมีค่าแถบความถี่ใช้งานที่กว้างขึ้นจากปกติ โดยทำการวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปสร้างเพื่อทดสอบในขั้นต่อไป คุณลักษณะที่ได้ทำการวิเคราะห์ก็คือคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น และคุณลักษณะการโพลาไรซ์ การวิเคราะห์จะเริ่มจากการคำนวณ หาขนาด ความกว้าง ความยาว ความยาวรีดจ์ และระยะห่างระหว่างรีดจ์ เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมกับความถี่ใช้งานแล้วก็ทำการวิเคราะห์จะต้องมีค่า VSWR ไม่เกิน 2 ตามมาตรฐานทางวิชาการส่วนค่าสภาพเงาเชิงทิศทางควรจะมีค่ามาก เมื่อได้ด้านความหนาที่เหมาะสมแล้วก็ทำการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น และการโพลาไรซ์ ส่วนการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้เพื่อแสดงการเปรียบเทียบรวมทั้งออกแบบเพื่อนำไปสร้างเป็นสายอากาศจริงซึ่งสายอากาศที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อนำไปสร้างคือ สายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ มีขนาดคือ ความยาวพ้อ = 0.539λ ความกว้างของพ้อ = 0.245λ ช่องว่างระหว่างรีดจ์ = 0.404λ ความยาวรีดจ์ = 0.132λ และความหนาของท่อนำคลื่น = 0.180λ ส่วนสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดคือ ความยาวพ้อ = 0.539λ ความสูงของพ้อ = 0.245λ และความกว้างของท่อนำคลื่น = 0.180λ จากการออกแบบก็

จะนำขนาดของพ้อทั้งต้องไปสร้าง ทดสอบ และเปรียบเทียบผลต่อไป อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การสร้าง ทดสอบ และผลการทดสอบ

#### 4.1 บทนำ

จากผลวิเคราะห์ในบทที่ 3 จะนำค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาข้อผิดพลาด โดยในบทนี้จะนำเสนอการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ และทำการเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

#### 4.2 การสร้าง

จากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ได้ทำการสร้างสายอากาศตามทีออกแบบโดยทำงานที่ความถี่ปฏิบัติการเท่ากับ 1.8 GHz โดยมีขนาดของสายอากาศอย่างเหมาะสมมีขั้นตอนดังนี้คือ

1. การเลือกใช้ขนาดของสายอากาศให้เหมาะสมกับย่านความถี่ใช้งาน สามารถพิจารณาได้จากตาราง ก-1 (ภาคผนวก ก) เราจึงเลือกใช้สายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ มีค่าดังนี้

$$1.1 \text{ ความยาวของท่อ } (a) = 0.539\lambda \text{ (9 cm)}$$

$$1.2 \text{ ความสูงของท่อ } (b) = 0.245\lambda \text{ (4.1 cm)}$$

$$1.3 \text{ ช่องว่างระหว่างริคค์ } (d) = 0.404\lambda \text{ (1.7 cm)}$$

$$1.4 \text{ ความยาวของริคค์ } (s) = 0.132\lambda \text{ (2.2 cm)}$$

$$1.5 \text{ ความกว้างของท่อนำคลื่น } (w) = 0.180\lambda \text{ (3 cm)}$$

$$1.6 \text{ ความถี่ของท่ออยู่ในย่าน} = 1.5 - 3.6 \text{ GHz}$$

2. เลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมมาใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบสองทิศทางโดยใช้อลูมิเนียม (Aluminum) พิจารณาได้จากตาราง ก-2 (ภาคผนวก ก)

3. เจาะรูใส่โพรบภายในสายอากาศ จะใส่ไว้บริเวณกึ่งกลางท่อเพราะจะมีสนามไฟฟ้าในโหมด  $TE_{10}$  จะมีค่ามากที่สุดตรงกลางท่อนำคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยทำการสร้างสายอากาศให้มีคุณสมบัติดังที่กล่าวมาโดยใช้เป็นตัวรับ

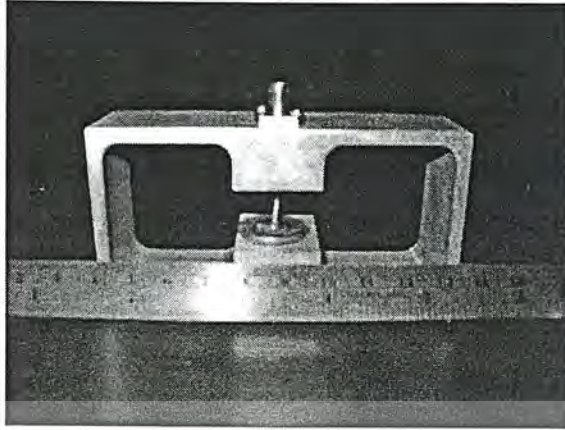
4. หาความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดสอบ จากสมการ

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4.1)$$

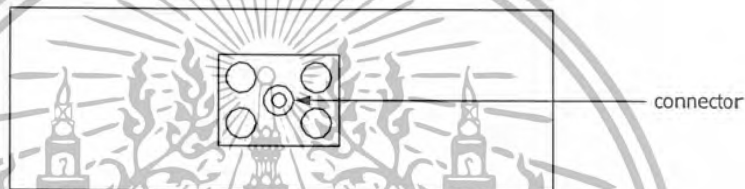
โดยที่  $c$  คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่า  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

$f$  คือ ค่าความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ เท่ากับ 1.8 GHz

จะได้  $\lambda = 16.67$  เซนติเมตร



(ก) ท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่ที่ใช้ในการทดสอบ



(ข) ลักษณะการต่อคอนเนคเตอร์กับโพรบเข้ากับท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่

รูปที่ 4.1 ลักษณะของท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่ที่ได้สร้างขึ้น

#### 4.3 การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบในโรงงานนี้จะทำการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่ โดยจะทำการวัดค่าและทดสอบคุณสมบัติของพารามิเตอร์ต่างๆ คือการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ บีบีวีคิจากรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเงาจางทิศทาง ค่าอัตราขยายของสายอากาศ การโพลาไรซ์ และการเปรียบเทียบแถบกว้างความถี่ใช้งาน

4.3.1 การทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง อิมพีแดนซ์ และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่

การทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง อิมพีแดนซ์ และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่ เนื่องจากในทางปฏิบัติจริงๆ นั้น สายอากาศเราจะไม่สามารถที่จะปรับอิมพีแดนซ์ (ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากหัวของสายอากาศ) ได้เท่ากับอิมพีแดนซ์ของเครื่องรับหรือเครื่องส่งได้ ดังนั้นเมื่อมีการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องรับหรือเครื่องส่ง ผลจะทำให้กำลังงานส่วนหนึ่งเกิดการสะท้อนกลับที่จุดอินพุตของสายอากาศ ดังนั้นเพื่อเป็นการบ่งบอกแก่ผู้ทำสายอากาศไปใช้งานได้ว่า สายอากาศตัวนี้หากสร้างไปใช้งานแล้วจะสามารถรับกำลังงานที่ส่งมาได้มากน้อยเพียงใด จะสามารถบอกได้ด้วยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1.1 อุปกรณ์การทดสอบ

1. Network Analyzer
2. สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่
3. SMA 50  $\Omega$  Calibration Kit
4. เครื่อง Printer

#### 4.3.1.2 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการปรับสถานะเครื่อง Network Analyzer เป็นแบบ one port (S22)
2. กดปุ่ม START ป้อนความถี่เริ่มต้น ตามด้วยหน่วยของความถี่
3. กดปุ่ม STOP ป้อนความถี่สิ้นสุด ตามด้วยหน่วยของความถี่
4. กดปุ่ม MKR (marker)
  - 4.1 ให้ MARKER 2 อยู่ที่ความถี่เริ่มต้น ( 1.5 GHz )
  - 4.2 ให้ MARKER 1 อยู่ที่ความถี่ใช้งาน (1.8 GHz)
  - 4.3 ให้ MARKER 3 อยู่ที่ความถี่สิ้นสุด (2.5 GHz)
5. กดปุ่ม CAL (Calibration) เลือกที่ S22 เป็นการทำการ Calibrate เครื่องโดยจะขึ้นข้อความ OPEN, SHORT, LOAD
6. นำตัว Calibrator แบบ open มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม open แล้วทำการถอดตัว Calibrator ออก
7. นำตัว Calibrator แบบ short มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม SHORT แล้วทำการถอดตัว Calibrator ออก
8. นำตัว Calibrator แบบ Broadband Load มาต่อเข้ากับสายสัญญาณแล้วกดปุ่ม Broadband และ DONE LOAD สองครั้ง ทางจอภาพจะแสดงตัวหนังสือ "COR" (Correction) แล้วทำการถอดตัว LOAD ออก
9. ทำการกดปุ่ม FORMAT จะมีเมนูให้เลือก ทำการเลือก Smith Chart
10. นำตัว Calibrator แบบ short มาต่อเข้ากับสายนำสัญญาณอีกครั้งเพื่อทำการปรับสเกลอ้างอิงโดยทำการปรับที่ Electrical delay เลื่อนไปที่ตำแหน่งของลูกศรไปที่ตำแหน่งซ้ายมือสุดของ Smith Chart แล้วทำการปลดตัว Calibrator ออก
11. ขั้นตอนที่ 1-10 เป็นขั้นตอนการ Calibration เครื่อง
12. นำท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ มาทำการต่อเข้ากับเครื่อง
13. กดปุ่ม FORMAT เครื่องจะแสดง LOG MAG, SMITH CHART, SWR PHASE และ DELAY
14. เลือกที่ SWR เครื่องจะแสดงค่า SWR ของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ที่วัดออกมาได้ ถ้าค่าที่วัดได้ยังไม่เข้าใกล้ 1.00 ให้ทำการปรับแต่งความยาวของสายโพรบสายอากาศตัวกระตุ้นจนกว่าจะได้ค่า SWR ที่เข้าใกล้ 1.00 มากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ แล้วจาก

นั้นทำการกดปุ่ม COPY เพื่อทำการพิมพ์ออกมา

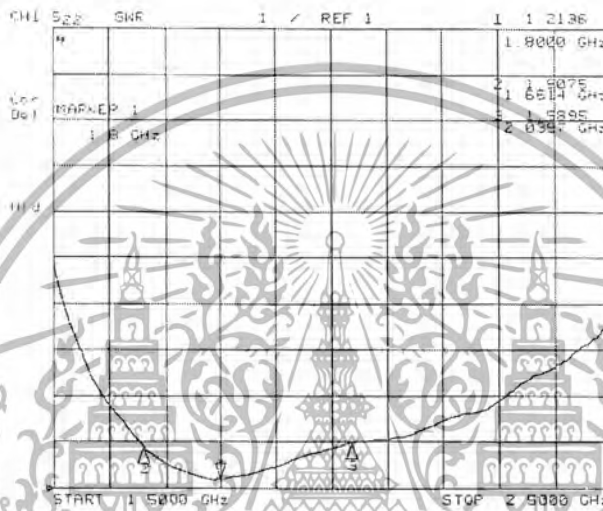
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 15. ทำการเลือกที่ LOG MAG และ SMITH CHART แล้วทำการกดปุ่ม COPY เพื่อทำการพิมพ์รูปออกมา

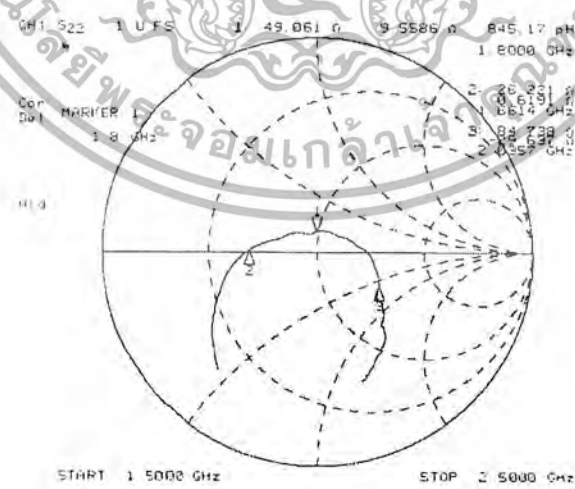
โดยทั่วไปแล้วค่า VSWR ที่จะสามารถนำมาใช้งานได้ต้องไม่เกิน 2:1 มาตรฐานในงานทางวิชาการ และค่าอิมพีแดนซ์ต้องมีค่าใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม ซึ่งเราอาจจะทำการปรับที่ค่าความยาวของโพรบ เพื่อให้ได้ค่า VSWR และอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด

4.3.1.3 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

อากาศ

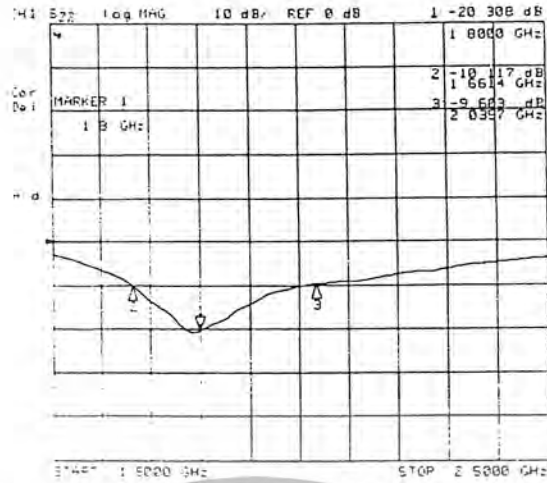


รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบสองทิวทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่

สายอากาศแบบสองทิวทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ตามที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าการสูญเสียย้อนกลับที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 4.1

4.3.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

เมื่อทำการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์เสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำสายอากาศมาทดสอบหาค่าระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก โดยที่ลักษณะการวางสายอากาศเมื่อทำการวัดในระนาบ H-planeจะเป็นดังนี้

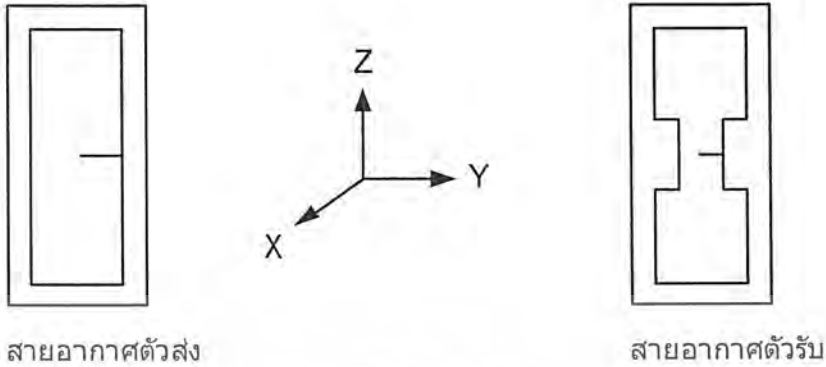


รูปที่ 4.5 ลักษณะการวางสายอากาศเมื่อทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามแม่เหล็ก

ลักษณะการวางสายอากาศเริ่มต้น โดยวางสายอากาศทั้งตัวรับและตัวส่งวางให้ด้านหน้าเข้าหากัน โดยให้โพรบตั้งตรงกัน ซึ่งโพรบจะวางในแนวตั้งแล้ววางสายอากาศทั้งสองตัวให้ห่างกันมากกว่าระยะ Far Field คือ 0.504 m จากนั้นให้สายอากาศตัวส่งอยู่กับที่ส่วนตัวรับจะหมุนรอบแกน y จนครบ 360 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการวัดในระนาบ E-plane



รูปที่ 4.6 ลักษณะการวางสายอากาศเมื่อทำการวัดแบบรูป  
การแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า

ลักษณะการวางสายอากาศจะเริ่มต้น ด้วยการวางสายอากาศทั้งตัวรับและตัวส่งวางให้ด้านหน้าเข้าหากัน โดยตั้งให้โพรบตั้งตรงกันซึ่งโพรบจะวางในแนวนอนแล้ววางสายอากาศทั้งสองตัวให้ห่างกันมากกว่าระยะสนามระยะไกล คือ  $0.504 \text{ m}$  จากนั้นให้สายอากาศตัวส่งอยู่กับที่ส่วนตัวรับจะหมุนรอบแกน  $x$  จนครบ 360 องศา

#### 4.3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่น

1. เครื่อง Network Analyzer
2. สายนำสัญญาณ
3. ขาดังสำหรับกรติดตั้งสายอากาศจำนวน 2 ตัว
4. เครื่อง Turn table ที่ใช้ในการหมุนสายอากาศรับ
5. สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่

#### 4.3.2.2 วิธีการทดสอบ

1. ตั้งความถี่ให้กับเครื่อง Network Analyzer ด้วยความถี่ปฏิบัติการ 1.8 GHz
2. ตั้งค่า Center ใช้ที่ความถี่ปฏิบัติการ 1.8 GHz และ SPAN ที่ 500 MHz
3. ทำการปรับสถานะเครื่องเป็นแบบ two port ( $S_{21}$ )
4. ทำการ MARKER ความถี่ที่ใช้งานและทำการ Calibrate menu
5. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศเข้ากับเครื่อง Network Analyzer เพื่อเป็นตัวรับสัญญาณ ซึ่งสายอากาศทั้งสองที่ใช้ในการทดลอง ต้องมีระยะห่างไม่น้อยกว่า  
จากสมการที่ 2.3 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

โดยที่  $D$  คือ ขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

แต่ถ้าในกรณีที่พิจารณาการทดสอบสายอากาศส่งและรับพร้อมกัน

$D = D_T + D_R$  โดยที่  $D_T$  คือ ขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศตัวส่ง

$D_R$  คือ ขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศตัวรับ

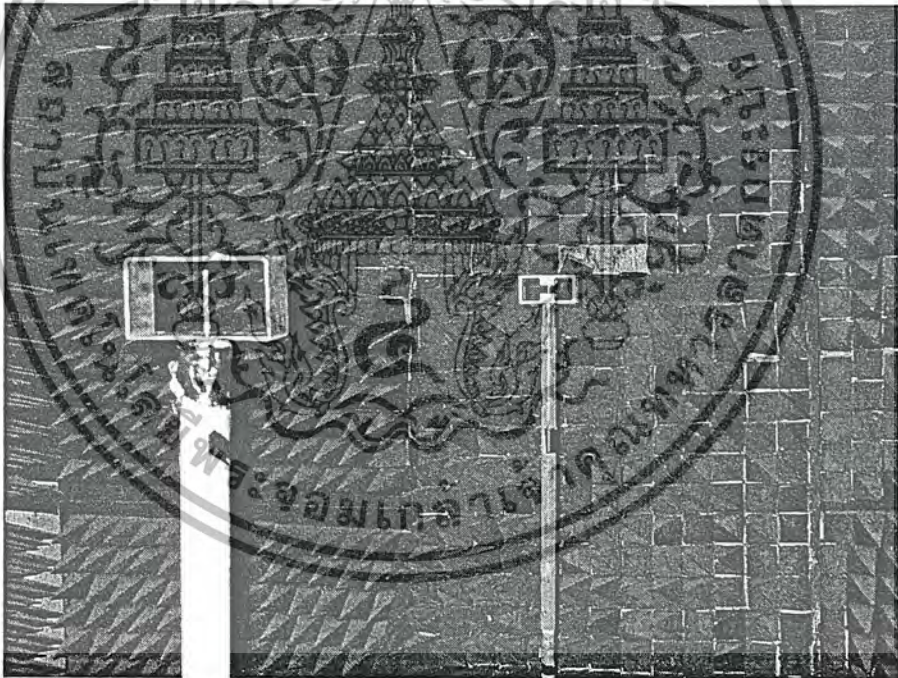
โดย  $D = 10.5 + 11 = 20.5 \text{ cm}$

ในที่นี้ใช้ความถี่ที่ 1.8 GHz และ  $(D)$  มีค่าเท่ากับ 20.5 cm ดังนั้น จากสมการ 2.3 จะได้

$$R \geq \frac{2(20.5)^2}{16.67} = 50.41 \text{ cm}$$

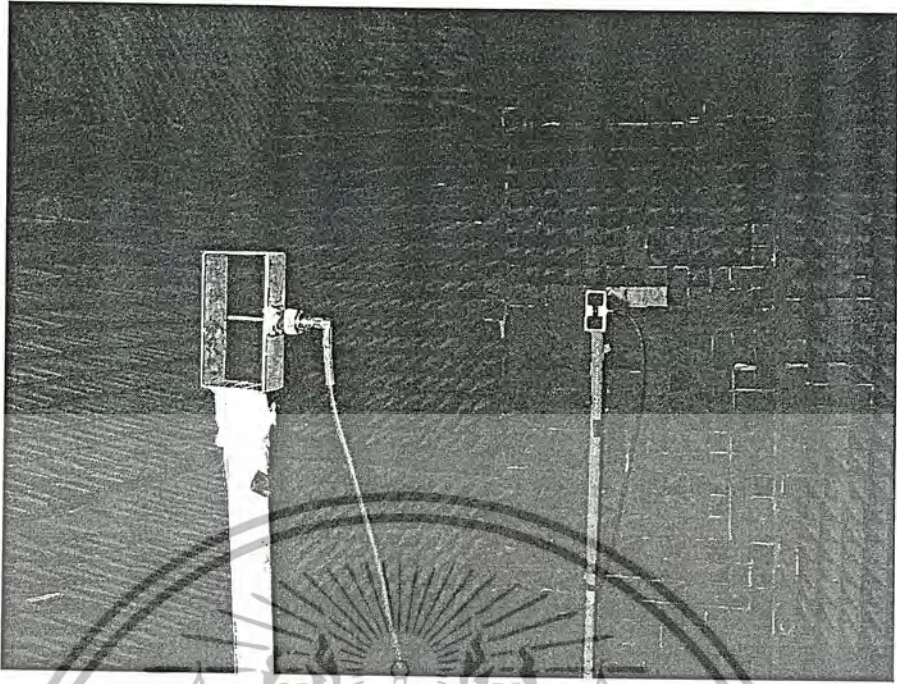
ในการทดสอบใช้ระยะห่างเท่ากับ 80 cm

6. ทำการเปลี่ยนระนาบการทดสอบ
7. นำค่าที่ทดสอบได้ของสายอากาศแต่ละค่ามาทำการ normalize แล้วทำการพล็อตค่าลงกราฟ



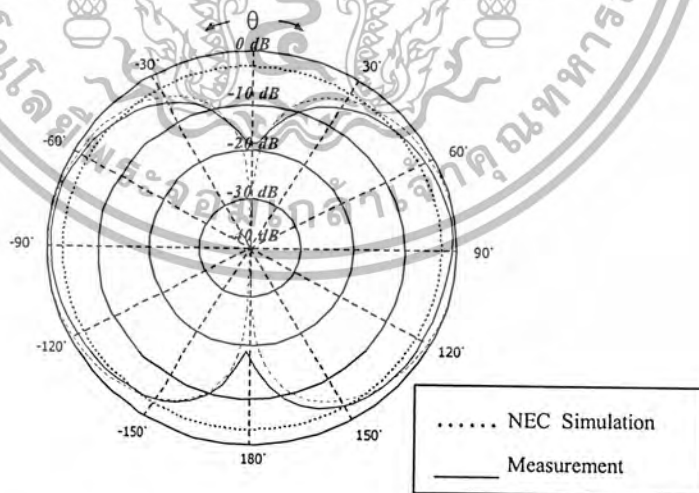
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น  
ในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



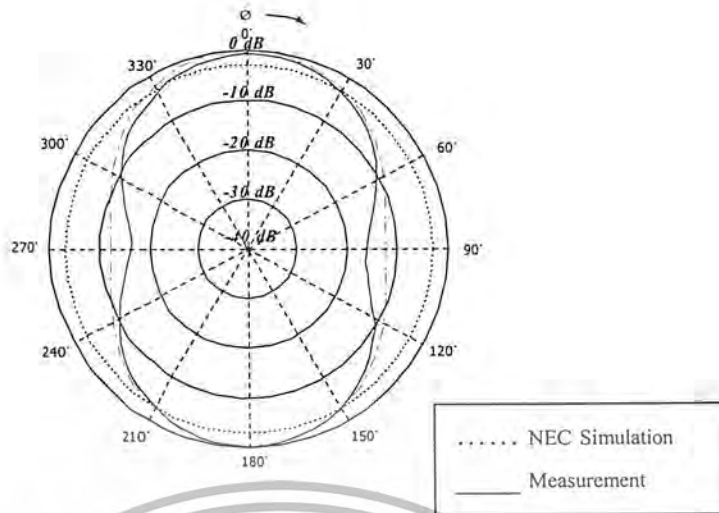
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น  
ในระนาบสนามไฟฟ้า

#### 4.3.2.3 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่  
ในระนาบสนามไฟฟ้า เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกำไร  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบสายอากาศแบบสองทิวทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่  
ในระนาบสนามแม่เหล็กเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น สามารถแสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระหว่างการทดสอบและ โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2D ในการทดสอบในระนาบสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.10 จะพบว่าสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิวทางการแพร่กระจายคลื่นมีลักษณะใกล้เคียงกันแต่ก็ยังคงมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นบ้างเนื่องจากผลการเลี้ยวเบนของคลื่นในกรอบสี่เหลี่ยมโลหะของตัวเอง และในการทดสอบในระนาบสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 4.9 จะพบว่าความกว้างของลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าก็มีความใกล้เคียงกัน

#### 4.3.2.4 การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ออกถึง ความกว้างของโลบหลักจะเป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในโลบหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด 0.5 หรือ  $-3$  dB ซึ่งจากการวัดรูปแบบของสายอากาศ เพื่อดูลักษณะรูปแบบในการแพร่กระจายคลื่นแล้ว นำค่าที่ได้มาพล็อตลงในกราฟที่แสดงการแพร่กระจายคลื่นแล้ว สามารถนำมาหาบีมวิดธ์ของสายอากาศได้ เนื่องจากการทดลองเป็นแบบรูปการแพร่กระจายของกำลังงาน ดังนั้นจึงหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่  $-3$  dB

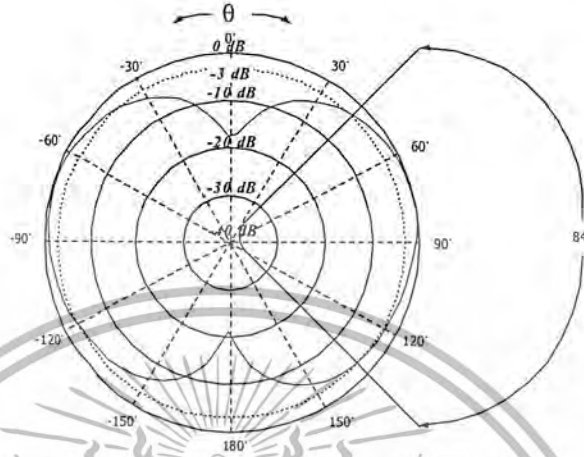
วิธีการหาความกว้างของค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

1. การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็กจากรูปแบบของระนาบสนามแม่เหล็ก หาได้จากจุดตัดที่เกิดจากการตัดกันของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตัดกับวงกลมที่จุด  $-3$  dB จะได้จุดตัดสองจุด นำค่ามุมที่ได้ทั้งสองมารวมกัน จะได้ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็ก

2. การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้าจากรูปแบบของสนามไฟฟ้า หาได้จากจุดตัดที่เกิดจากการตัดกันของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ตัดกับวงกลมของ  $-3$

dB จะได้จุดตัดสองจุด นำเอาค่ามุมที่ได้ทั้งสองมารวมกัน จะได้ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้า

3. ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ได้จากการทดสอบและจากโปรแกรม แสดงดังรูปที่ 4.11-4.14



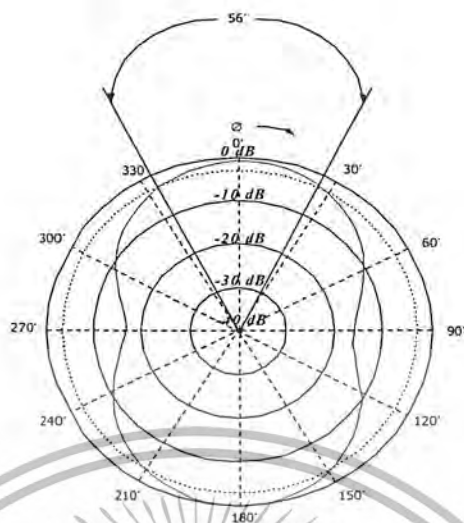
รูปที่ 4.11 การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.12 การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากผลการวิเคราะห์ (NEC 2D)

จากรูปที่ 4.11 เป็นการหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้า ผลจากการทดสอบจะพบว่าสายอากาศมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ 84 องศา โดยอาศัยจากการตัดกันของแบบรูปของสนามไฟฟ้ากับวงกลม  $-3$  dB ที่มีมุม 42 องศา และ 138 องศา และจากรูปที่ 4.12 ในระนาบสนามไฟฟ้า ผลจากการวิเคราะห์จะได้ว่าสายอากาศมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ 90 องศา โดยอาศัยจากการตัดกันของแบบรูปของสนามไฟฟ้ากับวงกลม  $-3$  dB ที่มีมุม 45 องศา และ 135 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.14 การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวิเคราะห์ (NEC 2D)

จากรูปที่ 4.13 เป็นการหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็ก ผลจากการทดสอบจะพบว่าสายอากาศมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ 56 องศา โดยอาศัยจากการตัดกันของแบบรูปของสนามแม่เหล็กกับวงกลม  $-3$  dB ที่มีมุม 28 องศา และ 332 องศา และจากรูปที่ 4.14 ในระนาบสนามแม่เหล็ก ผลจากการวิเคราะห์จะได้ว่าสายอากาศมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ 64 องศา โดยอาศัยจากการตัดกันของแบบรูปของสนามแม่เหล็กกับวงกลม  $-3$  dB ที่มีมุม 32 องศา และ 228 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

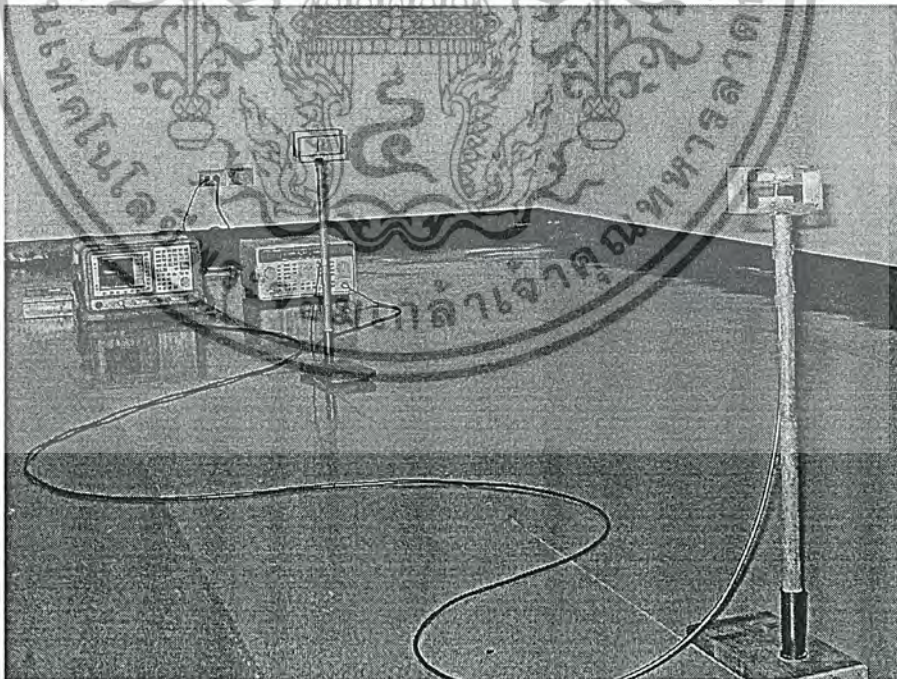
### 4.3.3 การวัดค่าอัตราขยายสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่

#### 4.3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาอัตราขยายสายอากาศ

1. เครื่อง Spectrum Analyzer
2. เครื่อง Signal Generator
3. สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่
4. สายวัดสัญญาณ RG 223 50Ω SUHNER SWITZERLAND
5. สายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน 2 ตัว

#### 4.3.3.2 วิธีการทดสอบ

1. ทำการตั้งสายอากาศส่งและรับให้มากกว่าขนาดสนามระยะไกล
2. ทำการป้อนแหล่งจ่าย Signal Generator โดยตั้งความถี่ที่ 1.8 GHz ตั้งขนาด Amplitude ที่ 0 dBm
3. ตั้งค่าที่จะอ่านที่เครื่อง Spectrum Analyzer โดยตั้งความถี่ที่ 1.8 GHz ตั้ง Band ที่อ่าน start = 1700 MHz stop = 1900 MHz
4. เมื่อจะทำการป้อนแหล่งจ่ายให้สายอากาศตัวส่งกด RF On แล้วทำการอ่านค่าที่ได้จากเครื่อง Spectrum Analyzer โดยกดที่ปุ่ม Peak Search



รูปที่ 4.15 รูปการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.3 การหาอัตราขยายของสายอากาศ

จากการทดสอบวัดค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณทั้งด้านส่งและด้านรับได้ค่าดังนี้

$$L_t = 3.62 \text{ dB}$$

$$L_r = 6.75 \text{ dB}$$

จะหาอัตราการขยายของสายอากาศได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - L_s \quad (4.2)$$

โดยที่

$P_r$  คือ กำลังงานที่อ่านได้จากเครื่อง Spectrum Analyzer (dBm)

$P_t$  คือ กำลังงานที่ส่งออกจากตัว Signal Generator (dBm)

$G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศทางด้านส่ง (dB)

$G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศทางด้านรับ (dB)

$L_t$  คือ ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณทางด้านทาส่ง (dB)

$L_r$  คือ ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณทางด้านทากรับ (dB)

$L_s$  คือ ค่าการสูญเสียในทิว้าง (Free Space Loss) มีค่าเท่ากับ  $20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)$

โดย

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

องค์ประกอบที่ใช้ในการหาอัตราการขยายของสาย ในทางปฏิบัติจะต้องมีปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ต้องสร้างสายอากาศแบบเดียวกันทั้ง 2 ตัว
  - 1.1 มีรูปร่างเหมือนกัน
  - 1.2 วัสดุที่ใช้ในการทำต้องเหมือนกัน
  - 1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าทั้ง VSWR และอิมพีแดนซ์ ต้องเหมือนกัน
2. ต้องทำการวัดที่สนามระยะไกล คือ

$R$  ที่ใช้ในการทดลองใช้ที่ค่า 2.16 เมตร

ดังนั้นอัตราการขยายของสายอากาศจึงหาได้จากสมการ

$$G(\text{dBi}) = \frac{P_r(\text{dBm}) - P_t(\text{dBm}) + L_t(\text{dB}) + L_r(\text{dB}) + L_s(\text{dB})}{2}$$

$$P_r = -42.3 \text{ dBm}$$

$$P_t = 0 \text{ dBm}$$

$$L_s = 20 \log \left[ \frac{4\pi(2.16)}{0.1667} \right]$$

$$= 44.2301 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 4.2 จะได้

$$-42.3 = 0 + G - 3.62 - 6.75 - 44.2301$$

$$G = 12.28 \text{ dBi}$$

$$\therefore G_r (\text{dBi}) = 6.14 \text{ dBi}$$

#### 4.3.4 การหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางถือได้ว่าเป็นค่าที่แสดงทิศทางของสายอากาศโดยปกติจะถือเอาตามทิศทางของโลบหลักเป็นหลัก โดยค่าสภาพเจาะจงทิศทางซึ่งเป็นอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกซ์พอยท์ซอส โดยถ้าค่าสภาพเจาะจงทิศทางยิ่งมีค่ามากจะมีคุณสมบัติในการชี้ทิศทางดีกว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มีค่าน้อยการหาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ของสายอากาศในทางปฏิบัติหาได้จากค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครั้งหนึ่งที่ได้จากแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นโดยนำมาคำนวณตามสมการ 4.3

การหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางในทางปฏิบัติ

$$D_0 \approx \frac{4\pi \left(\frac{180}{\pi}\right)^2}{\theta_H \times \theta_V} \approx \frac{41253}{\theta_H \times \theta_V} \quad (4.3)$$

โดยที่ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครั้งหนึ่งได้  $\theta_H = 56^\circ$   $\theta_V = 84^\circ$

$$\begin{aligned} D_0 &= \frac{41253}{(56 \times 84)} = 8.767 \\ &= 10 \log 8.767 \\ &= 9.43 \text{ dBi} \end{aligned}$$

เนื่องจากสายอากาศเป็นแบบ 2 ทิศทางจึงต้องคิดค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ครึ่งหนึ่งของ แบบทิศทางเดียวและค่ากำลังครึ่งหนึ่งของสายอากาศมีค่า -3 dB ดังนั้นจะได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแบบสองทิศทาง คือ

$$D = D_0 - 3 \quad \text{dBi}$$

$$D = 6.43 \quad \text{dBi}$$

ประสิทธิภาพของสายอากาศจากสมการที่ 2.9

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{G}{D} \\ &= 93.49 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

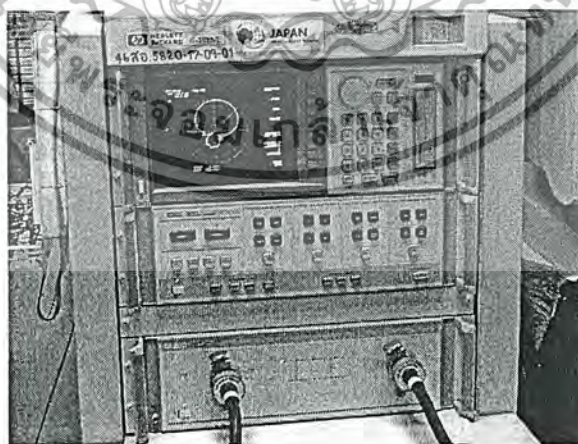
#### 4.3.5 การทดสอบโพลาไรซ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่

##### 4.3.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการโพลาไรซ์

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ( Network Analyzer ) ดังรูปที่ 4.16
2. สายนำสัญญาณ
3. ขาดังสำหรับการติดตั้งสายอากาศ 2 ตัว
4. เครื่อง Turn table สำหรับหมุนสายอากาศตัวรับ
5. สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่
6. สายอากาศไดโพล ( 1.8 GHz ) ดังรูปที่ 4.17

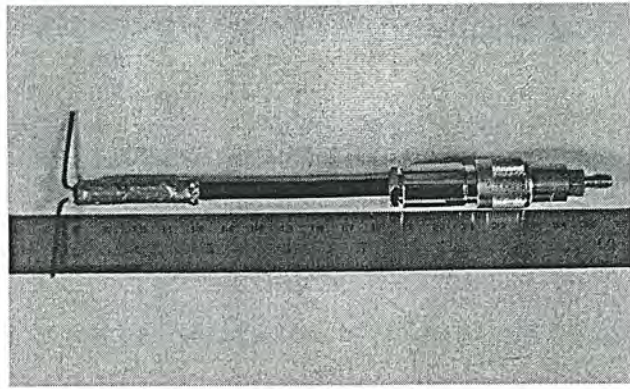
##### 4.3.5.2 วิธีการทดสอบ

1. ตั้งความถี่ให้กับเครื่อง Network Analyzer ซึ่งในการทดสอบจะวัดที่ความถี่ปฏิบัติการ 1.8 GHz และแถบความกว้างความถี่ (Band width) ที่ 1.6 GHz และ 2 GHz
2. ทำการจัดเตรียมเครื่องมือดังรูปที่ 4.18 โดยที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับต้องมากกว่า  $2D^2/\lambda$  โดยที่ D ขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศ
3. ทำการทดสอบโพลาไรซ์โดยการวางสายอากาศไดโพลในระนาบเดียวกับสายโพรบของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ ( Co - Polarization ) ดังรูปที่ 4.19
4. ทำการทดสอบโพลาไรซ์โดยการวางสายอากาศไดโพลเอียงทำมุม 90 องศา กับสายโพรบของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ ( Cross - Polarization ) ดังรูปที่ 4.20
5. นำค่าที่ทดสอบ ณ ความถี่เดียวกันมาทำการ normalize แล้วพล็อตค่าที่ได้ลงกราฟ



รูปที่ 4.16 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)

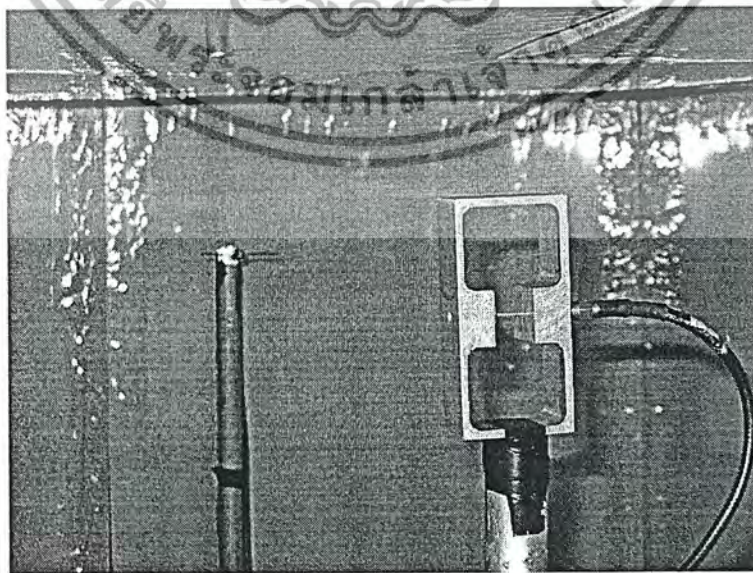
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สายอากาศส่งแบบไดโพล

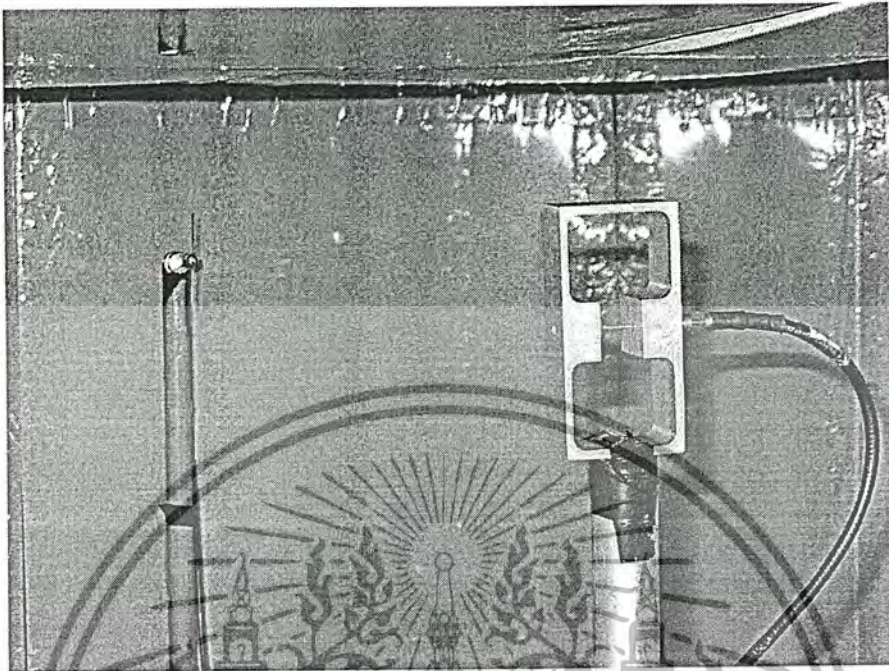


รูปที่ 4.18 การจัดเตรียมเครื่องมือในการทดสอบสายอากาศ



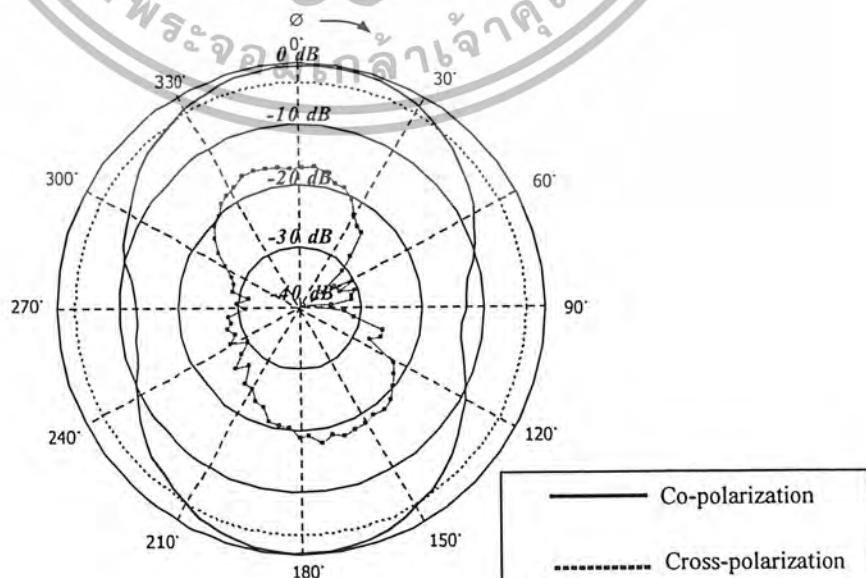
รูปที่ 4.19 การทดสอบการไหลไฟไร้สายแบบรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีฉุกเฉินเพื่อลดการเสียชีวิตเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



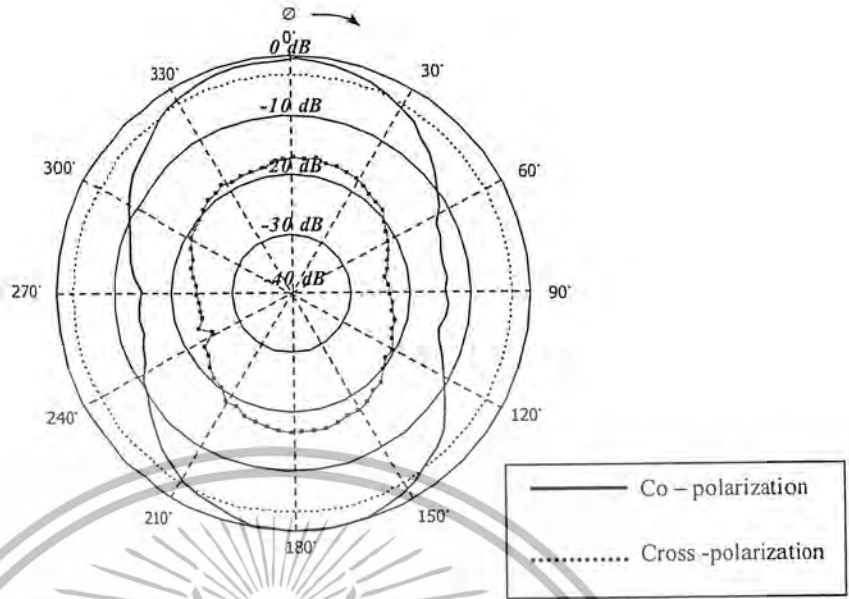
รูปที่ 4.20 การทดสอบโพลาไรซ์แบบไขว้

4.3.5.3 ผลการทดสอบการโพลาไรซ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ การทดสอบโพลาไรซ์จะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ 3 ความถี่ คือ 1.6 GHz 1.8 GHz และ 2 GHz ซึ่งเป็นช่วงกว้างแถบความถี่ใช้งาน (Band width) ซึ่งอยู่ในระดับที่ทำให้สายอากาศมีค่า VSWR ไม่เกิน 2 ตามมาตรฐานทางวิชาการ

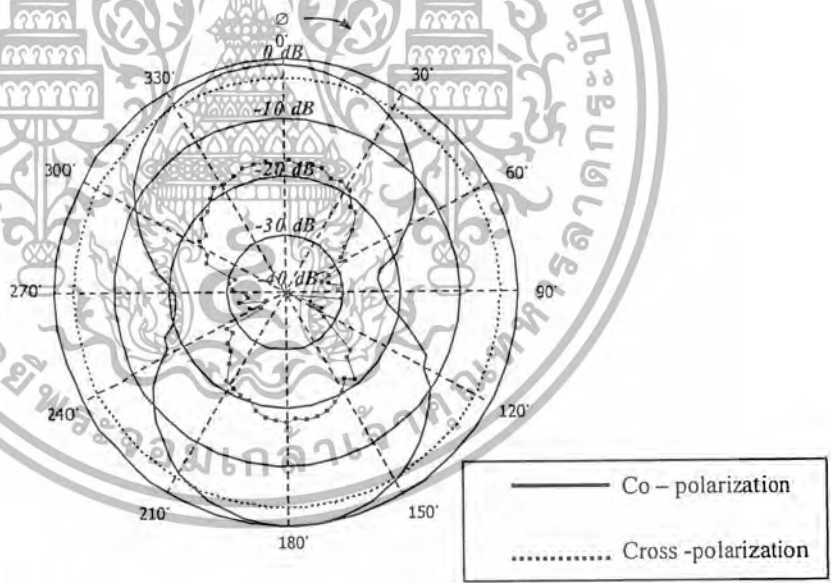


รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบการโพลาไรซ์ ที่ความถี่ 1.6 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบการโพลาไรซ์ ที่ความถี่ 1.8 GHz



รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบการโพลาไรซ์ ที่ความถี่ 2 GHz

จากรูปที่ 4.21 ถึง 4.23 จะแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยเปรียบเทียบกันระหว่างการตั้งสายอากาศตัวส่งให้อยู่ในลักษณะตามแนวโพรบ และ 90 องศา กับแนวแกนโพรบ เมื่อพิจารณาจากค่าคลื่นของทั้ง 3 ความถี่ พบว่ามีแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกัน โดยองค์ประกอบในทิศทางของสนามไฟฟ้า  $E_{\theta}$  (co-polarization) จะมากกว่า  $E_{\phi}$  (cross-polarization) อยู่มาก โดยจากการทดสอบที่ความถี่ 1.6 GHz 1.8 GHz และที่ความถี่ 2 GHz  $E_{\theta}$  จะมากกว่า  $E_{\phi}$  อยู่มากกว่า 15 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่กับสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากบทที่ 3 ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ผลซึ่งบ่งชี้ว่าสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่นี้มีช่วงกว้างแถบความถี่ใช้งาน (Bandwidth) ที่กว้างกว่า คุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศทั้งสองก็ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยในบทนี้ก็จะทำการสร้างสายอากาศขึ้นมาทดสอบจริงเพื่อแสดงผลคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศว่าเป็นจริงตามที่ได้วิเคราะห์มา

##### 4.4.1 การสร้างสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

###### 1. การเลือกขนาดของสายอากาศ

สายอากาศตัวนี้สร้างขึ้นเพื่อทำการเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่ ดังนั้นจึงสร้างในขนาดที่เท่ากันคือ

$$1.1 \text{ ความยาวท่อ } (a) = 0.539\lambda \text{ (9 cm)}$$

$$1.2 \text{ ความสูงของท่อ } (b) = 0.245\lambda \text{ (4.1 cm)}$$

$$1.3 \text{ ความกว้างของท่อ } (w) = 0.180\lambda \text{ (3 cm)}$$

$$1.4 \text{ ความถี่ใช้งาน} = 1.8 \text{ GHz}$$

###### 2. การเลือกวัสดุ

เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดก็ต่างมีคุณสมบัติในการนำสัญญาณที่ไม่เท่ากันดังนั้นทางผู้จัดทำจึงเลือกที่จะตัดปัญหาด้านนี้ออกไปโดยใช้วัสดุที่เหมือนกันคืออลูมิเนียม

###### 3. การเจาะรูใส่โพรบ

จะเจาะบริเวณตรงกลางท่อ เพราะจะมีสนามไฟฟ้าในโหมด TE<sub>10</sub> มากที่สุด



รูปที่ 4.24 สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การทดสอบคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

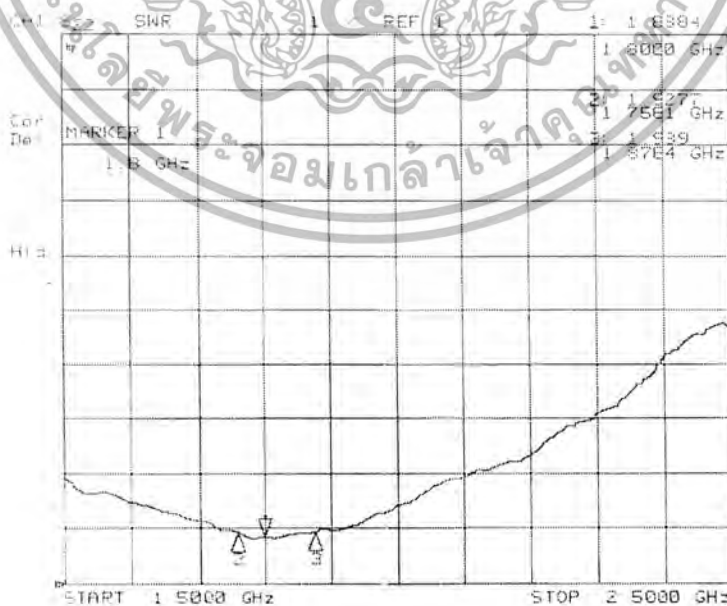
4.4.2.1 อุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)
2. สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า
3. เครื่อง Printer

4.4.2.2 ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการปรับสถานะเครื่อง Network Analyzer ให้เป็นแบบ 1 port (ทำการ calibration ไว้แล้วจึงทำการวัดค่าได้เลย)
2. นำสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาต่อกับเครื่อง Network Analyzer ที่ port s22
3. ทำการ แมทซ์สายอากาศโดยปรับแต่งสายโพรบ จนกว่าจะได้ค่า VSWR เข้าใกล้ 1.00 ให้มากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้
4. ทำการเลือก VSWR ,LOG MAG และ SMITH CHART แล้วทำการ Copy เพื่อพิมพ์ออกมา

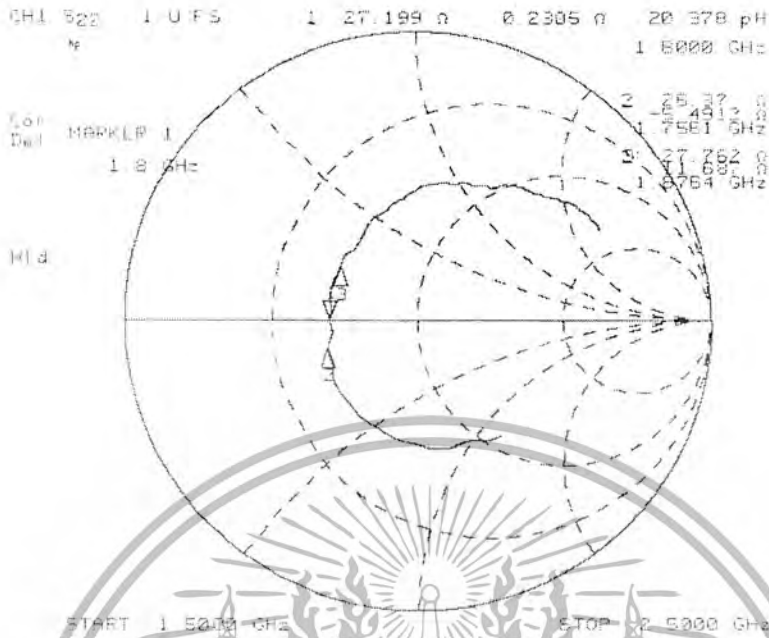
4.4.3 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ



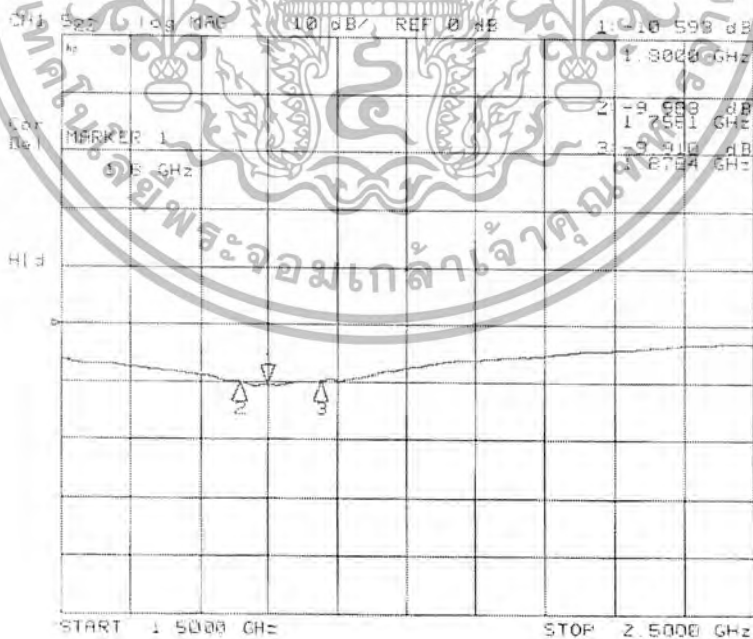
รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบสองทิศทางจาก

ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบสองทิศทาง จากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

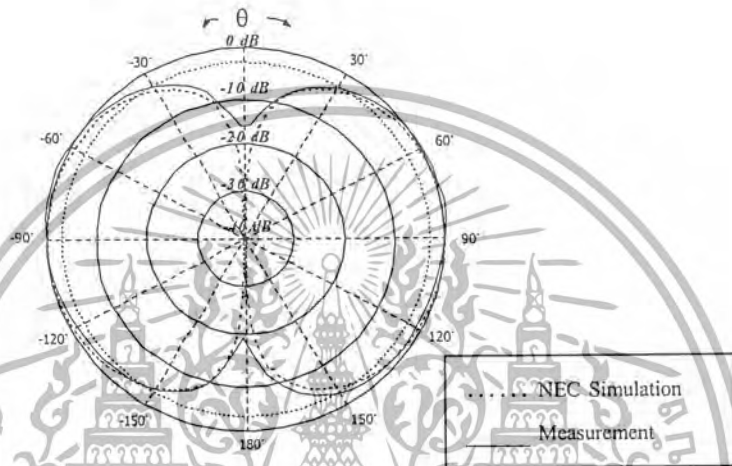


รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบสองทิศทาง จากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

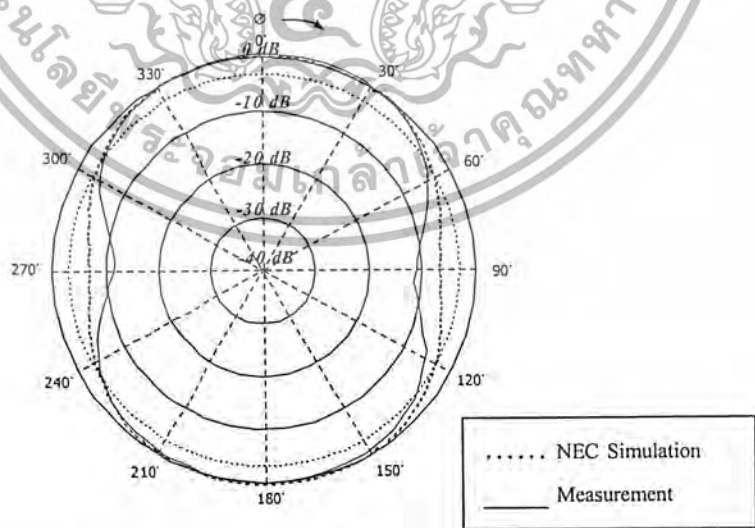
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่กับแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ปฏิบัติการ 1.8 GHz นั้นสามารถนำไปใช้งานได้ตามมาตรฐานทางวิชาการ (VSWR < 2) ทั้งสองตัว แต่ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่มีช่วงกว้างแถบความถี่ใช้งานมากกว่าแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาก ซึ่งท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีแถบความถี่ใช้งานที่แคบกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน

4.4.4 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ผลการทดสอบอัตราขยาย การคำนวณค่าสภาพเจาะจงทิศทางและการทดสอบโพลาริซชันของสายอากาศสองทิศทางแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า



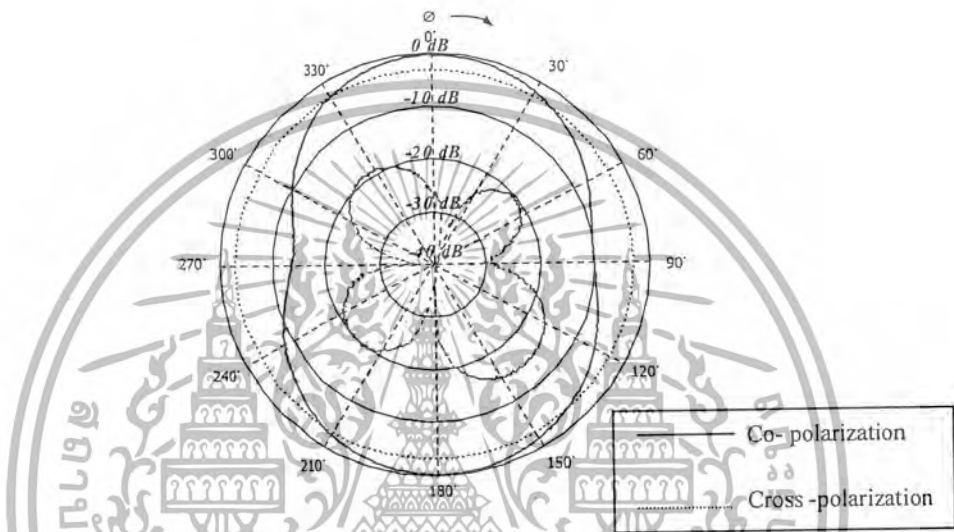
รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับการวิเคราะห์



รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าในระนาบสนามแม่เหล็กเทียบกับการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามารถแสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระหว่างการทดสอบและโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2D ในการทดสอบในระนาบสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.29 จะพบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง การแพร่กระจายคลื่นมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่ก็ยังคงมีความผิดพลาดเกิดขึ้นบ้างเนื่องจากผลการเลี้ยวเบนของคลื่นในกรอบสี่เหลี่ยมโลหะอีกเช่นเดียวกัน และในการทดสอบในระนาบสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 4.28 จะพบว่าความกว้างของลำคลื่นในสนามไฟฟ้าก็มีความใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบการโพลาไรซ์ ที่ความถี่ 1.8 GHz

จากรูปที่ 4.30 จะแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยเปรียบเทียบกันระหว่างการตั้งสายอากาศตัวส่งให้อยู่ในลักษณะตามแนวโพรบ และ 90 องศา กับแนวโพรบ เมื่อพิจารณาลำคลื่นที่มีความถี่ ปฏิบัติการ 1.8 GHz พบว่าแนวโน้มเป็นไปในลักษณะเดียวกันคือองค์ประกอบในทิศทางของสนามไฟฟ้า  $E_\theta$  จะมากกว่า  $E_\phi$  อยู่มากโดยจะมากกว่าอยู่ 20 dB สรุปผลจากการโพลาไรซ์ทั้งแบบที่นำคลื่นแบบรีดจ์คู่และที่นำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้นมีลักษณะการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น เพราะมีแบบรูปในแนวระนาบของ  $E_\theta$  เท่านั้นที่มีความแรงของคลื่นที่แพร่กระจายออกมาเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ  $E_\phi$  ก็ทำให้ประมาณได้ว่าผลจากการทดสอบของ  $E_\phi$  นั้นแทบจะไม่มีผลหรือมีผลที่ค่อนข้างน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $E_\theta$  นั่นเอง

**อัตราขยายของสายอากาศจากที่นำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า**

จากการทดสอบวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ค่าที่มีผลต่อการคำนวณดังนี้

$$L_r = 3.62dB \quad L_s = 6.75dB \quad L_t = 44.21dB \quad P_t = 0dBm$$

$$G_t = 6.14dBi \quad \text{และ} \quad P_r = -43.21dBm$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (4.2) จะได้

$$P_r = P_i + G_i + G_r - L_i - L_r - L_s$$

$$-43.21 = 0 + 6.14 + G_r - 3.62 - 6.75 - 44.21$$

$$G_r = 5.23 \text{ dBi}$$

การคำนวณสภาพเงาเงาของทิศทางของสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากสมการ(4.3)

โดยที่ค่าความกว้างลำคลื่นที่ค่าลดลงครึ่งหนึ่งได้  $\theta_H = 58^\circ$  และ  $\theta_V = 84^\circ$  จะได้

$$D_0 = \frac{41253}{58 \times 84} = 8.47 \text{ dBi}$$

$$= 10 \log 8.47$$

$$= 9.28 \text{ dBi}$$

จาก

$$D = D_0 - 3$$

$$D = 6.28 \text{ dBi}$$

ประสิทธิภาพของสายอากาศจากสมการที่ 2.9

$$\eta = \frac{G}{D}$$

$$= 78.4\%$$

4.4.5 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่กับแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

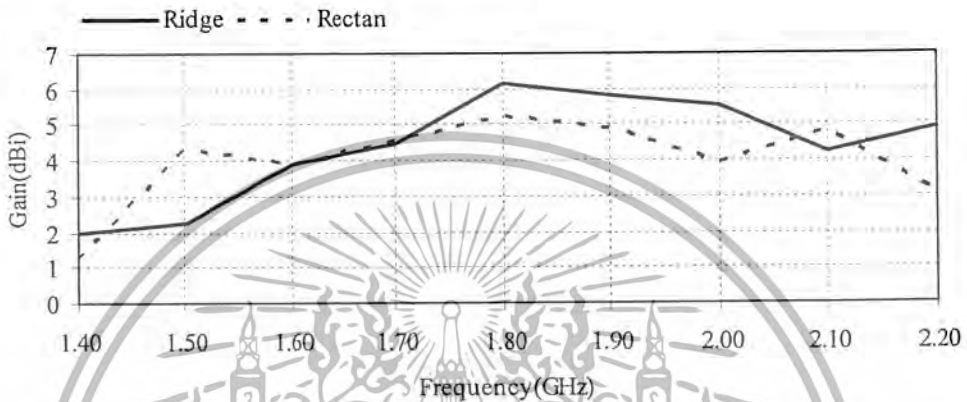
สรุปค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่กับสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ความถี่ปฏิบัติการ 1.8 GHz

ตารางที่ 4.1 ค่าการเปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่กับแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ผลการทดสอบ	SWR	Impedance ( $\Omega$ )	Returnloss (dB)	Bandwidth (%)	Directivity (dBi)	Efficiency (%)
สายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่	1.2136	49.061 + j9.5586	-20.308	21 %	6.43	94.4 %
สายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	1.834	27.19 + j0.23	-10.593	7.1 %	6.28	78.4 %

จากตารางที่ 4.1 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่ที่มีค่ามากกว่าท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะในการชี้ทิศทางที่ดีกว่า และยังสามารถส่งผลไปถึงประสิทธิภาพที่สูงกว่าอีกด้วย

และผลการทดสอบโดย Network Analyzer เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศ โดยเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 1.4 ถึง 2.2 GHz ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 การทดสอบอัตราขยายจากความถี่ 1.4 – 2.2 GHz

จากรูปที่ 4.31 จะได้ว่าสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่มีค่าอัตราขยายของสายอากาศในบริเวณแถบความถี่ใช้งานที่มากกว่าสายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งในบริเวณความถี่ปฏิบัติการ 1.8 GHz ค่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่ามากที่สุด โดยแบบริดจ์คู่มีค่าอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 6.14 dBi ส่วนแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากับ 5.23 dBi

#### 4.5 สรุป

บทนี้เป็นการสร้างและทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบริดจ์คู่ ในส่วนการสร้างได้นำผลขนาดและลักษณะต่าง ๆ จากการวิเคราะห์มาทำการสร้างและมีปัญหาในการแมตซ์ซึ่งอย่างมาก จึงทำการแมตซ์ซึ่งโดยการใส่เหรียญโลหะ (Excite by probe) บริเวณส่วนบนของโพรง ซึ่งถือเป็นเทคนิคในการแมตซ์สายอากาศแบบท่อนำคลื่นที่ได้ผลดีมาก ส่วนด้านการทดสอบเมื่อพิจารณาผลที่ได้จากคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ ทำให้ทราบว่าสายอากาศตัวนี้มีข้อดีที่เป็นจุดเด่นของสายอากาศเพราะช่วงกว้างแถบความถี่ใช้งานที่กว้างกว่าสายอากาศท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า อีกทั้ง คุณลักษณะพื้นฐานทางสายอากาศอื่น ๆ ก็ยังมีค่าที่แตกต่างจากสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั่วไป และการที่เพิ่มส่วนที่เป็นริดจ์เข้าไปก็ไม่ส่งผลต่อการโพลาไรซ์ คือมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นซึ่งพิจารณาจาก  $E_\theta$  จะมากกว่า  $E_\phi$  เกิน 20 dB ซึ่งทำให้ทราบว่าผลการทดสอบในระนาบ  $E_\theta$  แทบไม่มีผลความแรงของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อเทียบกับรูปแบบการแพร่กระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 คลื่นในระนาบ  $E_\theta$  ส่วนในการวิเคราะห์ก็ยังมีแนวโน้มที่สอดคล้อง  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

ในปฏิญยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเสนอสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ โครงการนี้จะทำการศึกษาคูณลักษณะของสายอากาศแบบบริดจ์คู่และสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งประกอบด้วยคุณลักษณะของแบบรูปของการแพร่กระจายคลื่น การโพลาไรซ์ และช่วงกว้างความถี่ใช้งาน เพื่อใช้สำหรับติดตั้งเป็นสายอากาศที่สถานีฐานสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย

#### 5.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม

โครงการสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่นี้จัดทำขึ้น เพื่อศึกษาสายอากาศที่สามารถใช้งานในแถบความถี่ใช้งานที่กว้าง โดยที่โครงสร้างของสายอากาศได้ถูกออกแบบให้มีลักษณะที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งการพิจารณาการออกแบบสายอากาศได้ยึดตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งมีอยู่ 5 ตัว ความกว้างของท่อนำคลื่น ( $a$ ) ค่าความยาวของบริดจ์ ( $b$ ) ค่าความกว้างของบริดจ์ ( $s$ ) ระยะห่างระหว่างบริดจ์ ( $d$ ) โดยตัวแปร 4 ตัวนี้ได้จากการออกแบบจากสมการ และความหนาของท่อนำคลื่น ( $w$ ) ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กทางไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2D ในการพิจารณาการสร้าง โดยพิจารณาจากคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ การแพร่กระจายคลื่น ค่ามุมที่สนามสูงสุด ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง ค่าความกว้างของลำคลื่นที่สนามเป็นศูนย์ครั้งแรก ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และการโพลาไรซ์ของสายอากาศเพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่เหมาะสมและดีที่สุด ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศ จึงจำเป็นต้องให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันมีค่าใกล้เคียง 1 และค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มีค่ามากที่สุดถึงคุณลักษณะในการใช้ทิศทางที่ดี โดยจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมจะนำมาสู่ผลการออกแบบสายอากาศท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่ ดังนี้คือ ด้านความกว้าง ( $a$ ) = 0.539λ (9 เซนติเมตร) ด้านความยาวของท่อ ( $b$ ) = 0.245λ (4.1 เซนติเมตร) ด้านความกว้างของบริดจ์ ( $s$ ) = 0.131λ (2.2 เซนติเมตร) และด้านความหนาของท่อ ( $d$ ) = 0.404λ (3 เซนติเมตร) เมื่อได้ขนาดจากการออกแบบก็นำไปสร้างโดยใช้อลูมิเนียม ซึ่งมีราคาถูกและค่าความนำไฟฟ้าค่อนข้างดี ( $3.98 \times 10^7 \text{ s/m}$ ) โดยทำงานที่ความถี่ปฏิบัติการ 1.8GHz ต่อจากนั้นก็เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนคือการแมตซ์สายอากาศโดยทางผู้จัดทำได้ทำการเจาะสายอากาศบริเวณตรงกลางโดยใช้สายโพรบที่เป็นทองแดงป้อนสัญญาณ และสายโพรบที่เป็นทองแดงหุ้มด้วยฉนวนที่เป็นโพลีเอทิลีนก็ไม่สามารถแมตซ์ได้ จนได้ใช้วัสดุที่เป็นเหรียญมาต่อที่บนสายโพรบจึงสามารถแมตซ์สายอากาศลงได้ซึ่งก็ทำให้ทราบว่าท่อนำคลื่นนั้นอาจจะประพฤติตัวเป็นค่าความเหนี่ยวนำ หรือค่าตัวเก็บประจุ เมื่อใส่เหรียญเข้าไปก็ทำให้เกิดการรีโซแนนท์ขึ้น ต่อจากนั้นจึงทำการทดสอบผลคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยายของสายอากาศ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และการโพลาไรซ์ โดยผลที่ได้เป็นไปในลักษณะเดียวกับการวิเคราะห์ คือสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่จะมีแถบความถี่ใช้งานที่กว้างซึ่งมากกว่า 20% มีคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศสามารถใช้งานได้ตามมาตรฐานทางวิชาการ มีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 6.14 dBi ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 6.43 dBi และสายอากาศมีประสิทธิภาพ 95.49%

จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์สร้างสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้มีขนาดเท่ากับสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ เพื่อทำการเปรียบเทียบถึงคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ ผลที่ได้คือสายอากาศตัวนี้มีแถบความถี่ใช้งานประมาณ 7% มีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 5.23 dB ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 6.28 dBi คุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศทั้งสองแบบเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วทำให้ทราบอีกว่านอกจากแถบความถี่ใช้งานที่มากกว่าแล้วยังมีค่าของค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อัตราขยายและประสิทธิภาพที่มีค่ามากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนอีกด้วย

นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบการ โพลารไรซ์ทำให้ทราบว่าทั้งท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่และท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีการโพลารไรซ์แบบเชิงเส้นซึ่งพิจารณาจาก  $E_{\theta}$  จะมากกว่า  $E_{\phi}$  เกิน 20 dB ซึ่งทำให้ผลการทดสอบในระนาบ  $E_{\phi}$  แทบไม่มีความแรงของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเลยเมื่อเทียบกับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $E_{\theta}$  ส่วนในการวิเคราะห์ก็ยังมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้เพียงพอเพื่อใช้สำหรับเป็นสายอากาศสถานีฐาน ซึ่งสายอากาศสองทิศทางนี้สามารถเพิ่มระยะทางระหว่างสถานีฐานได้ถึงสองเท่าเมื่อเทียบกับสายอากาศเดิมที่แพร่กระจายแบบรอบทิศทาง ดังนั้นจึงเป็นผลดีในการลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีฐานลงไปได้อย่างมากซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของศึกษาเพื่อสร้างสายอากาศสองทิศทางแบบรีดจ์คู่ขึ้นมา

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. ปัญหาที่ผู้จัดทำโครงงานพบ คือในด้านของเอกสารอ้างอิงเกี่ยวกับท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ยังมีให้ทำการศึกษาอีกมาก ซึ่งทางผู้จัดทำโครงงานพยายามรวบรวมเอกสารความรู้เท่าที่จะค้นคว้าได้เพื่อเป็นพื้นฐานเบื้องต้นของท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่ต่อไป
2. ในการออกแบบท่อนำคลื่นแบบรีดจ์คู่นั้นมีข้อดีที่เป็นจุดเด่นมากที่น่าสนใจนำมาออกแบบคือความกว้างของแถบความถี่ที่ใช้งาน ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศ ในช่วงความถี่ของย่านไมโครเวฟเหมาะที่จะนำมาเป็น โครงงานที่พัฒนาศึกษาต่อเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของท่อนำคลื่นให้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1 แสดงขนาดของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่และช่วงความถี่ที่ใช้งาน

Frequency Range (GHz)	$f_{c,10}$ (GHz)	$\lambda_{c,10}$ (in)	$f_{c,30}$ (GHz)	Dimensions in Inches						Attenuation (dB/ft)	
				$a$	$b$	$d$	$s$	$t$	$R_1$ (max)		$R_2$
Bandwidth 2.4:1											
0.175-0.42				29.607	13.795	5.863	7.417	—	—	1.173	
0.267-0.64				19.428	9.034	3.839	4.857	—	—	0.768	
0.42-1.0				12.333	5.737	2.437	3.083	0.125	0.050	0.487	
0.64-1.53				8.100	3.767	1.601	2.025	0.125	0.050	0.320	
0.84-2.0				6.167	2.868	1.219	1.542	0.125	0.050	0.244	
1.5-3.6				3.455	1.607	0.683	0.864	0.080	0.050	0.137	
2.0-4.8				2.590	1.205	0.512	0.648	0.080	0.050	0.102	
3.5-8.2				1.480	0.688	0.292	0.370	0.064	0.030	0.058	
4.75-11.0				1.090	0.506	0.215	0.272	0.050	0.030	0.043	
7.5-18.0				0.691	0.324	0.136	0.173	0.050	0.020	0.027	
11.0-26.5 <sup>1</sup>				0.471	0.219	0.093	0.118	0.040	0.015	0.019	
18.0-40.0 <sup>1</sup>				0.288	0.134	0.057	0.072	0.040	0.015	0.011	
Bandwidth 3.6:1											
0.108-0.39	0.092	128.37	0.401	34.638	14.894	2.901	8.660	—	—	0.581	0.0014
0.27-0.97	0.229	51.572	0.999	13.916	5.984	1.167	3.479	—	—	0.233	0.0055
0.39-1.4	0.331	35.680	1.344	9.628	4.140	0.807	2.407	0.125	0.050	0.161	0.0097
0.97-3.5	0.822	14.367	3.587	3.877	1.667	0.325	0.969	0.080	0.050	0.065	0.0378
1.4-5.0	1.186	9.958	5.176	2.687	1.155	0.225	0.672	0.080	0.050	0.045	0.0656
3.5-12.4	2.966	3.982	12.944	1.074	0.462	0.090	0.269	0.050	0.030	0.018	0.259
5.0-18.0	4.237	2.787	18.490	0.752	0.323	0.063	0.188	0.050	0.020	0.013	0.443
12.4-40.0 <sup>1</sup>	10.508	1.124	45.857	0.303	0.130	0.025	0.076	0.040	0.015	0.005	1.730



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตาราง ก-2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ

ค่าความนำของฉนวน สารกึ่งตัวนำ  $6.1 \times 10^7$  นำ และ ตัวนำ

วัสดุ	ชนิด	ความนำ $\sigma$ (S/m)
กำมะถัน	ฉนวน	$10^{-15}$
ไมกา	ฉนวน	$10^{-15}$
พาราฟิน	ฉนวน	$10^{-15}$
ยางแข็ง	ฉนวน	$10^{-15}$
แก้ว	ฉนวน	$10^{-12}$
น้ำกลั่น	ฉนวน	$10^{-4}$
ซิลิกาหลอม *	สารกึ่งตัวนำ	$2.1 \times 10^{-4}$
ดินแห้ง	สารกึ่งตัวนำ	$10^{-4} - 10^{-3}$
ดินเปียก	สารกึ่งตัวนำ	$10^{-3} - 10^{-2}$
น้ำบริสุทธิ์	สารกึ่งตัวนำ	$10^{-2}$
น้ำทะเล	ตัวนำ	4
คาร์บอน	ตัวนำ	$3 \times 10^4$
กราไฟต์	ตัวนำ	$3 \times 10^4$
เหล็กหล่อ	ตัวนำ	$10^6$
ปรอท	ตัวนำ	$10^6$
นิโครม	ตัวนำ	$10^6$
เหล็กกล้าซิลิกอน	ตัวนำ	$2 \times 10^6$
ตะกั่ว	ตัวนำ	$5 \times 10^6$
ดีบุก	ตัวนำ	$9 \times 10^6$
เหล็ก	ตัวนำ	$1.03 \times 10^7$
นิกเกิล	ตัวนำ	$1.45 \times 10^7$
สังกะสี	ตัวนำ	$1.7 \times 10^7$
ทังสเตน	ตัวนำ	$1.83 \times 10^7$
ทองเหลือง	ตัวนำ	$2.56 \times 10^7$
อลูมิเนียม	ตัวนำ	$3.96 \times 10^7$
ทองคำ	ตัวนำ	$4.1 \times 10^7$
ทองแดง	ตัวนำ	$5.76 \times 10^7$
เงิน	ตัวนำ	$6.1 \times 10^7$

\* สำหรับสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่ค่าความนำจะแสดงที่ความถี่ประมาณ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศแห่งชาติ ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข - 1

## อนุพันธ์เวกเตอร์

ระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinates (x,y,z))

$$\bar{A} = A_x \hat{a}_x + A_y \hat{a}_y + A_z \hat{a}_z$$

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} \hat{a}_x + \frac{\partial V}{\partial y} \hat{a}_y + \frac{\partial V}{\partial z} \hat{a}_z$$

$$\nabla \cdot \bar{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$$\nabla \times \bar{A} = \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix}$$

$$= \left[ \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right] \hat{a}_x + \left[ \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right] \hat{a}_y + \left[ \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right] \hat{a}_z$$

$$\nabla^2 A = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข - 2

## สมการของแมกเวลล์ที่แสดงในรูปอินทิเกรต

Faraday's Law :

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

- เป็นความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับฟลักซ์ของสนามแม่เหล็ก

Gauss's Law :

$$\iint_A \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon} \iiint_V \rho ds, \quad \iint_A \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iiint_V \rho dv$$

- สนามแม่เหล็กในตัวกลางเกิดจากประจุไฟฟ้า

Magnetic equivalent of Gauss's Law :

$$\varphi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

- ไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้นในพื้นที่ปิดใดๆ

Amper's Law

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \iint_A \vec{J}_c \cdot d\vec{s}, \quad \oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{s}$$

- ใช้หาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ผิว

สมการของแมกเวลล์ในไดอิเล็กตริก

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{CURL}(E) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu(\vec{J}_c + \vec{J}_D)$$

$$\text{CURL}(H) = \vec{J}_c + \vec{J}_D$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\text{DIV } \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\text{DIV } \vec{B} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ ( Divergence Theorem )

$$\oiint_A \vec{F} \cdot d\vec{s} = \iiint_V \nabla \cdot \vec{F} dv$$

ทฤษฎีของสโตกส์ ( Stoke Theorem )

$$\oint_c \vec{F} \cdot d\vec{l} = \iint_A \nabla \times \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

หมายเหตุ

1. เราใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์และทฤษฎีของสโตกส์ในการแปลงสมการแมกเวลล์ในรูปอินทิเกรทให้อยู่ในรูปอนุพันธ์นิยมใช้สมการในรูปอนุพันธ์มากกว่าเพราะแปลงสูตรง่ายกว่า
2. กรณีที่ตัวกลางเป็นไดอิเล็กทริก รวมทั้งสูญญากาศ  $\rho = 0$  และ  $J = 0$  สมการของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะสลับที่กันได้



## ภาคผนวก ข-3

## สมการคลื่น

สำหรับการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางชนิดเชิงเส้น เอกพันธ์ และไอโซทรอปิก เมื่อพิจารณาในตัวกลางเหล่านี้จะพบว่าภายในตัวกลางเหล่านี้จะไม่มีประจุอิสระ ( $\rho = 0$ ) อยู่เลย และถ้าสมมติให้มีกระแสหนา  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$  ไหลอยู่บ้าง นั่นคือสมการของแมกซ์เวลล์จะสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{ข.1})$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (\text{ข.2})$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (\text{ข.3})$$

และ

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (\text{ข.4})$$

เพราะว่าเคิร์ลของสมการ (ข.2) จะได้

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial (\nabla \times \vec{H})}{\partial t} \quad (\text{ข.5})$$

เมื่อแทนสมการ (ข.1) ใน (ข.5) จะได้

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \vec{E} &= -\mu \left[ \frac{\partial}{\partial t} \left( \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \right] \\ &= -\mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (\text{ข.6})$$

ในทำนองเดียวกัน เคิร์ลของสมการ (ข.1) จะเขียนได้เป็น

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = -\mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (\text{ข.7})$$

จากเอกลักษณ์เวกเตอร์พบว่า

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (\text{ข.8})$$

เมื่อ  $\nabla^2 \vec{A}$  เป็นเวกเตอร์ลาปลาเซียน (Vector Laplacian) สำหรับในระบบของพิกัดคาร์ทีเซียนนั้น เวกเตอร์ลาปลาเซียนจะเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla^2 \bar{A} = \nabla^2 A_x \hat{a}_x + \nabla^2 A_y \hat{a}_y + \nabla^2 A_z \hat{a}_z \quad (\text{ข.9})$$

และปริมาณสเกลาร์ลาปลาเซียนของแต่ละองค์ประกอบ เช่น  $\nabla^2 A_x$  จะเขียนได้เป็น

$$\nabla^2 A_x = \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} \quad (\text{ข.10})$$

จากสมการ (2.8) ถ้าเวกเตอร์  $A$  เป็นสนามเวกเตอร์ภายในตัวกลางนี้ จากสมการ (ข.3) และ (ข.4) จะพบว่าไดเวอร์เจนซ์ของสนามเวกเตอร์ในตัวกลางนี้ ( $\nabla \cdot E = \nabla \cdot H = 0$ ) จะเป็นศูนย์นั่นคือสมการ (ข.8) จะกลายเป็น

$$\nabla \times \nabla \times \bar{A} = -\nabla^2 \bar{A}$$

จากสมการ (ข.11) จะสามารถเขียนสมการ (ข.6) และ (ข.7) ได้ใหม่เป็น

$$\nabla^2 \bar{E} = \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (\text{ข.12})$$

และ

$$\nabla^2 \bar{H} = \mu\sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (\text{ข.13})$$

สมการเวกเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียลอันดับสองในสมการ (ข.12) และ (ข.13) นี้จะเรียกว่า สมการคลื่น โดยแต่ละสมการจะมีองค์ประกอบตามสมการ (ข.9) สำหรับองค์ประกอบของเวกเตอร์ลาปลาเซียนในแนวแกน  $x$  คือ  $\nabla^2 E_x$  ของสมการ (ข.12) จะเขียนได้เป็น

$$\nabla^2 E_x = \mu\sigma \frac{\partial E_x}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \quad (\text{ข.14})$$

ในทำนองเดียวกัน องค์ประกอบ  $\nabla^2 E_y$  และ  $\nabla^2 E_z$  ของสมการ (ข.12) และองค์ประกอบของเวกเตอร์ลาปลาเซียนทั้งสามของสมการ (2.13) จะมีรูปแบบสมการเช่นเดียวกับสมการ (ข.14) และจากสมการ (ข.12) จะเขียนสมการคลื่นในรูปของสนามเฟสเซอร์ได้เป็น

$$\begin{aligned} \nabla^2 \bar{E} &= \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \\ &= \mu\sigma(j\omega)\bar{E} + \mu\epsilon(j\omega)^2 \bar{E} \\ &= j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)\bar{E} \end{aligned} \quad (\text{ข.15})$$

ในทำนองเดียวกัน สมการคลื่นในสมการ (ข.13) จะเขียนอยู่ในรูปของสนามเฟสเซอร์ได้เป็น  
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla^2 \bar{H} = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\bar{H} \quad (ข.16)$$

จากสมการ (ข.15) และ (ข.16) กำหนดให้สัญลักษณ์  $\gamma^2$  เป็นปริมาณของ  $j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)$  นั่นคือ

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \quad (ข.17)$$

สำหรับค่าบวกของรากกำลังสองของ  $\gamma^2$  และ  $\gamma$  นั้นจะเรียกว่าเป็นค่าคงตัวการแพร่กระจาย (Propagation Constant) ของตัวกลาง และจากสมการ (ข.17) จะพบว่าค่าคงตัวการแพร่กระจายจะเป็นปริมาณเชิงซ้อนสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \gamma &= \alpha + j\beta \\ &= \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} \end{aligned} \quad (ข.18)$$

จากสมการ (ข.17) และ (ข.18) จะได้

$$\begin{aligned} (\alpha + j\beta)^2 &= j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon \\ (\alpha^2 - \beta^2) + j2\alpha\beta &= j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon \end{aligned} \quad (ข.19)$$

จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของปริมาณเชิงซ้อนของสมการ (ข.19) จะได้เป็น

$$\alpha^2 - \beta^2 = -\omega^2\mu\varepsilon \quad (ข.20)$$

และ

$$2\alpha\beta = \omega\mu\sigma \quad (ข.21)$$

นั่นคือเมื่อแทนฟังก์ชันของ  $\beta$  จากสมการ (ข.21) ลงในสมการ (ข.20) จะได้

$$\alpha^2 - \left(\frac{\omega\mu\sigma}{2\alpha}\right)^2 = -\omega^2\mu\varepsilon$$

หรือ

$$\alpha^4 + \alpha^2(\omega^2\mu\varepsilon) - \left(\frac{\omega\mu\sigma}{2}\right)^2 = 0$$

และ

$$\left[\alpha^2 + \left(\frac{\omega^2\mu\varepsilon}{2}\right)\right]^2 = \left(\frac{\omega^2\mu\varepsilon}{2}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2\right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น 
$$\alpha^2 + \frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2} = \frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2}$$

นั่นคือ 
$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad (\text{Np/m}) \tag{ข.22}$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อแทนฟังก์ชันของ  $\alpha$  จากสมการ (ข.21) ลงในสมการ (ข.20) จะได้

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} + 1 \right)} \quad (\text{rad/m}) \tag{ข.23}$$

เมื่อ  $\alpha$  และ  $\beta$  นั้นจะเป็นค่าคงตัวลดทอน (Attenuation Constant) และค่าคงตัวเฟส (Phase Constant) ตามลำดับ จากสมการ (ข.15) (ข.16) และ (ข.10) จะเขียนสมการคลื่นของสนามเฟสเซอร์ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \gamma^2 E_x \tag{ข.24}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = \gamma^2 E_y \tag{ข.25}$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} = \gamma^2 E_z \tag{ข.26}$$

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} = \gamma^2 H_x \tag{ข.27}$$

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} = \gamma^2 H_y \tag{ข.28}$$

และ 
$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} = \gamma^2 H_z \tag{2.29}$$

นั่นคือจากสมการ (2.24) ถึง (2.26) จะเขียนได้เป็น

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\vec{E} = E_x \hat{a}_x + E_y \hat{a}_y + E_z \hat{a}_z$  เป็นสนามเวกเตอร์เฟสเซอร์  
 ในทำนองเดียวกันจากสมการ (ข.27) ถึง (ข.29) จะเขียนได้เป็น

$$\nabla^2 \vec{H} - \gamma^2 \vec{H} = 0 \quad (\text{ข.31})$$

สมการคลื่นในสมการ (ข.30) และ (ข.31) จะเรียกว่า สมการเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz Equation)  
 สำหรับตัวกลางชนิดเชิงเส้น เอกพันธ์และไอโซทรอปิก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข-4

## (ก) โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ NEC2 เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการแห่งชาติลอเรนซ์ลิเวอร์มอร์ (Lawrence Livermore National Laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกา และเป็นโปรแกรมประเภทฟรีแวร์ (Freeware) ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลด (Download) ใช้ได้โดยง่าย การจะสั่งให้โปรแกรมทำงานนั้นผู้ใช้จะต้องจัดเรียงรหัสทางคอมพิวเตอร์ (User-Oriented Computer Code) ให้กับโปรแกรมเพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศและโครงสร้างที่เป็นโลหะใด ๆ ที่มีรูปทรงไม่เจาะจง รหัสทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมที่ผู้ใช้จะต้องใส่เข้าไปนั้น คือ การสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นลวดเล็ก ๆ (Wire) หรือ พื้นผิว (Surface) จำนวนมาก ซึ่งในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยเส้นลวด โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (Electric Field Integral Equation:EFIE) ในการหากระแสเหนี่ยวนำ (Induced Current) บนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด (Source) หรือ สนามที่ตกกระทบ (Incident Field) และในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยพื้นผิว โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Integral Equation:MFIE) ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ การกระตุ้นสามารถที่จะเป็นได้ทั้งแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป (Applied Voltage Source) หรือ คลื่นระนาบที่ตกกระทบ (Incident Plane Wave) NEC2 สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระยะใกล้และไกล ภาคตัดขวางเป็นเรดาร์ (Radar Cross Section:RCS) อิมพีแดนซ์แอดมิตแตนซ์ (Admittance) อัตราขยาย (Gain) และสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) การใช้กำลังงาน (Power Budget) และการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ (Mutual Coupling)

สำหรับสายอากาศที่นำเสนอในปฏิญญาฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของสายอากาศ โดยการแทนโครงสร้างของสายอากาศด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก ดังนั้น สมการที่ใช้จึงเป็นสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้านี้เหมาะที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก มีพื้นผิวที่มีความหนาไม่มาก และไม่มีลักษณะเป็นตัวนำแผ่นที่บดบังกว่าการใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็กในรูปแบบของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่ใช้ในNECมีรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

## (ข) สมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าในอวกาศว่าง

รูปแบบของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่ใช้ใน NEC2 สำหรับสนามไฟฟ้าของการกระจายกระแส  $J$  คือ

$$\bar{E}(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_V \bar{J}(\bar{r}') \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') dV' \quad 1$$

เมื่อ

$$\bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') = (k^2 \bar{I} + \nabla \nabla) g(\bar{r}, \bar{r}')$$

$$g(\bar{r}, \bar{r}') = \exp(-jk|\bar{r} - \bar{r}'|) / |\bar{r} - \bar{r}'|$$

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

$$\eta = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$$

และแบบแผนทางเวลา (Time Convention) คือ  $\exp(j\omega t) \bar{I}$  คือเอกลักษณ์คู่ (Identity Dyad)  $\hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y} + \hat{z}\hat{z}$  เมื่อการกระจายกระแสถูกจำกัดให้อยู่บนพื้นผิวของตัวนำที่มีค่าความนำสมบรูณ์ สมการที่ 1 จะเป็น

$$\bar{E}(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_S \bar{J}_s(\bar{r}') \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') dA' \quad 2$$

เมื่อ  $\bar{J}_s$  เป็นความหนาแน่นกระแสที่ถูกจำกัดกระแสพื้นผิว จุดสังเกต  $\bar{r}$  จะถูกกำหนดให้อยู่บนพื้นผิว  $S$  ดังนั้น  $\bar{r} \neq \bar{r}'$

ถ้า  $\bar{r}$  เข้าใกล้  $S$  ในลักษณะคล้ายลิมิต สมการ 2 จะเป็น

$$\bar{E}(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_S \bar{J}_s(\bar{r}') \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') dA' \quad 3$$

เมื่ออินทิกรัลค่าหลัก  $\int$  ถูกใช้เพราะว่า  $g(\bar{r}, \bar{r}')$  ไม่จำกัดขอบเขต

สมการอินทิกรัลของกระแสเหนี่ยวนำบน  $S$  โดยสนามตกกระทบ  $\bar{E}'$  สามารถหาได้จาก สมการที่ 3 และเงื่อนไขขอบเขตสำหรับ  $\bar{r}$  ที่แปลผันตาม  $S$

$$\hat{n}(\bar{r}) \times [\bar{E}^s(\bar{r}) + \bar{E}'(\bar{r})] = 0 \quad 4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\hat{n}(\vec{r})$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับพื้นที่  $\vec{r}$  และ  $\vec{E}'$  เป็นสนามเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำ  $\vec{J}_s$  เมื่อแทนค่า  $\vec{E}'$  ในสมการที่ 4 ด้วยสมการที่ 3 สามารถเขียนสมการ 3 ได้เป็น

$$-\hat{n}(\vec{r}) \times \vec{E}'(\vec{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \hat{n}(\vec{r}) \int_s \vec{J}_s(\vec{r}') \cdot (k^2 \vec{I} + \nabla \nabla) g(\vec{r}, \vec{r}') dA' \quad 5$$

สมการอินทิกรัลเวกเตอร์ในสมการที่ 5 สามารถถูกลดให้กลายเป็นสมการอินทิกรัลเชิงสเกลาร์เมื่อพื้นผิวตัวนำ S ถูกแทนที่ด้วย เส้นลวดทรงกระบอกบาง ๆ ซึ่งจะทำให้วิธีการแก้ปัญหาง่ายขึ้นมาก การสมมติที่ประยุกต์ใช้กับเส้นลวดบาง เรียกว่า วิธีการประมาณเส้นลวดบาง (Thin-Wire Approximation) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- (1) กระแสตามขวางที่สัมพันธ์กับกระแสตามแกน ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
- (2) การเปลี่ยนแปลงโดยรอบในกระแสตามแกน ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
- (3) กระแสสามารถแทนได้ด้วยกระแสมวลเชิงเส้น (Filament) บนแกนเส้นลวด
- (4) เงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้าจะถูกบังคับให้มีเฉพาะในทิศทางตามแนวแกนเท่านั้น

การประมาณนี้สามารถนำมาใช้ได้เมื่อ รัศมีของเส้นลวดมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่น และความยาวเส้นลวดมีค่ามาก ๆ นอกจากนี้ สมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปในกรณีที่รัศมีของเส้นลวดมีขนาดใหญ่มาก จนไม่สามารถใช้วิธีการประมาณเส้นลวดบางได้นั้น ก็ได้ถูกรวมไว้ใน NEC2 ด้วย ซึ่งการประมาณแบบนี้ มีชื่อเรียกว่า การขยายออกของการประมาณเส้นลวดบาง (Extended Thin Wire Approximation)

จากการสมมติในข้อ (1) (2) และ (3) กระแสพื้นผิว  $\vec{J}_s(\vec{r})$  บนเส้นลวดที่มีรัศมี  $a$  สามารถแทนด้วยกระแสของเชิงเส้น (Filament Current)  $I$  เมื่อ

$$I(\vec{s}) \hat{s} = 2\pi a \vec{J}_s(\vec{r})$$

เมื่อ

$\vec{s}$  = ระยะทางตามแกนเส้นลวดที่  $\vec{r}$  และ

$\hat{s}$  = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับแกนเส้นลวดที่  $\vec{r}$  สมการ (2.9) จะกลายเป็น

$$-\hat{n}(\vec{r}) \times \vec{E}'(\vec{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \hat{n}(\vec{r}) \int_L I(\vec{s}') \cdot \left( k^2 \hat{s}' + \nabla \frac{\partial}{\partial s'} \right) g(\vec{r}, \vec{r}') dS' \quad 6$$

เมื่อการอินทิเกรตกระทำตามความยาวของเส้นลวดการบังคับเงื่อนไขขอบเขตให้มีเฉพาะทิศทางในแนวแกน ทำให้สมการ (2.10) ลดรูปลงเป็นสมการสเกลาร์

$$-\hat{s}(\vec{r}) \times \vec{E}'(\vec{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_L I(\vec{s}') \cdot \left( k^2 \hat{s}' + \nabla \frac{\partial}{\partial s'} \right) g(\vec{r}, \vec{r}') dS' \quad 7$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเชิงวิชาการและการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$r'$  เป็นจุดที่  $s'$  บนแกนเส้นลวด ในขณะที่  $r$  เป็นจุดที่  $s$  บนพื้นผิวเส้นลวด  $|r - r'| \geq a$  และ การอินทิเกรตก็จะมีขอบเขต

(ก) วิธีการแก้ปัญหาเชิงเลขในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

สมการอินทิกรัล (7) จะสามารถหาคำตอบใน NEC2 ได้โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงเลขของวิธีเชิงโมเมนต์ สำหรับในหัวข้อนี้นั้นจะกล่าวถึง รายละเอียดของฟังก์ชันฐานและฟังก์ชันให้น้ำหนักของวิธีเชิงโมเมนต์ที่ใช้ใน NEC2

ใน NEC2 ฟังก์ชันฐานและฟังก์ชันให้น้ำหนักที่ใช้จะแตกต่างกัน ฟังก์ชันให้น้ำหนัก  $w_j$  จะเป็นฟังก์ชันเดลตา (Delta Function) ที่มีรูปแบบสมการ คือ

$$w_j(\bar{r}) = \delta(\bar{r} - \bar{r}_j)$$

เมื่อ  $\{r_j\}$  เป็นเซตของจุดบนพื้นผิวด้านผลัดผิวที่เป็นจุดการซิกตัวอย่าง (Sampling) ของสมการอินทิกรัล รู้จักกันในชื่อ วิธีวางร่วมตำแหน่ง (Collocation Method) ของการแก้ปัญหา เส้นลวดจะถูกแบ่งเป็นเซกเมนต์ (Segment) เส้นตรงสั้น ๆ ที่มีจุดซิกตัวอย่างอยู่ที่ตรงกลางของแต่ละเซกเมนต์ฟังก์ชันฐานหรือฟังก์ชันของกระแสบนแต่ละเซกเมนต์อยู่ในรูปผลรวมของ 3 องค์ประกอบ คือ ค่าคงที่ ค่าไซน์ และค่าโคไซน์ ซึ่งการเลือกกระแสแบบนี้จะทำให้การลู่ออกของการแก้ปัญหาเร็วขึ้น

และกระแสไซน์ขอยังสามารถวิเคราะห์ได้ง่ายในรูปแบบสำเร็จ (Closed Form) แอมพลิจูดของค่าคงที่ ค่าไซน์ และโคไซน์ จะมีความเกี่ยวข้องกับผลรวมของแอมพลิจูดชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะต้องเหมาะสมกับเงื่อนไขทางกายภาพของพฤติกรรมของกระแสและประจุที่ปลายของเซกเมนต์ การเมตซ์ที่ปลายของแต่ละเซกเมนต์ จะช่วยปรับปรุงให้วิธีการแก้ปัญหาแม่นยำขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่จุดต่อที่มีความยาวแต่ละเซกเมนต์ไม่เท่ากัน

กระแสทั้งหมดบนเซกเมนต์หมายเลข  $j$  ใน NEC2 จะมีรูปแบบ คือ

$$I_j(s) = A_j + B_j \sin k(s - s_j) + C_j \cos k(s - s_j) \quad 8$$

$$|s - s_j| < \Delta_j/2$$

(ง) วิธีการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

สำหรับการจำลองโครงสร้างด้วยเส้นลวดนั้น อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างด้วยรหัส NEC2 คือ เซกเมนต์ที่มีลักษณะตรงและสั้น การกำหนดเซกเมนต์สำหรับการออกแบบเป็นขั้นตอน

ที่สำคัญมากเพราะจะมีผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์จำนวนของเซกเมนต์ควรจะมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการสำหรับความถูกต้องเพราะ โปรแกรมจะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนเซกเมนต์เพิ่มขึ้น

เซกเมนต์เส้นลวดจะถูกกำหนด โดยระบบพิกัด (Co-ordinate) ของจุดปลายทั้งสองของเซกเมนต์ และขนาดของรัศมี การกำหนดความยาวเซกเมนต์ (Segment Length :  $\Delta$ ) จะสัมพันธ์กับค่าของความยาวคลื่น  $\lambda$  โดยปกติ  $\Delta$  ควรจะมีค่าน้อยกว่า  $0.1\lambda$  ที่ความถี่ที่ต้องการ ในบางครั้งอาจมีการใช้เซกเมนต์ที่ยาวมากกว่านี้บนเส้นลวดยาวที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ในขณะที่เซกเมนต์ที่สั้นกว่า เช่น  $0.05\lambda$  หรือน้อยกว่านี้ อาจจะต้องใช้ในการจำลองบริเวณที่มีความสำคัญของสายอากาศ ขนาดของเซกเมนต์จะเป็นตัวกำหนดการแก้ปัญหาสำหรับการหากระแสบนแบบจำลอง เนื่องจากกระแสถูกกำหนดที่ตรงกลางของแต่ละเซกเมนต์ เซกเมนต์ที่มีขนาดสั้นมาก ๆ เช่น น้อยกว่า  $10^{-3}\lambda$  ไม่ควรนำมาใช้ เพราะความเหมือนกันขององค์ประกอบค่าคงที่และโคไซน์ของการกระจายกระแสจะทำให้ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขไม่แม่นยำ

รัศมีของเส้นลวด (Wire Radius:  $a$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับ  $\lambda$  จะถูกจำกัดโดยการประมาณที่ใช้ในเคอร์เนล (Kernel) ของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งมีการประมาณ 2 แบบด้วยกันที่ใช้ในการ NEC2 คือ เคอร์เนลแบบเส้นลวดบาง และเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดแบบบาง ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.1 สำหรับเคอร์เนลแบบเส้นลวดบางนั้น กระแสบนพื้นผิวของแต่ละเซกเมนต์จะถูกลดกลายเป็นเส้นลวดนำไฟฟ้าเล็ก ๆ ของกระแสบนแกนเซกเมนต์ ส่วนในเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบางกระแสจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอรอบพื้นผิวของเซกเมนต์นั้น

การกระจายกระแสที่ใช้ใน NEC2 จะบังคับเงื่อนไขกระแสและความหนาแน่นประจุตามแนวเส้นลวด จากเงื่อนไขเหล่านี้ทำให้เซกเมนต์จะต้องต่อกันทางไฟฟ้าที่จุดปลาย ถ้าเซกเมนต์มีการซ้อนทับกันเกิดขึ้นที่ปลายของแต่ละอัน NEC2 จะไม่ยอมให้กระแสไหลจากเซกเมนต์หนึ่งไปยังเซกเมนต์อื่น ๆ เซกเมนต์จะเหมือนกับต่อกันเมื่อระยะห่างของจุดปลายของแต่ละด้านมีค่าน้อยกว่า  $10^{-3}$  เท่าของความยาวเซกเมนต์ที่สั้นที่สุด ดังนั้น ถ้าเป็นไปได้ควรเชื่อมต่อเซกเมนต์ด้วยวิธีการกำหนดระบบพิกัดที่เหมือนกัน

ข้อกำหนดของการจำลองโครงสร้างด้วยตาข่ายเส้นลวด (Wire-grid) มีดังต่อไปนี้

- (1) เซกเมนต์จะต้องไม่ซ้อนทับกัน เนื่องจากการแบ่งกระแสระหว่างสองเซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันนั้น ไม่สามารถสรุปได้ เซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันอาจมีผลในการสมการเมตริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix Equation)
- (2) การเปลี่ยนแปลงรัศมีที่มีความแตกต่างกันมากของเซกเมนต์ที่เชื่อมต่อกัน อาจมีผลทำให้ความแม่นยำลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ค่า  $\Delta/a$  มีค่าน้อย ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการให้รัศมีลดลงตามลำดับตลอดหลายเซกเมนต์
- (3) จำเป็นที่จะต้องมิเซกเมนต์มีจุดซึ่งมีการเชื่อมต่อกับโครงข่าย (Network) หรือ แหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage Source) สำหรับช่องว่างการกระตุ้น (Excitation Gap) ก็จำเป็นต้องมีเส้นลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อเนื่องลากข้ามช่องว่าง ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่ต้องการสามารถระบุให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตได้

- (4) จำนวนเส้นลวดที่จะนำมาต่อที่จุดเชื่อมต่อใด ๆ นั้น ไม่สามารถมีค่าเกิน 30 เส้นได้ เนื่องจากข้อจำกัดของมิติในรหัส NEC2

ข้อมูลที่ใช้อธิบายสายอากาศและสภาพแวดล้อม และคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการจะคำนวณ จะเป็นอินพุตที่จะใส่เข้าไป คล้ายกับบัตรเจาะรูที่เป็นข้อมูลใส่ให้กับคอมพิวเตอร์เมนเฟรมในสมัยก่อน กลุ่มของรหัสข้อมูลในการทำงานครั้งหนึ่งจะประกอบไปด้วย รหัสข้อมูล 3 ประเภท ด้วยกัน ส่วนแรกเริ่มต้นด้วยรหัสหนึ่งชุดหรือมากกว่านั้นซึ่งบรรยายละเอียดของการทำงาน ซึ่งจะพิมพ์เป็นตัวหนังสือที่จุดเริ่มต้นของไฟล์เอาต์พุต ต่อมาจะตามด้วยรหัสข้อมูลระบุรูปแบบทางเรขาคณิตซึ่งจะระบุรูปทรงของสายอากาศ และสุดท้ายจะเป็นส่วนของรหัสควบคุมโปรแกรมซึ่งจะระบุตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ความถี่ การโหลด (Loading) และการกระตุ้น (Excitation) รวมทั้ง ความต้องการให้คำนวณกระแสและสนามของสายอากาศ

รหัสข้อมูลทุก ๆ รหัส จะมีตัวอักษร 2 ตัว ในคอลัมน์ที่หนึ่งและสอง เพื่อเป็นการระบุรหัสให้ กับโปรแกรม ตัวอย่างเช่น รหัสข้อมูลเส้นลวด (Wire Specification:GW) ซึ่งจะเป็นรหัสที่ใช้ในการกำหนดเส้นลวดขึ้นมาระหว่างจุดสองจุด ซึ่งมีลักษณะของข้อมูลที่จะต้องใส่ลงไป ดังนี้

GW	I1	I2	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
	ITG	NS	XW1	YW1	ZW1	XW2	YW2	ZW2	RAD

ความหมายของแต่ละตัวแปรแต่ละตัวที่จะต้องใส่ลงไป คือ

ITG (I1) คือป้ายแสดงหมายเลข (Tag) ที่จะกำหนดให้มีเส้นลวดมีหมายเลขประจำเส้นลวดเป็นค่าใด รวมทั้งเซกเมนต์ของเส้นลวดก็จะมีหมายเลขตามหมายเลขเส้นลวดนั้นด้วย

NS (I2) คือ จำนวนเซกเมนต์ที่จะแบ่งให้กับเส้นลวด

XW1 (F1) คือพิกัด x ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

YW1 (F2) คือพิกัด y ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

ZW1 (F3) คือพิกัด z ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

XW2 (F4) คือพิกัด x ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

YW2 (F5) คือพิกัด y ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

ZW1 (F6) คือพิกัด z ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

RAD (F7) คือรัศมีของเส้นลวด

การกำหนดรัศมีของเส้นลวดนั้นจะต้องเลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดที่ทำให้พื้นที่ผิวรวมของเส้นลวดทั้งหมดมีค่าเท่ากับพื้นที่ผิวของตัวนำของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จักรหีสตัวอย่างข้างต้น เมื่อทำการใส่ตัวแปรต่าง ๆ ลงไปแล้ว และสั่งให้โปรแกรมทำงาน NEC2 จะสร้างเส้นลวดให้ 1 เส้น ซึ่งเส้นลวดนี้จะถูกแบ่งเป็นเซกเมนต์เล็ก ๆ จำนวน NS เซกเมนต์เล็ก ๆ จำนวน NS เซกเมนต์การสร้างแบบจำลองของสายอากาศสามารถทำได้โดยการใส่รหัสที่มีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างข้างบนนี้ไปเรื่อย ๆ ก็จะทำให้สามารถสร้างโครงสร้างสายอากาศและหาคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการได้ นอกจากนี้โครงสร้างที่สร้างขึ้นโดย NEC2 ยังสามารถกำหนดสภาพนำ (Conductivity) ให้เท่ากับสภาพนำของโลหะที่จะใช้ทำสายอากาศได้ เช่น ในกรณีนี้สายอากาศต้นแบบจะสร้างขึ้นโดยใช้ทองเหลือง ดังนั้นในการคำนวณโดยใช้ NEC2 ก็ทำการกำหนดสภาพนำของโครงสร้างด้วยค่าสภาพนำของทองเหลือง คือ  $2.56 \times 10^7$  S/m โดยการใส่คำสั่งโหลด (Load)

ในการตรวจสอบโครงสร้างของสายอากาศว่าได้สร้างถูกต้องเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่นั้นสามารถดูได้โดยใช้โปรแกรม Necview ซึ่งจะแสดงโครงสร้างของสายอากาศที่ได้ใส่รหัสใน NEC2 ออกมาเป็นตาข่ายเส้นลวด ตามที่กำหนดในระบบพิกัด  $x, y$  และ  $z$  นอกจากนี้โปรแกรม Necview ยังใช้ในการดูผลแบบรูปการแผ่พลังงาน ในระบบพิกัด  $x, y$  และ  $z$  ของสายอากาศที่ NEC2 คำนวณออกมาได้ด้วย สำหรับไฟล์เอาต์พุตที่ได้ออกมาจากการรันโปรแกรม NEC2 นั้น จะเป็นไปตามรูปแบบของข้อมูลที่ใส่เข้าไป เริ่มต้นด้วยการอธิบาย ตามมาด้วยข้อมูลทางเรขาคณิต และจากนั้นเป็นผลของตัวแปรที่ต้องการจะคำนวณ

NEC2 ได้รับการยอมรับว่าเป็นโปรแกรมที่สามารถคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ แต่สำหรับการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศด้วย NEC2 นั้น ยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรม NEC2 เอง จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิธีการแก้ไขปัญหาการคำนวณอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ผิดพลาดนี้ จากบทความของผู้วิจัยซึ่งได้ทำการศึกษาถึงปัญหาที่เกิดขึ้น และแนะนำวิธีการแก้ปัญหาไว้ใน ปรินทิพฉบับนี้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดีนั้น ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำอย่างดียิ่งเสมอมา คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณสุธาสนี ละมุลตรี และรุ่นพี่ห้องสายอากาศทุกท่านสำหรับแนวทางการคิดสร้างสรรค์ต่างๆ ตลอดจนคำสอน แนวทางแก้ไขปัญหาทั้งในส่วนของโครงการและการจัดทำปริญญาานิพนธ์

สุดท้ายที่ควรระลึกถึงเป็นอย่างยิ่ง ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีมาโดยตลอด

นายบุญญฤทธิ์ คำเขียน

นายระพีพันธ์ แก้วอ่อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] โมไนย ไกรฤกษ์, “ทฤษฎีสายอากาศ”, สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2535
- [2] C.A.Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design”, Harper & Row Publishers, Newyork, 1982
- [3] นิรันดร์ คำประเสริฐ, “วิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้าและวิศวกรรมไมโครเวฟ เล่ม 3”, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, 2542
- [4] พิษย์ ภักดีพานิชเจริญ, “ไมโครเวฟ”, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2540
- [5] W.J.R Hoefer, And M.N. Burton, “Closed form Expressions for Parameters of Finned and Ridge Waveguide”, IEEE Trans., 1982
- [6] David K. Chang, “Fundamental of Engineering Electromagnetic”, Addison Wesley Publishing Company, 1993
- [7] โมไนย ไกรฤกษ์, “ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า”, บริษัทพิมพ์สวยจำกัด, 2537
- [8] บัณฑิต โรจนอรยานนท์, “วิศวกรรมสายอากาศ”, พิมพ์ครั้งที่ 4, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537
- [9] J.Helszajn, “Ridge Waveguide and Passive Microwave Component”, United Kingdom MPG Book Limited, 2000
- [10] มงคล ทองสงคราม, “สนามแม่เหล็กไฟฟ้า”, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัทรวมการพิมพ์จำกัด, 2536
- [11] พูนศักดิ์ เอื้อเดชากุล, “วิศวกรรมสายอากาศ”, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์พระนครเหนือ, 2540
- [12] สุริยัน ศรีสวัสดิ์กุล, “พจนานุกรมศัพท์วิศวกรรมไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์”, ศบายบุ๊คส์, 2539

