

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศจากแถวระดับของช่องเปิด

Antenna from Aperture Array

โดย

นายนิพันธ์ รับควน 46015016

นายประวิทย์ ชัยอุปถัมภ์ 46015018

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร

ผศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 62615  
วัน,เดือน,ปี..... 2.1.ส.ค. 2549

b. 1482021  
i. ....

ปฏิญานินพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศจากแถวระดับของช่องเปิด

Antenna from Aperture Array



โดย

นายนิพนธ์ รั้วตวน 46015016

นายประวิทย์ ชัยอุปถัมภ์ 46015018

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารต้นฉบับที่นำมาใช้

ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด

**Antenna from Aperture Array**

ผู้จัดทำ

1 นายนิพันธ์ รัปควน 46015016

2 นายประวิทย์ ชัยอุปถัมภ์ 46015018

  
.....  
(ผศ.ดร. ชวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....  
(รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด  
Antenna from Aperture Array

โดย นายนิพนธ์ รั้วควน 46015016  
นายประวิทย์ ชัยอุปถัมภ์ 46015018

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร  
ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการนำช่องเปิดจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม มาจัดเรียงเป็นแถวลำดับที่มีทิศทางตรงกันข้ามในแต่ละทิศทางเพื่อให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ต้องการ สายอากาศที่นำเสนอมีข้อดีคือ สร้างได้ง่ายและโครงสร้างไม่ซับซ้อน คุณลักษณะที่จะทำการวิเคราะห์และทดสอบคือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่นและค่าสภาพเจาะจงทิศทาง เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานต่อไป

Abstract

This project presents the antenna using array of aperture directed in the opposite direction. The advantages of the antenna is that it is easy to fabricate and simple structure. We will analyze and test the radiation pattern, beamwidth and directivity to obtain the appropriate condition in the actual applications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	
สารบัญรูป	
สารบัญตาราง	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา	1
1.3 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	3
2.1.1 ลำคลื่นหลักของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	3
2.1.2 บริเวณต่าง ๆ ของสนาม	3
2.2 ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง	4
2.3 ค่าความกว้างลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรก	4
2.4 ช่วงกว้างแถบความถี่	4
2.4.1 ช่วงกว้างความถี่แคบ	4
2.4.2 ช่วงกว้างความถี่กว้าง	5
2.5 การแมตช์ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ	5
2.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	5
2.7 อัตราการขยาย	5
2.8 พื้นฐานและ โครงสร้างสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่น	6
2.8.1 พฤติกรรมคลื่นทั้งไปที่กระจายไปตาม โครงสร้างท่อนำคลื่นแบบสมมาตร	6
2.8.2 ระบายที่วางขนานกันในท่อนำคลื่น	9
2.8.3 คลื่นในตัวนำทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก	11
2.9 พื้นฐานและ โครงสร้างท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	12
2.10 แบบแผนคลื่นไฟฟ้าตามขวาง	18
2.11 การแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่น	21
2.12 การโพลาไรซ์	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
2.12.1 การโพลาริซ์เส้น	25
2.12.2 การโพลาริซ์วงรี	25
2.13 การทดสอบโพลาริซ์ของคลื่น	28
2.14 ตัวประกอบแอมพลิจูด	30
บทที่ 3 วิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบ	43
3.1 โครงสร้างสายอากาศจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า	43
3.2 การออกแบบ โครงสร้างของสายอากาศจากแอมพลิจูดของช่องเปิด	44
3.3 การเปลี่ยนแปลงความหนา ด้าน C ของสายอากาศจากแอมพลิจูดของช่องเปิด	45
3.4 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศรอบทิศทางจากท่อนำคลื่น	45
3.5 ค่าความกว้างที่สนามลดลงครึ่งหนึ่ง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศรอบทิศทางจากท่อนำคลื่นแอมพลิจูดช่องเปิด	47
3.6 การเปลี่ยนแปลงความหนาเมื่อดูจาก ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งสรุป	48
บทที่ 4 การสร้าง ทดสอบ และผลการทดสอบ	
4.1 บทนำ	49
4.2 การสร้าง	49
4.3 การทดสอบและผลการทดสอบ	50
4.3.1 การทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง อิมพีแดนซ์ และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบรอบทิศทางจากทิศทางจากแอมพลิจูดช่องเปิด	51
4.3.2 อุปกรณ์การทดสอบ	51
4.3.3 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ	51
4.3.4 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ	53
4.3.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	54
4.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่น	55
4.3.7 วิธีทดสอบ	55
4.3.8 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	58
4.3.9 การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
4.3.10 การวัดอัตราขยายสายอากาศจากแอมพลิจูดของช่องเปิด	62
4.3.10.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาอัตราขยายสายอากาศ	62
4.3.10.2 วิธีการทดสอบ	63
4.3.10.3 การหาอัตราขยายของสายอากาศ	63
4.3.11 การหาค่าสภาพเจาะงทศทางของสายอากาศแอมพลิจูดของช่องเปิด	64
4.3.12 การทดสอบการพาไรซ์ของสายอากาศแบบแอมพลิจูดของช่องเปิด	65
4.3.13 การทดสอบใช้งานจริง	67
4.3.13.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	67
สรุป	69
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 คลื่นระนาบสามารถแพร่กระจายไประหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่น	9
รูปที่ 2.2 การส่งคลื่นในแผ่นตัวนำที่มีระยะต่างกัน	10
รูปที่ 2.3 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก	10
รูปที่ 2.4 ลักษณะของคลื่นในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก	11
รูปที่ 2.5 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีผนังนำไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ภายในเป็นวัสดุไม่มีการสูญเสีย	11
รูปที่ 2.6 ลักษณะการกวาดของลูกศรที่แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าขณะหนึ่ง	23
รูปที่ 2.7 การโพลาไรซ์แบบต่าง ๆ	24
รูปที่ 2.8 รูปวงรีทำมุมเอียงที่เกิดจากสนามไฟฟ้ากวาดไปที่เวลาต่าง ๆ	27
รูปที่ 2.9 การทดสอบโพลาไรซ์ของคลื่น โดยใช้สายที่มีโพลาไรซ์เป็นเส้นตรง	29
รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของโพลาไรซ์ชั้นแบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้ายของคลื่นที่มีโพลาไรซ์แบบต่าง ๆ	30
รูปที่ 2.11 สายอากาศไดโพลสององค์ประกอบที่วางบนแกน Z	31
รูปที่ 2.12 สายอากาศไดโพล N องค์ประกอบ ที่วางอยู่บนแกน Z	32
รูปที่ 2.13 การกำหนดจุดอ้างอิงให้อยู่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดที่เป็นจำนวนคี่	34
รูปที่ 2.14 การกำหนดจุดอ้างอิงให้อยู่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดที่เป็นจำนวนคู่	35
รูปที่ 2.15 การจัดวางสายอากาศแถวลำดับจำนวน M องค์ประกอบบนแกน x	38
รูปที่ 2.16 การจัดเรียงสายอากาศแบบระนาบ	41
รูปที่ 3.1 ลักษณะสายอากาศสองทิศทางจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายเปิดทั้งสองด้าน	43
รูปที่ 3.2 ลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด	43
รูปที่ 3.3 สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศจากท่อนำคลื่น	46
รูปที่ 3.4 ค่าสนามสูงสุดของสายอากาศสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแถวลำดับของช่องเปิด	47
รูปที่ 3.5 อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบโดย โปรแกรม NEC2D	48
รูปที่ 4.1 ลักษณะของท่อนำคลื่นจากแถวลำดับของช่องเปิดที่ได้สร้างขึ้น	50
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด	53
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด	53

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศจากแฉวลำดับของช่องเปิด	54
รูปที่ 4.5 ลักษณะการวางสายอากาศเมื่อทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า	54
รูปที่ 4.6 ลักษณะการวางสายอากาศเมื่อทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบ	55
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในสนาม ไฟฟ้า	57
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในสนามแม่เหล็ก	57
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมในระนาบสนามไฟ	58
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมในระนาบสนามแม่เหล็ก	58
รูปที่ 4.11 การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ	60
รูปที่ 4.12 การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม	60
รูปที่ 4.13 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม	61
รูปที่ 4.14 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการผลการทดสอบ	62
รูปที่ 4.15 ลักษณะการต่อในการทดลองการโพลาไรซ์	66
รูปที่ 4.16 การทดสอบการโพลาไรซ์	66
รูป 4.17 โพลาไรเซชันของสายอากาศแฉวลำดับของช่องเปิด	67
รูปที่ 4.18 การทดสอบการใช้งานจริง	68
รูปที่ 4.19 กราฟ Throughput Average ตามระยะทาง	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1.ความเป็นมาและความสำคัญ

ในยุคปัจจุบัน เทคโนโลยี การสื่อสารได้เจริญก้าวหน้าเพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการติดต่อสื่อสาร เพื่อแลกเปลี่ยนข่าวสาร โดยมีระบบที่มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำ ทั้งยังช่วยให้ข่าวสารของเราปลอดภัยไม่รั่วไหล ซึ่งการสื่อสารจะมีทั้งแบบใช้สายส่งและแบบไร้สาย ในกระบวนการสื่อสารมีส่วนประกอบต่างๆ ที่สำคัญมากมาย ทั้งตัวอุปกรณ์ที่ใช้ส่งสัญญาณข่าวสารออกไป และตัวซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมระบบ ซึ่งในการสื่อสารที่ไร้สาย จะทำการติดต่อสื่อสารกันไม่ได้เลย หากขาดสายอากาศ สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อแพร่กระจายไปในอากาศ หรือที่เรียกว่าคลื่นวิทยุโดยคลื่นวิทยุมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง ซึ่งสายอากาศมีมากมายหลายประเภท ลักษณะสายอากาศประเภทต่างๆจะถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ให้เหมาะสมตามความถี่ที่ต้องการจากการสื่อสารข้อมูลที่มาขึ้นในยุคนี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องการช่องสัญญาณที่มาก ซึ่งต้องใช้ความถี่สูงในการส่งสัญญาณ ซึ่งในย่านความถี่สูงตั้งแต่ 1 GHz ขึ้นไปหรืออาจเรียกว่าย่านความถี่ไมโครเวฟ จึงได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ความถี่ไมโครเวฟ ได้มีการนำไปใช้ในการสื่อสารหลายประเภท อาทิเช่น การสื่อสารในโทรศัพท์มือถือ การส่งสัญญาณผ่านดาวเทียม หรือแม้กระทั่งการสื่อสารไร้สายของระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์

การส่งสัญญาณในความถี่ ไมโครเวฟ มีสายอากาศที่น่าสนใจอย่างยิ่งประเภทหนึ่ง คือสายอากาศจากท่อนำคลื่น หรือ เรียกว่า wave guide ซึ่งมีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณในย่าน ไมโครเวฟ ได้ดีชนิดหนึ่ง ซึ่ง wave guide นี้มีหลายประเภท เช่นสายอากาศจากท่อนำคลื่นเวฟไกด์ แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือแบบ วงกลม เป็น ต้น ในที่นี้จะกล่าวถึง สายอากาศจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งสามารถออกแบบให้เป็นแบบทิศทางเดียว หรือสองทิศทางก็ได้แล้วแต่ว่าจะนำไปใช้งานแบบไหน ท่อเวฟไกด์สี่เหลี่ยมผืนผ้านี้ ยังสามารถให้สามารถแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางได้ เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณที่ไม่ต้องการระบุทิศทางเฉพาะ โดยสายอากาศจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้ มีลักษณะนำท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า 4 ชั้น มาว่าล้อมรอบโพรบเชิงเส้นไฟฟ้า ที่ป้อนสัญญาณอยู่ภายในโดยท่อนำคลื่นทั้ง 4 จะถูกปิดด้วยโลหะเพื่อปิดช่องว่างทั้งด้านบนและด้านล่าง สายอากาศจะแพร่กระจายคลื่นออกมา ทั้งสี่ทิศทาง เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง

#### 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา

ปริญญาโทฉบับนี้ ได้นำเสนอ สายอากาศ รอบ ทิศทาง โดยท่อ นำคลื่น ซึ่งนำมาอาร์เรย์กัน เพื่อใช้ในพื้นที่ที่เหมาะสมซึ่งข้อดีของสายอากาศที่นำเสนอคือ สายอากาศมีแถบความถี่ใช้งานกว้าง ซึ่งใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในพื้นที่ที่เหมาะสมซึ่งข้อดีของสายอากาศที่นำเสนอคือ สายอากาศมีแถบความถี่ใช้งานกว้าง ซึ่งใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ

สายอากาศในปฏิญานิพนธ์นี้ ได้ทำการวิเคราะห์ ออกแบบ ทดสอบ และประเมินคุณสมบัติพื้นฐาน เช่น แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) และ อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage standing wave ratio: vswr) รวมทั้งการโพลาไรซ์และช่วงกว้างความถี่ใช้งาน

ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้ มานั้น ส่วนใหญ่จะได้อาจมาจากการวิเคราะห์โดย โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลข รุ่นที่ 2D(Numerical Electromagnetics code 2:NEC2D) ซึ่งได้นำผลทั้งหมดไปวิเคราะห์โดยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ และ ผลการทดลองนั้นได้มาจากการทดลองจริงโดย การสร้างสายอากาศต้นแบบ ออกมาแล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบ กับผลจากการคำนวณ โดยโปรแกรม

### 1.3 เนื้อหาของปฏิญานิพนธ์

บทที่1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญ วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา อีกทั้งเนื้อหาโดยรวมที่ได้รวบรวมไว้ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่2 กล่าวถึง ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศท่อนำคลื่น พื้นฐานของสายอากาศแบบทอสี่เหลี่ยมผืนผ้าการโพลาไรซ์ และการทดสอบโพลาไรซ์

บทที่3 กล่าวถึงการวิเคราะห์สายอากาศโดยใช้โปรแกรม NEC2D ซึ่งเป็น โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ กล่าวคือแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ ซึ่ง มีความสำคัญในการออกแบบ สายอากาศ

บทที่4 กล่าวถึงการสร้าง การทดสอบ และแสดงการทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์

บทที่5 เป็นการสรุปผลทั้งหมดตลอดจนวิเคราะห์วิจารณ์ และเสนอแนวทางสำหรับการพัฒนาสายอากาศต่อไป

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับสายอากาศ (Essential Antenna Parameters)

#### 2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ความหมายของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือแบบรูปที่เขียนให้อยู่ในรูป 2 มิติ หรือ 3 มิติ เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่จุดห่างไกลจากแหล่งกำเนิดคลื่นในทิศ ของ  $\theta$  หรือ  $\phi$  แบบรูปการกระจายคลื่นโดยทั่วไปจะมี 2 แบบ ถ้าเขียนจาสนามไฟฟ้าจะเรียกว่าสนามการแพร่กระจาย (Field Pattern) ถ้าเป็นแบบรูปการแพร่กระจายที่เขียนจากกำลังคลื่นก็จะเรียกว่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่น (Power Pattern) และโดยปกติจะหารไว้ด้วยค่าสูงสุด ซึ่งจะทำให้แบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 หรือถ้ากำหนดหน่วยเป็น dB ค่าสูงสุดก็จะเป็น 0 dB

##### 2.1.1 ลำคลื่นหลักของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

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

ลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe) หรือลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) คือลำคลื่นส่วนอื่นทั้งหมดนอกจากลำคลื่นหลัก ลำคลื่นด้านหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลักปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้น้อยที่สุด

##### 2.1.2 บริเวณต่างๆของสนาม

เราแบ่งบริเวณพื้นที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ

สนามรีแอกทีฟระยะใกล้เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุดบริเวณนี้จะมีระยะทาง

$$R < 0.62 \sqrt{\left(\frac{D^3}{\lambda}\right)} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

บริเวณ สนามระยะไกลเป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่สุดเท่ากับ  $D$  บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง

$$R \geq (2D^2/\lambda) \quad (2.2)$$

## 2.2 ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam width: HPBW)

เป็นมุมที่วัดระยะจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด

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

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าลดลงเป็นศูนย์โดยจะวัดในหน่วยขององศา

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

สายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศกำหนดให้อยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่น การโพลาไรซ์ อัตราขยายของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ

### 2.4.1 ช่วงกว้างความถี่แคบ (Narrow Band)

คือความถี่ที่มีช่วงความถี่ของความถี่ใช้งานน้อย

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

### 2.4.2 ช่วงกว้างความถี่กว้าง (Broad Band)

คือความถี่ที่มีช่วงความถี่ของความถี่ใช้งานมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

## 2.5 การแมตช์ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ (Matching Impedance)

การเข้ากันได้ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ จะเป็นตัวบอกว่าคลื่น ที่ออกจากแหล่งกำเนิดนั้น สามารถจะถูกส่งผ่านสายอากาศออกไปได้หมดหรือไม่ โดยพิจารณาองค์ประกอบที่สำคัญ 2 อย่างคือค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) ของสายอากาศ และค่าคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance) ของสายนำสัญญาณ

## 2.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางคือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงว่าสายอากาศต่าง ๆ มากน้อยแค่ไหนซึ่งวัดในหน่วยของ  $dB_i$  เขียนเป็นสมการได้ว่า

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

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

เมื่อ

$D_g$  = ไดเรกทิฟเกน

$D_o$  = ไดเรกตีวิตี้

$U$  = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น

$U_{max}$  = ค่าสูงสุดของความเข้มการแผ่กระจายคลื่น

$U_o$  = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส

$P_{rad}$  = กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด

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

## 2.7 อัตราการขยาย (Gain)

คือความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทางโดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ประสิทธิภาพของสายอากาศจะประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ ประสิทธิภาพตัวนำ และประสิทธิภาพของฉนวน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 พื้นฐานและโครงสร้างสายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่น [3]

ท่อนำคลื่น (Waveguide) หมายถึงอุปกรณ์ที่บังคับหรือนำส่งการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปในลักษณะที่ต้องการ โดยกำหนดจากรูปร่างของท่อนำคลื่นส่วนประกอบของท่อนำคลื่นสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่สูงกว่าย่านความถี่ SHF EHF การใช้สายส่งแบบ 2 ตัวนำ นั้นจะใช้ไม่ได้ผลเพราะว่าค่าคงตัวการลดทอนของคลื่น TEM ตามสายที่เป็น ผลมาจากสภาพความนำจำกัดของตัวนำที่เพิ่มขึ้นตามความต้านทานต่อความยาวหนึ่งหน่วยความต้านทานของสายเป็นปฏิภาคโดยตรงกับรากที่สองของความถี่และโดยเฉพาะการลดทอนไม่ควรจะมีค่าสูงที่ไม่โครเวฟ

ดังนั้นจึงควรจะศึกษาถึงลักษณะเฉพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่แพร่กระจายภายในท่อโลหะกลวง (Hollow Metal pipe) ทั้งนี้เพราะว่าท่อโลหะเป็นตัวนำเดี่ยวที่มีผิวขนาดใหญ่ ซึ่งต้องใช้การคาดหมายว่าการลดทอนอันเนื่องมาจากความต้านทานจะมีค่าที่ต่ำกว่า ท่อโลหะกลวงเป็นรูปแบบหนึ่งของโครงสร้างท่อนำทางคลื่นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Wave – Guiding Structure)

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

ประการแรกสายส่งสามารถทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (TEM) ได้เท่านั้น ส่วนท่อนำคลื่นทำให้เกิดรูปแบบการแพร่กระจายของสนามต่างๆ (Field Configuration) ขึ้นมากมาย

ประการที่สองที่ความถี่ไมโครเวฟ (3-300 GHz) สายส่งกลับไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ Skin Effect และการสูญเสีย Dielectric loss แต่ท่อนำคลื่นกลับใช้งานได้ดีในย่านความถี่นั้น เพื่อให้ได้รับแพททิ่งความถี่ที่กว้างกว่า และการลดทอนสัญญาณ ที่ต่ำกว่าและยังไปกว่านั้นสายส่งอาจทำงานจากกระแสตรง ( $f=0$ ) ไปจนถึงที่ความถี่สูงมาก ๆ แต่ท่อนำคลื่นสามารถทำงานเหนือความถี่หนึ่งขึ้นไปซึ่งความถี่นั้นว่าความถี่ Cut off เพราะฉะนั้นพฤติกรรมของท่อนำคลื่นก็จะเป็นเช่น วงจรกรองผ่านสูง

การเริ่มต้นการวิเคราะห์พฤติกรรมทั่วไปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นสม่ำเสมอที่มีภาคตัดขวางใด ๆ จะได้ทราบว่านอกเหนือจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (TEM) ที่ไม่มีส่วนประกอบสนามในทิศทางการกระจายคลื่นแล้ว ยังมีคลื่นแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic(TM) Wave) และคลื่นไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric (TE) Wave)

### 2.8.1 พฤติกรรมคลื่นทั่วไปที่กระจายไปตามโครงสร้างท่อนำคลื่นแบบสม่ำเสมอ (Wave Behaviors along Uniform Guiding Structures)

ในการพิจารณาคลื่นที่แพร่กระจายไปตามโครงสร้างนำท่อตรงที่มีภาคตัดขวางสม่ำเสมอ โดยจะสมมุติว่าคลื่นแพร่กระจายไปตาม  $+z$  ที่มีค่าคงตัวแพร่กระจาย  $\gamma = \alpha + j\beta$  สำหรับการแปรตามแบบ

(Harmonic Time Dependence) ไปด้วยความถี่เชิงมุม การแปรไปกับ  $z$  และ  $t$  สำหรับทุกส่วนประกอบสนาม สามารถอธิบายจากตัวประกอบ เอ็กซ์โพเนนเชียล ต่อไปนี้

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

พิจารณาท่อนำคลื่นในรูปแบบท่อโลหะตรงที่ภายในประกอบด้วยไดอิเล็กตริก โดยมีภาคตัดขวางและวางไปตามแนวแกน  $z$  ความเข้มสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามแม่เหล็กในบริเวณ ไดอิเล็กตริกที่ไม่มีประจุภายในท่อจะสอดคล้องกับสมการ ของเฮล์มโฮลทซ์เวกเตอร์เอกพันธ์ คือ

$$\nabla^2 \bar{E} + k^2 \bar{E} = 0 \quad (2.11)$$

$$\nabla^2 \bar{H} + k^2 \bar{H} = 0 \quad (2.12)$$

เมื่อ  $E$  และ  $H$  เป็นเฟสเซอร์เวกเตอร์สามมิติและ  $k$  เป็นจำนวนคลื่น

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (2.13)$$

ตัวดำเนินการลาปลาซสามมิติ  $\nabla^2$  อาจจะกระจายออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ พิกัดตามขวาง  $\nabla_{xy}^2$  และพิกัดตามยาว  $\nabla_z^2$  และสำหรับท่อนำคลื่นซึ่งมีภาคตัดขวางรูปสี่เหลี่ยม เราสามารถใช้พิกัด คาร์ทีเซียนได้ว่า

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

แทนสมการที่ (2.14) ในสมการที่ (2.11) จะได้

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

แทนในทำนองเดียวกันนี้ จากสมการที่(2.12) จะได้

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

จะเห็นว่าสมการที่ (2.15) และ (2.16) เป็นสมการย่อยเชิงอนุพันธ์อันดับสองของส่วนประกอบ E และ H จากสมการทั้งหมด ไม่จำเป็นต้องแก้สมการทั้งหมด และไม่จำเป็นต้องแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองทั้งหมดของส่วนประกอบทั้งหมดของ E และ H ให้มาพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบทั้งหมดในระบบพิกัด คาร์ทีเซียน โดยกระจายสมการเจิร์ดทั้งสองที่ปราศจากแหล่งกำเนิด โดยมี  $j = 0$

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

จะเห็นว่าอนุพันธ์ย่อยเมื่อเทียบกับ  $z$  จะถูกแทนที่โดยการคูณด้วย  $-\gamma$  ซึ่งสำหรับทุกส่วนประกอบของปริมาตรสนาม ในสมการข้างต้นจะเป็นเฟสเซอร์ที่ขึ้นอยู่กับ  $x$  และ  $y$  เท่านั้น โดยทั้งนี้ตัวประกอบรวมที่ขึ้นอยู่กับ  $z$  ได้ถูกตัดทิ้งไปเมื่อทำการแก้สมการเหล่านี้ เราสามารถที่จะหาส่วนประกอบสนามตามขวางของ  $H_x H_y E_x E_y$  ในพจน์ของส่วนประกอบตามยาว

เราจะนำเอาสมการที่ (2.17 ก) รวมกับสมการที่ (2.18ข) และจะรับ  $H_x$  ในเทอมของ  $E_x$  และ  $H_x$  คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

เมื่อ

$$h^2 = \gamma^2 + k^2 \quad (2.24)$$

ในสมการที่ (2.15) และ (2.16) ตามลำดับภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการและใช้สมการที่ (2.19) และ (2.23) ก็จะได้รับส่วนประกอบของสนามอื่น ๆ เพื่อความสะดวก จะแบ่งคลื่นซึ่งกระจายอยู่ในท่อนำคลื่นแบบ สม่ำเสมอ ออกเป็น 3 แบบตาม  $E_x$  และ  $H_z$  ดังนี้

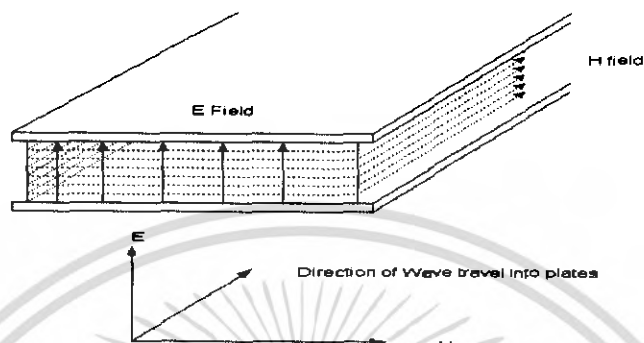
- 1) โหมดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (TEM) จะพบว่าคลื่นในทิส  $H_z = E_z = 0$  ในระบบสายคู่ขนาน หรือสายโคแอกเซียล
- 2) โหมดคลื่นแม่เหล็กตามขวาง (TM) ซึ่งมีเฉพาะคลื่นในทิส  $E_z$  เท่านั้นที่เกิดขึ้นส่วน  $H_z = 0$  จะพบในท่อที่มีรูปแบบ เช่น ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก ทรงกลม วงรี
- 3) โหมดคลื่นไฟฟ้าตามขวาง (TE) ซึ่งมี  $H_z$  เท่านั้นที่เกิดขึ้นส่วน  $E_z = 0$

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

ขณะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายไปในที่ว่าง (Free space) ถ้าเรานำแผ่นตัวนำ 2 แผ่นมาใกล้กัน

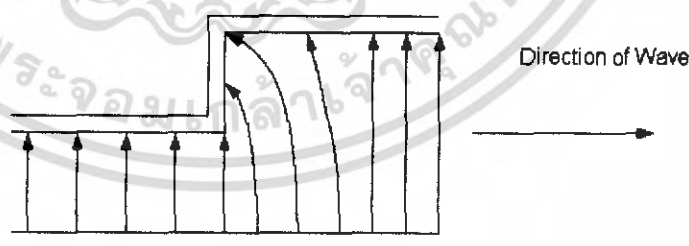
ขวางบังคับให้คลื่นเดินทางอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองคลื่นที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำนี้มีชื่อเรียกว่า คลื่นระนาบ (Plane Wave) ซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นมีสนามไฟฟ้า (E) และสนามแม่เหล็ก (H) ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นและมีหน้าคลื่น (Wave Front) เป็นระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กระหว่างแผ่นตัวนำที่เกิดขึ้นมาจากประจุที่ กระจายอยู่ตามพื้นผิวตัวนำ และกระแสที่ไหลผ่านพื้นผิวตัวนำเวกเตอร์ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะตั้งฉากกับผิวตัวนำ (โดยเริ่มจากประจุที่ผิวตัวนำด้านหนึ่งไปสิ้นสุด (Terminated) ที่ประจุบนผิวตัวนำอีกด้านหนึ่ง) ส่วนสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสที่ไหลผ่านผิวตัวนำ จะมีเวกเตอร์

ของสนามขนานไปกับผิวตัวนำ การเกิดสนามทั้งสองในลักษณะเช่นนี้ จะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบ (Plane Wave) สามารถแพร่กระจายไประหว่างแผ่นตัวนำทั้ง 2 ได้ ดัง รูป 2.1



รูปที่ 2.1 คลื่นระนาบสามารถแพร่กระจายไประหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่น

ถ้าระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันจะทำให้เกิดคลื่นลักษณะหนึ่งมีชื่อว่าคลื่นเชิงซ้อน (Complex Wave) ซึ่งคลื่นนี้จะเกิดในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของแผ่นตัวนำ (หรือเมื่อคลื่นมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่) สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นสนามตั้งฉากเคลื่อนที่ในระหว่างแผ่นตัวนำขนานที่แคบ เมื่อมาถึงจุดต่อ ของการเปลี่ยนระยะห่างสนามไฟฟ้าจะเกิดการโค้ง และกลับกลายเป็นสนามตั้งฉากอีกครั้งหนึ่งเมื่อเข้าสู่แผ่นตัวนำขนานที่มีระยะห่างกว้าง ดังรูปที่ 2.2

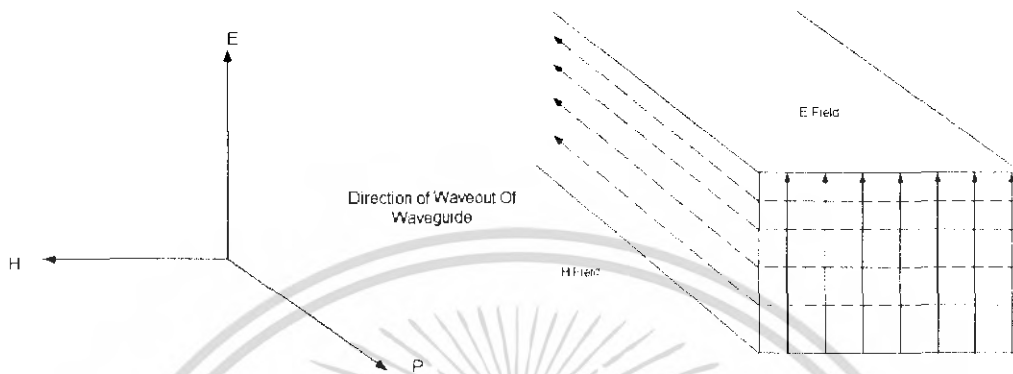


รูปที่ 2.2 การส่งคลื่นในแผ่นตัวนำที่มีระยะต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.3 คลื่นในตัวนำทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Wave in Rectangular Guide)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีคุณลักษณะเฉพาะ ดังรูปที่ 2.3

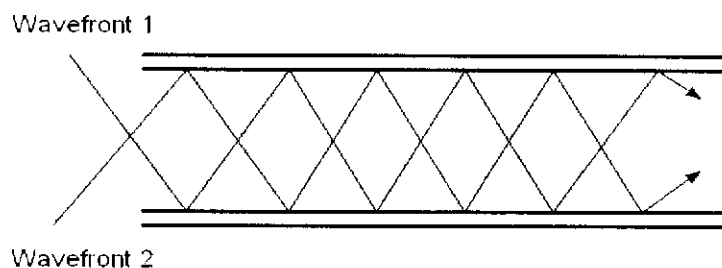


รูปที่ 2.3 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอยู่ภายในท่อนำคลื่นจุดที่มีความเข้มสูงสุด คือจุดกึ่งกลางของความยาวท่อนำคลื่นและความเข้มของสนามไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ที่ผนังด้านข้างคือสนามไฟฟ้าที่ขนานกับพื้นผิวตัวนำจะมีความเข้มเป็นศูนย์

สนาม  $H$  ที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นจะต่อเนื่องกัน และรอบท่อนำคลื่น โดยที่เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็ก จะไม่ตั้งฉากกับผนังของแผ่นตัวนำสนามแม่เหล็กจะวนต่อกันเป็น วงรอบและขนานไปกับผนังตัวนำ คลื่น TEM นั้นไม่สามารถแพร่กระจายไปในท่อนำคลื่นซึ่งเป็นตัวกลางที่มีตัวนำเดี่ยวจะนั้น โหมดของคลื่นในท่อนำคลื่นมี 2 โหมด คือ TE และ TH

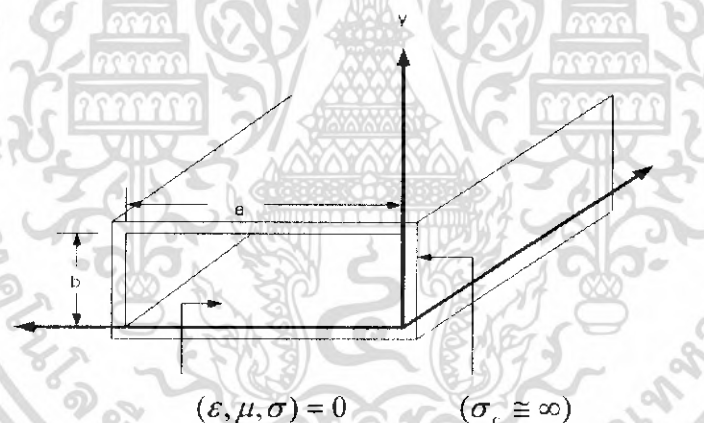
จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงระนาบคลื่นจาก 2 แหล่งซึ่งที่ขนาดและความถี่เท่ากันเขาไปในท่อนำคลื่นในลักษณะสะท้อนขึ้นลงเนื่องจากการสะท้อนกับผิวตัวนำ แต่คลื่นทั้งสองจะหักล้างกันและให้สนามไฟฟ้าที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นเป็นศูนย์ไปตลอด แนวการแพร่กระจายของคลื่นจากคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะให้มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนกลับ โดยที่มุมตกกระทบซึ่งให้แนวของสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ตรงกันไปตามผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของคลื่นที่ใช้งานและขนาดของท่อนำคลื่น



รูปที่ 2.4 ลักษณะของคลื่นในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

### 2.9 พื้นฐานและโครงสร้างท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Waveguide) [5]

ท่อนำคลื่นในทางปฏิบัติที่ใช้กันทั่วไปจึงเป็น โครงสร้างสมำเสมอที่ภาคตัดขวางหลายรูปแบบซึ่งสำหรับหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของคลื่นในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากวางดิ่งรูป



รูปที่ 2.5 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีผนังนำไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ภายในเป็นวัสดุไม่มีการสูญเสีย

พิจารณารูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นท่อนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ประกอบด้วยด้าน a และ b เราจะสมมุติว่าภายในท่อ ประกอบด้วย วัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีการสูญเสียไม่มีแหล่งกำเนิด ( $\sigma = 0$ ) และผนังของมันนำไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ ( $\sigma = 0$ ) ซึ่งใช้สำหรับตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียทำให้สมการของแมกซ์เวลล์ในรูปแบบอาจกลายเป็น

$$\nabla^2 \bar{E}_z + k^2 \bar{E}_z = 0 \tag{2.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\nabla^2 \overline{H}_s + k^2 \overline{H}_s = 0 \quad (2.26)$$

เมื่อ

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (2.27)$$

และจะมามติตัวแปรประกอบเวลา  $e^{j\omega t}$  ขึ้นมาถ้าเรากำหนดให้

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

และ

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

ดังนั้นสมการที่ (2.25) และ (2.26) จะเป็นส่วนประกอบของสมการเฮลมโฮลต์ซ์สเกลาร์ 3 สมการหรืออีกนัยหนึ่งการที่จะได้สนาม E และสนาม H มานั้นจะต้องแก้สมการสเกลาร์ 6 สมการยกตัวอย่างเช่นสำหรับส่วนประกอบ z ทำให้สมการที่ (2.25) กลายเป็น

$$\frac{\partial^2 \overline{E}_{zs}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \overline{E}_{zs}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \overline{E}_{zs}}{\partial z^2} + k^2 \overline{E}_{zs} = 0 \quad (2.28)$$

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการหาโซลูชันของสมการคลื่น (2.26) ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตสำหรับท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง สมมุติว่าท่อนำคลื่นเป็นท่อนำสมบรูณ์ เราจะได้เงื่อนไขขอบเขตว่าองค์ประกอบในทิศสัมผัสของสนามไฟฟ้าจะต้องเป็นศูนย์ที่ผิวของท่อนำคลื่น ในการหาโซลูชันของสมการคลื่นที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตนี้ จะใช้วิธีแยกตัวแปร (Method of Separation of Variables) ดังนี้

$$E_{zs}(x, y, z) = X_{(x)} Y_{(y)} Z_{(z)} \quad (2.29)$$

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

เมื่อแทนสมการที่ (2.29) ลงในสมการที่ (2.28) และหารด้วย  $x, y, z$  จะได้

$$\frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} + \frac{Z''}{Z} = -k^2 \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากตัวแปรเป็นอิสระต่อกันซึ่งแต่ละพจน์ในสมการที่ (2.30) จะต้อง เป็นค่าคงตัว ดังนั้นสมการสามารถเขียนได้เป็น

$$-k_x^2 - k_y^2 + r^2 = k^2 \quad (2.31)$$

เมื่อ  $-k_x^2$ ,  $-k_y^2$  และ  $\gamma^2$  เป็นค่าคงตัวที่แยกจากกันดังนั้นสมการที่ (2.30) จะถูกแยกออกเป็น

$$\begin{aligned} X'' + k_x^2 X &= 0 \\ Y'' + k_y^2 Y &= 0 \\ Z'' - \gamma^2 Z &= 0 \end{aligned} \quad (2.32)$$

เราจะได้ผลลัพธ์ของสมการ คือ

$$X(x) = C_1 \cos k_x x + C_2 \sin k_x x \quad (2.33ก)$$

$$Y(y) = C_3 \cos k_y y + C_4 \sin k_y y \quad (2.33ข)$$

$$Z(z) = C_5 e^{\gamma z} + C_6 e^{-\gamma z} \quad (2.33ค)$$

แทนสมการที่ (2.33) ลงในสมการที่ (2.29) จะได้รับ

$$E_{zs}(x, y, z) = (C_1 \cos k_x x + C_2 \sin k_x x)(C_3 \cos k_y y + C_4 \sin k_y y)(C_5 e^{\gamma z} + C_6 e^{-\gamma z}) \quad (2.34)$$

เช่นเคย ถ้าสมมติว่าคลื่นแพร่กระจายไปตามท่อนำคลื่นในทิศทาง  $+z$  ค่าคงตัวการคูณ  $C_5 = 0$  เพราะวาคลื่นจะจำกัดอยู่ที่ระยะอนันต์ ดังนั้นสมการที่ (2.34) จะเป็น

$$E_{zs}(x, y, z) = (A_1 \cos k_x x + A_2 \sin k_x x)(A_3 \cos k_y y + A_4 \sin k_y y)e^{-\gamma z} \quad (2.35)$$

เมื่อ  $A_1 = C_1 C_2$ ,  $A_2 = C_1 C_2$  เป็นต้น เมื่อกำหนดตามขั้นตอนเดียวกันนี้ จะได้รับผลลัพธ์ของส่วนประกอบ  $z$  เป็น

$$H_{zs}(x, y, z) = (B_1 \cos k_x x + B_2 \sin k_x x)(B_3 \cos k_y y + B_4 \sin k_y y)e^{-\gamma z} \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนการแก้สมการกับส่วนประกอบสนาม  $E_{xs}$   $E_{ys}$   $H_{xs}$  และ  $H_{ys}$  ในสมการที่ (2.25) และ  $H_{ys}$  ในสมการที่ (2.26) และ (2.26) ด้วยวิธีเดียวกัน ใช้สมการของแมกซ์เวลล์เพื่อหาค่าจาก  $E_{zs}$  และ  $H_{zs}$  ได้อย่างง่าย ๆ ซึ่งจาก

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

และ

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

จะ ได้รับ

$$\frac{\partial \bar{E}_{zs}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{E}_{ys}}{\partial z} = -j\omega\mu\bar{H}_{xs} \quad (2.27ก)$$

$$\frac{\partial \bar{H}_{zs}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{H}_{ys}}{\partial z} = -j\omega\epsilon\bar{E}_{xs} \quad (2.27ข)$$

$$\frac{\partial \bar{E}_{zs}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{E}_{zs}}{\partial x} = -j\omega\mu\bar{H}_{ys} \quad (2.27ค)$$

$$\frac{\partial \bar{H}_{zs}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{H}_{zs}}{\partial x} = -j\omega\epsilon\bar{E}_{ys} \quad (2.27ง)$$

$$\frac{\partial \bar{E}_{ys}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{E}_{zs}}{\partial y} = -j\omega\mu\bar{H}_{zs} \quad (2.27จ)$$

$$\frac{\partial \bar{H}_{ys}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{H}_{zs}}{\partial y} = j\omega\epsilon\bar{E}_{zs} \quad (2.27ฉ)$$

ในตอนนี้เราจะแสดง  $E_{xs}$   $E_{ys}$   $H_{xs}$  และ  $H_{ys}$  ให้อยู่ในพจน์ของ  $E_{zs}$  และ  $H_{zs}$  ยกตัวอย่างเช่น สำหรับ  $E_{xs}$  จะรวมสมการที่ (2.27) และ (2.27ค) เข้าด้วยกัน และจะได้รับ

$$j\omega\epsilon\bar{E}_{xs} = \frac{\partial \bar{H}_{zs}}{\partial y} + \frac{1}{j\omega\mu} \left\{ \frac{\partial^2 \bar{E}_{xs}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \bar{E}_{zs}}{\partial x \partial z} \right\} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) จะเป็นได้ชัดว่าส่วนประกอบสนามจะแปรผันไปกับ  $z$  ซึ่งเป็นไปตาม  $e^{-\gamma z}$  นั่นคือ

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

ดังนั้น

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

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

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

ดังนั้น ถ้าเรากำหนดให้

$$h^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu\epsilon = \gamma^2 + h^2$$

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

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

ดังนั้น

$$\bar{E}_{xs} = -\frac{\gamma \partial \bar{E}_{zs}}{h^2 \partial x} - \frac{j\omega\mu \partial \bar{H}_{zs}}{h^2 \partial y} \qquad (2.29ก)$$

$$\bar{E}_{ys} = -\frac{\gamma \partial \bar{E}_{zs}}{h^2 \partial y} - \frac{j\omega\mu \partial \bar{H}_{zs}}{h^2 \partial x} \qquad (2.29ข)$$

$$\bar{H}_{xs} = \frac{j\omega\epsilon \partial \bar{E}_{zs}}{h^2 \partial y} - \frac{\gamma \partial \bar{H}_{zs}}{h^2 \partial x} \qquad (2.29ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\overline{H}_{yx} = -\frac{j\omega\epsilon\partial\overline{E}_{zs}}{h^2\partial x} - \frac{\gamma\partial\overline{H}_{zs}}{h^2\partial y} \quad (2.29\text{a})$$

เมื่อ

$$h^2 = \lambda^2 + k^2 = k_x^2 + k_y^2$$

ดังนั้นสามารถใช้สมการที่ (2.29) ร่วมกับสมการที่ (2.25) และ (2.26) เพื่อจะได้รับ  $E_{ys}, E_{xs}, H_{xs}$  และ  $H_{ys}$

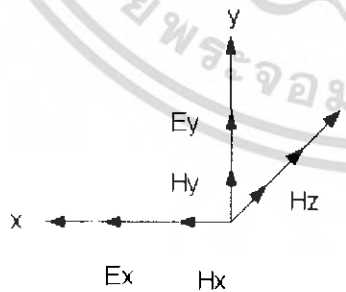
จากสมการที่ (2.25)(2.26) และ (2.27) เราจะเห็นได้ว่ามีแบบต่าง ๆ ของแบบรูปสนามหรือโครงแบบสนามที่ต่างกัน ซึ่งแบบรูปสนามที่ต่างกันอย่างชัดเจนเหล่านี้จะถูกเรียกว่า โหมด (Mode) ซึ่งจะมีลำดับชั้นที่ต่างกันของแบบแผนคลื่นเกิดขึ้น 4 แบบ กล่าวคือ

1)  $E_{zs} = 0 = H_{zs}$  (แบบแผนคลื่น TEM) ซึ่งเป็นแบบแผนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง ซึ่ง ทั้งสนาม E และสนาม H จะวางทิศทางการแพร่กระจายคลื่น จากสมการที่ (2.55) ทุกส่วนประกอบสนามไม่เกิดขึ้นที่  $E_{zs} = 0 = H_{zs}$  ผลที่ตามมาคือ ทำให้เราลงความเห็นว่าท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะไม่สามารถทำให้เกิดแบบแผนคลื่น TEM ได้

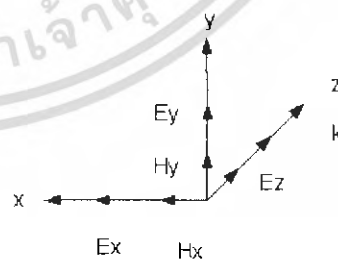
2)  $E_{zs} = 0, H_{zs} \neq 0$  (แบบแผนคลื่น TE) ในกรณีนี้ ส่วนประกอบที่เหลือนั้นคือ  $E_{xs}$  และ  $E_{ys}$  ของสนามไฟฟ้าจะวางทิศทางการแพร่กระจาย  $az$  ซึ่งสนามจะถูกเรียกว่าแบบแผนคลื่นไฟฟ้าตามขวาง ภายใต้งื่อนไข่นี้ ดูรูป ก.

3)  $E_{zs} \neq 0, H_{zs} = 0$  (แบบแผนคลื่น TM) ในกรณีนี้สนาม H จะวางทิศทางการแพร่กระจายคลื่น ดังนั้นเราจึงเรียกแบบแผนคลื่นแม่เหล็กตามขวาง ดูรูป ข.

4)  $E_{zs} \neq 0, H_{zs} \neq 0$  (แบบแผนคลื่น HE) เป็นกรณีนี้ที่ทั้งสนาม E และสนาม H ไม่ได้วางทิศทางการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งมันจะถูกอ้างอิงแบบแผนคลื่นไฮบริดจ์ (Hybrid Mode)



(ก) แบบแผนคลื่น TE ซึ่ง  $E_z = 0$



(ข) แบบแผนคลื่น TM ซึ่ง  $H_z = 0$

ควรสังเกตถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $k$  ในสมการที่(2.3) กับค่าคงตัวเฟส  $\beta$  ซึ่งสำหรับแบบแผนคลื่น TEM จะมี  $h = 0$  ดังนั้นสมการที่ (2.56)  $g^2 = -k^2 \rightarrow g = a + jb = jk$  นั่นคือ  $\beta = k$  สำหรับแบบแผนคลื่นอื่นจะมี  $\beta \neq k$  สำหรับสำหรับหัวข้อต่อไปจะพิจารณาเฉพาะแบบแผนคลื่นแพร่กระจาย TM และ TE เท่านั้น แต่ในที่นี้จะกล่าวถึง TE เพียงอย่างเดียวเพราะว่า TM มีหลักการเช่นเดียว

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

สำหรับแบบแผนคลื่น TE นี้สนามไฟฟ้าจะขวาง (หรือตั้งฉากกับ) ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นเราจะกำหนดให้  $E_z = 0$  (ดังรูป ก) และจะหาส่วนประกอบสนามอื่น ๆ คือ  $E_x, E_y, H_x, H_z$  และ  $H_z$  ได้จากสมการ (2.52) และ (2.55) และหาเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งจะได้มาจากความจริงที่ว่า ส่วนประกอบสัมผัสของสนามไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่องที่ผนังของท่อนนำคลื่น ซึ่งจะได้มาจากความจริงที่ว่า ส่วนประกอบสัมผัสของสนามไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่องที่ผนังของท่อนนำคลื่น นั่นคือ

$$E_x = 0 \quad \text{ที่ } y = 0 \quad (2.30 \text{ ก})$$

$$E_x = 0 \quad \text{ที่ } y = b \quad (2.30 \text{ ข})$$

$$E_y = 0 \quad \text{ที่ } x = 0 \quad (2.30 \text{ ค})$$

$$E_y = 0 \quad \text{ที่ } x = a \quad (2.30 \text{ ง})$$

ซึ่งสมการที่ (2.30ก) และ (2.30ค) ต้องการให้สมการที่มี  $B_2 = 0 = B_4$  ดังนั้นสมการที่ (2.26) จะกลายเป็น

$$H_z = H_0 \cos k_x x \cos k_y y e^{-\gamma z} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $H_0 = B_1 B_3$  ซึ่งสมการที่ (2.30ข) เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับสมการ (2.31) กลายเป็น

$$\cos k_x a = 0 \quad , \quad \sin k_y b = 0 \quad (2.32)$$

ซึ่งหมายความว่า

$$k_x a = m\pi \quad , \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.33)$$

$$k_y b = nm \quad , \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.34)$$

หรือ

$$k_x = \frac{m\pi}{a} \quad , \quad k_y = \frac{n\pi}{b} \quad (2.35)$$

จำนวนเต็มลบจะไม่มาใช้กับ  $m$  และ  $n$  ในสมการ ที่(2.35) เมื่อแทนสมการ (2.34) ในสมการที่ (2.31) ในสมการที่ (2.31) ก็จะได้

$$H_{zx} = H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (2.36ก)$$

ซึ่งเราจะได้รับส่วนประกอบสนามอื่น ๆ จากสมการ(2.63)และ (2.55) โดยให้จำไว้ว่า  $E_{zx} = 0$  ดังนั้น จะได้

$$E_{yx} = \frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (2.36ข)$$

$$E_{xy} = -\frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) H_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (2.36ค)$$

$$H_{xy} = \frac{\gamma}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) H_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (2.36ด)$$

$$H_{yx} = \frac{\gamma}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (2.36ง)$$

สำหรับแบบแผนคลื่น TE ค่า  $(m, n)$  อาจเป็น(0,1)แต่ต้องไม่ใช่ (0,0) ทั้ง  $m$  และ  $n$  ไม่สามารถเป็น 0 ในเวลาเดียวกันได้ เพราะว่าจะได้บังคับให้ส่วนประกอบสนามในสมการที่ (2.64) ไม่เกิดขึ้นซึ่งสามารถแสดงความหมายได้ว่าแบบแผนคลื่นที่ต่ำที่สุดจะเป็นแบบแผนคลื่น  $TE_{10}$  หรือ  $TE_{01}$  นั้นก็เกิดขึ้นอยู่กับค่า  $a$  และ  $b$  ซึ่งเป็นมิติของท่อนำคลื่นซึ่งมาตรฐานในทางปฏิบัติจะต้องมีค่ามีค่า  $a > b$  ดังนั้นจึงทำให้  $1/a^2 < 1/b^2$  ด้วยเหตุนี้เองแบบแผนคลื่น  $TE_{10}$  จึงเป็นแบบแผนคลื่นที่ต่ำสุด เนื่องจากการลดทอนต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับทุกแบบแผนคลื่นในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งจะเรียกแบบแผนคลื่นนี้ว่า แบบแผน คลื่นเป็นใหญ่ ของท่อนำคลื่นและเป็นการปฏิบัติที่สำคัญ แบบแผนคลื่นเป็นใหญ่เป็นแบบแผนคลื่นที่มีความถี่ต่ำสุด (ความยาวคลื่นตัดยาวที่สุด) และสำหรับความถี่ตัดขวางแบบแผนที่คลื่น  $TE_{10}$  นี้จะได้มาจากสมการ

$$f_{c10} = \frac{u'}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

( $\sigma = 0$   $\mu, \epsilon$ ) ที่ประกอบอยู่ในท่อนำคลื่นและสำหรับความยาวคลื่นตัดของแบบแผนคลื่น  $TE_{10}$  นี้จะได้มาจากสมการ ที่(2.65) (เมื่อ  $m = 1, n = 0$ ) คือ

$$f_{co(10)} = \frac{u'}{2a} \text{ Hz} \quad (2.38)$$

และความยาวคลื่นตัดของแบบแผนคลื่น  $TE_{10}$  จะได้จากสมการที่(2.66) โคแทน ( $m = 1, n = 0$ )

$$\lambda_{co(10)} = 2a \quad m \quad (2.39)$$

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

ตารางที่ 2.1 สมการสำคัญของแบบแผนคลื่น TE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.37) และ(2.38) เราจะได้แบบรูปสนามของแบบคลื่น TE ที่  $TE_{10}$  โดยกร แทน  $m = 1$  และ  $n = 0$

### 2.11 การแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่น (Wave Propagation)

เมื่อพิจารณาที่(2.38) จะเห็นว่าทุกส่วนประกอบสนามจะเกี่ยวกับพจน์ของฟังก์ชัน ไซน์หรือฟังก์ชัน

โคไซน์ของ  $\left(\frac{m\pi}{a}\right)x$  หรือ  $\left(\frac{n\pi}{b}\right)y$  คูณกับ  $e^{-\gamma z}$  เนื่องจาก

$$\sin \theta = \frac{1}{2j}(e^{j\theta} - e^{-j\theta}) \quad (2.40ก)$$

$$\cos \theta = \frac{1}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \quad (2.40ข)$$

คลื่นภายในท่อนำคลื่นสามารถแยกออกเป็นการจัดหมู่ของคลื่นระนาบที่สะท้อนจากผนังท่อนำคลื่น ยกตัวอย่างเช่น สำหรับแบบแผนคลื่น  $TE_{10}$

$$\begin{aligned} \bar{E}_{ys} &= -\frac{j\omega\mu a}{\pi} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-j\beta z} \\ &= -\frac{j\omega\mu a}{\pi} \cdot \frac{1}{2}(e^{-j\pi x/a} - e^{j\pi x/a}) e^{-j\beta z} \\ \bar{E}_{ys} &= -\frac{\omega\mu a}{2\pi} (e^{-j\beta(z+\pi x/\beta a)} - e^{-j\beta(z-\pi x/\beta a)}) \end{aligned} \quad (2.41)$$

พจน์แรกของสมการที่ (2.41) แสดงถึงคลื่นที่เคลื่อนที่ในทิศทาง  $+z$  ที่มุม

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\pi}{\beta a}\right) \quad \text{ที่แกน } z \quad (2.42)$$

พจน์ที่สองของสมการที่ (2.41) แสดงถึงคลื่นที่ในทิศทาง  $+z$  ที่มุม  $-\theta$  สนามจะถูกแสดงเป็นผลรวมของคลื่นระนาบ TEM สองคลื่นที่แพร่กระจายไปตามทางซิกแซก ระหว่างผนังท่อนำคลื่นที่  $x = 0$  และ  $x = a$  การแยกแบบแผนคลื่น

$TE_{10}$  ออกเป็นคลื่นระนาบ 2 คลื่น จะสามารถขยายไปเป็นแบบแผนคลื่น TE และ TM ใด ๆ ได้ซึ่ง

เมื่อใดก็ตามที่  $n = m$  ไม่ได้เป็น 0 ทั้งคู่ในเวลาเดียวกัน จะเกิดคลื่นระนาบได้ 4 คลื่น ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกนั่นเอง

ส่วนประกอบคลื่นในทิศทาง  $z$  จะมีความคลื่นต่างไปจากส่วนประกอบคลื่นระนาบความยาวคลื่นตามแกนท่อนำคลื่นนี้จะถูกเรียกว่า ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (Waveguide Wavelength) และกำหนดได้โดย

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

เมื่อ  $\lambda_g$  = ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น

$\lambda$  = ความยาวคลื่นในสุญญากาศ

ผลอันสืบเนื่องมาจากทางเดินซิกแซกจะทำให้เรามีความเร็ว 3 แบบ คือความเร็วปานกลาง  $u'$  ความเร็วเฟส  $u_p$

และความเร็วกลุ่ม  $u_g$  เกิดขึ้น และ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วทั้ง สามนี้ความเร็วปานกลาง

$u' = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$  เป็นความเร็วที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนความเร็วเฟส  $u_p$  เป็นความเร็วที่วิถีการเคลื่อนที่ของเฟสคงตัวซึ่งแพร่กระจายลดต่ำลงในท่อนำคลื่นและจะกำหนดได้จากสมการ

$$u_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.43)$$

$$u_p = \frac{u'}{\cos\theta} = \frac{u'}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{co}}{f}\right)^2}} \quad (2.44)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า  $u_p \geq u'$  ดังนั้นถ้าเมื่อใด  $u' = c$  จะทำให้  $u_p$  มากกว่าความเร็วแสงในสุญญากาศ ซึ่งถือว่าเป็นการละเมิดทฤษฎีสัมพันธภาพของไอน์สไตน์ การละเมิดนี้จะทำให้ข่าวสารไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าความเร็วแสงจริงหรือไม่ ตอบได้เลยว่าไม่จริงเพราะว่าข้อมูลข่าวสาร (หรือพลังงาน) ในท่อนำคลื่นโดยปกติจะไม่เคลื่อนที่ที่ความเร็วเฟสอยู่แล้ว ข้อมูลข่าวสารจะเคลื่อนที่ที่ความเร็วกลุ่มซึ่งน้อยกว่าความเร็วแสง ความเร็วกลุ่ม  $u_g$  เป็นความเร็วซึ่งเป็นผลให้คลื่นสะท้อนส่งสัญญาณเข้าเคลื่อนที่ลดต่ำลงในท่อนำคลื่นและจะกำหนดได้โดย

$$u_g = \frac{1}{\partial\beta/\partial\omega} \quad (2.45)$$

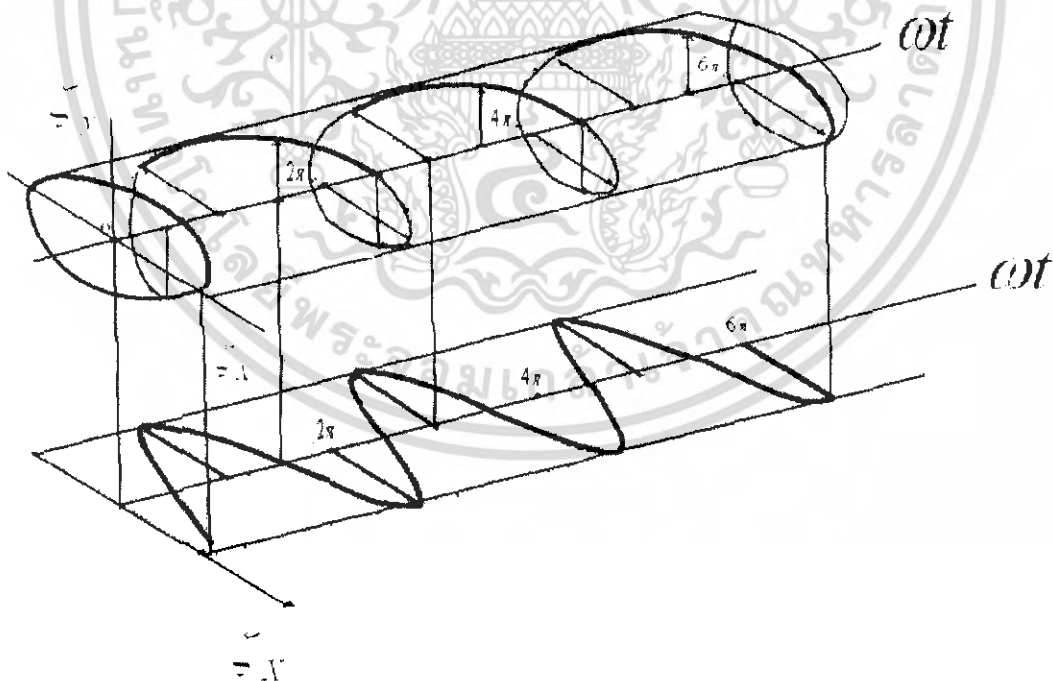
หรือ

$$u_g = u' \cos\theta = u' \sqrt{1 - \left(\frac{f_{co}}{f}\right)^2} \quad (2.46)$$

แม้ว่าแนวคิดเรื่องความเร็วกลุ่มจะดูซับซ้อนและเกินขอบเขตปริญญาโทไปบ้าง แต่ความเร็วกลุ่มก็เป็นความเร็วที่ จำเป็นสำหรับการแพร่กระจายของกรอบคลื่นของกลุ่มความถี่ มันเป็นความเร็วการแพร่กระจายพลังงานในท่อนำคลื่น

## 2.12 การโพลาริซ

การโพลาริซได้ถูกกำหนดให้เป็นคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่และขนาดสัมพันธ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ตามเวลาจะเป็นรูปที่แสดงการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งหนึ่ง ๆ เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ในการสังเกตลักษณะการกวาดของสนามไฟฟ้านี้จะมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป เราอาจสรุปได้อีกนัยหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.6 ลักษณะการกวาดของลูกศรที่แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าขณะหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.6 แสดงลูกศรที่แสดงขนาดและทิศทางสัมพัทธ์ของสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งคงที่ตำแหน่งหนึ่ง โดยลูกศรนี้จะมีขนาดยาวที่ทิศทางกรซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาต่าง ๆ สำหรับการกวาดแบบวงรี มองตามหลังคลื่นที่เดินทางไปในทิศทาง  $-z$  (ที่  $z$  คงที่ค่าหนึ่ง) จะเห็นว่าเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปลูกศรจะกวาดเป็นลักษณะวงรีในทิศทางเข็มนาฬิกา สำหรับการกวาดแบบ เเชิงเส้นจะเห็นว่ามีการวางของลูกศรเป็นลักษณะเส้นตรง

เราจะแบ่งการ โพลารไรซ์เป็น 3 แบบ ด้วยกันคือ

1. การโพลารไรซ์เชิงเส้น (Linear Polarization)
2. การโพลารไรซ์วงกลม (Circular Polarization)
3. การโพลารไรซ์วงกลม (Elliptical Polarization)

ซึ่งสามารถอธิบายด้วยรูปดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การโพลารไรซ์แบบต่าง ๆ ก) เชิงเส้น ข) วงกลม ค) วงรี

### 2.12.1 การโพลารไรซ์เชิงเส้น

ถ้ามีคลื่นระนาบที่การเปลี่ยนแปลงกับเวลาเป็นฮาร์มอนิกส์สนามไฟฟ้าสองส่วนคือ  $\xi_x$  และ  $\xi_y$  เดินทางในทาง  $+z$  (พุ่งเข้าไปในหน้ากระดาษ) สามารถแสดงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กขณะหนึ่งของคลื่นนี้ด้วย

$$\begin{aligned}\vec{\xi} &= \hat{a}_x \xi_x + \hat{a}_y \xi_y \\ &= \text{Re}(\hat{a}_x E_x^+ e^{i(\omega t - \beta z)} + \hat{a}_y E_y^+ e^{i(\omega t - \beta z)})\end{aligned}\quad (2.47)$$

$$\begin{aligned}&= \hat{a}_x E_{x0}^+ \cos(\omega t - \beta z + \phi_x) + \hat{a}_y E_{y0}^+ \cos(\omega t - \beta z + \phi_y) \\ &= \hat{a}_y \frac{E_{x0}^+}{\eta} \cos(\omega t - \beta z + \phi_x) + \hat{a}_x \frac{E_{y0}^+}{\eta} \cos(\omega t - \beta z + \phi_y)\end{aligned}\quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการ (2.47) และ (2.48)  $E_x^+$  และ  $E_y^+$  เป็นปริมาณเชิงซ้อนที่แสดงทั้งขนาดและเฟสซึ่งมีค่า  $E_{x0}^+ e^{i\phi}$  และ  $E_{y0}^+ e^{i\phi}$

ถ้าสมมติให้พิจารณาสนามที่ตำแหน่ง  $z=0$  และ  $E_z^- = 0$  ดังนั้น สนามไฟฟ้าในสมการ (2.47) จะกลายเป็น

$$\vec{\xi} = \hat{a}_x E_{x0}^+ \cos(\omega t + \phi_x) \quad (2.49)$$

### 2.12.2 การโพลาริซวงรี

คลื่นจะเป็นการโพลาริซวงรี เมื่อปลายลูกศรของเวกเตอร์ สนามไฟฟ้า กวาดเป็นวงรี ซึ่งจะเหมือนกับในกรณีของโพลาริซวงกลมคือ ที่วางความเข้มนาฬิกาจะทำให้เกิดการ โพลาริซวงรีวนขวาและ กวาดทวนเข็มนาฬิกาซึ่งทำให้เกิดการโพลาริซวงรีซ้าย

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

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

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

ในกรณีนี้ความต่างเฟสเป็น  $90^\circ$  แต่ขนาดของสนามไฟฟ้า  $E_{x0}^+$  ไม่เท่ากับ  $E_{y0}^+$  สนามไฟฟ้า ขณะหนึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\xi_x = (E_R + E_L) \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -(E_R + E_L) \sin(\omega t) \quad (2.50ก)$$

$$\xi_y = (E_R - E_L) \cos(\omega t) \quad (2.50ข)$$

จะหาขนาดของสนามไฟฟ้ารวมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_x^2 + \xi_y^2 = (E_R + E_L)^2 \sin^2(\omega t) + (E_R - E_L)^2 \cos^2(\omega t) \\ &= E_R^2 \sin^2 \omega t + E_L^2 \sin^2 \omega t + 2E_R E_L \sin^2 \omega t \\ &\quad + E_R^2 \cos^2 \omega t + E_L^2 \cos^2 \omega t - 2E_R E_L \cos^2 \omega t \\ &= E_R^2 + E_L^2 + 2E_R E_L (\sin^2 \omega t - \cos^2 \omega t) \end{aligned} \quad (2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อแทนกลับในสมการ (2.51) จะได้

$$\xi_x^2 + \xi_y^2 = E_R^2 + E_L^2 + 2E_R E_L \left[ \frac{\xi_x^2}{(E_R + E_L)^2} - \frac{\xi_y^2}{(E_R - E_L)^2} \right] \quad (2.52)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\left\{ \frac{\xi_x}{E_R + E_L} \right\}^2 + \left\{ \frac{\xi_y}{E_R - E_L} \right\}^2 = 1 \quad (2.53)$$

สมการ (2.93) เป็นสมการของวงรีที่มีแกนหลักตัดค่า  $|\xi_{\max}| = |E_R + E_L|$  และแกนรองตัดค่า  $|\xi_{\max}| = |E_R - E_L|$  ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้า  $\xi_{\max}$  จะเกิดขึ้นเมื่อ  $\omega t$  มีค่าเท่ากับ  $(2n+1)\frac{\pi}{2}; n = 0, 1, 2, 3, \dots$

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

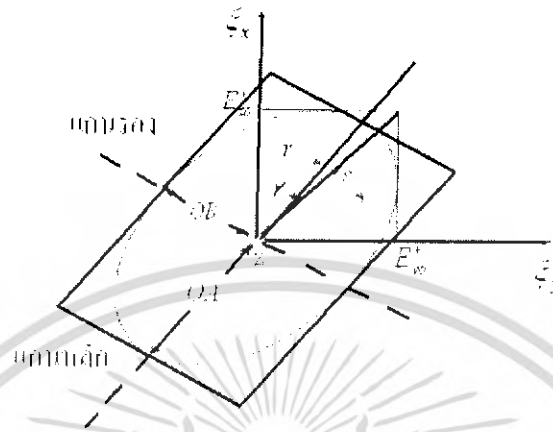
$$AR = \frac{\xi_{\max}}{\xi_{\min}} = \frac{(E_R + E_L)}{(E_R - E_L)} \quad (2.54)$$

เมื่อ  $E_R$  และ  $E_L$  เป็นปริมาณบวกจริง AR จะเป็นบวกสำหรับการโพลาไรซ์วงรีซ้าย และเป็นลบสำหรับการโพลาไรซ์วงรีขวา จะมีค่าอยู่ในช่วง  $1 \leq |AR| \leq \infty$  สามารถเขียนสมการไฟฟ้าขณะหนึ่งได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{\xi} &= \text{Re} \left\{ \hat{a}_x (E_R + E_L) e^{j(\omega t - \beta z + \frac{\pi}{2})} + \hat{a}_y (E_R - E_L) e^{j(\omega t - \beta z)} \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ (\hat{a}_x j (E_R + E_L) + \hat{a}_y (E_R - E_L)) e^{j(\omega t - \beta z)} \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ (E_R (j\hat{a}_x + \hat{a}_y) + E_L (j\hat{a}_x - \hat{a}_y)) e^{j(\omega t - \beta z)} \right\} \end{aligned} \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้ารวมของคลื่นแบบการโพลาไรซ์วงรีจะเป็นผลรวมของคลื่นการโพลาไรซ์วงกลมวน ขวารวมกับคลื่นการโพลาไรซ์วงกลมซ้าย



รูปที่ 2.8 รูปวงรีทำมุมเอียงที่เกิดจากสนามไฟฟ้ากวาดไปที่เวลาต่าง ๆ

ถ้า  $E_R$  มีค่ามากกว่า  $E_L$  อัตราส่วนตามแกนจะมีค่าเป็นลบ และส่วนของการโพลาไรซ์วงกลมวง ขวาจะมีมากกว่าส่วนของการโพลาไรซ์วงกลมซ้าย ซึ่งผลลัพธ์ของสนามไฟฟ้า จะมีการกวาดไปตามการ โพลาไรซ์วงกลมขวา ทำให้คลื่นนี้เป็นแบบการโพลาไรซ์วงรีวนขวา

ในทางกลับกันถ้า  $E_R$  มีค่ามากกว่า  $E_L$  อัตราส่วนตามแกนจะมีค่าเป็นบวก และส่วนการโพลาไรซ์ วงกลมซ้ายจะมีมากกว่าส่วนของการโพลาไรซ์วงกลมวงขวา สนามไฟฟ้าลัพธ์จะกวาดไปในทิศทาง การโพลาไรซ์วงกลมซ้าย และสนามนี้จะเป็นแบบการโพลาไรซ์วงรีซ้าย

ในกรณีที่ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน X และแกนแนว Y แต่ถ้าหากความต่าง ที่แสดง การกวาดของสนามไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ จะอยู่ในแนวแกน X หรือแนวแกน Y แต่ถ้าหากความต่างเฟสไม่เป็น  $90^\circ$  จะทำให้วงรีวางเอียงทำมุมกับแกน X ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะแสดงสนามไฟฟ้าลัพธ์จากเงื่อนไข

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

$$\begin{aligned} \geq 0 & \quad \text{สำหรับตามเข็มนาฬิกา ถ้า } E_R > E_L \\ & \quad \text{สำหรับทวนเข็มนาฬิกา ถ้า } E_R < E_L \end{aligned} \tag{2.56}$$

$$\begin{aligned} \leq 0 & \quad \text{สำหรับตามเข็มนาฬิกา ถ้า } E_R < E_L \\ & \quad \text{สำหรับทวนเข็มนาฬิกา ถ้า } E_R > E_L \end{aligned} \tag{2.57}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{x_0}^+ = E_R + E_L \quad (2.58ก)$$

$$E_{y_0}^+ = E_R - E_L \quad (2.58ข)$$

จะพบว่าแกนหลักและแกนรองจะไม่อยู่ในแนวแกน  $X$  และแกน  $Y$  หากความต่างเฟสระหว่าง สนามไฟฟ้าทั้งสองส่วนที่ตั้งฉากกันไม่เป็นจำนวนเลขคี่เท่าของ  $\pm 90^\circ$

อัตราส่วนตามแกนจะมีค่า

$$AB = \text{แกนหลัก} / \text{แกนรอง} = \pm \frac{OA}{OB} \quad 1 \leq |AB| \leq \infty \quad (2.59)$$

เครื่องหมายบวกในสมการ (2.99) แสดงถึงการโพลาไรซ์แนวซ้ายและเครื่องหมายลบแสดงถึงการโพลาไรซ์แนวขวา

ความเอียงของวงรีเมื่อเทียบกับแกน  $X$  จะแสดงด้วยมุม  $\tau$  ซึ่งมีค่า

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2E_{x_0}^+ E_{y_0}^+}{(E_{x_0}^+)^2 - (E_{y_0}^+)^2} \cos(\Delta\phi) \right) \quad (2.60)$$

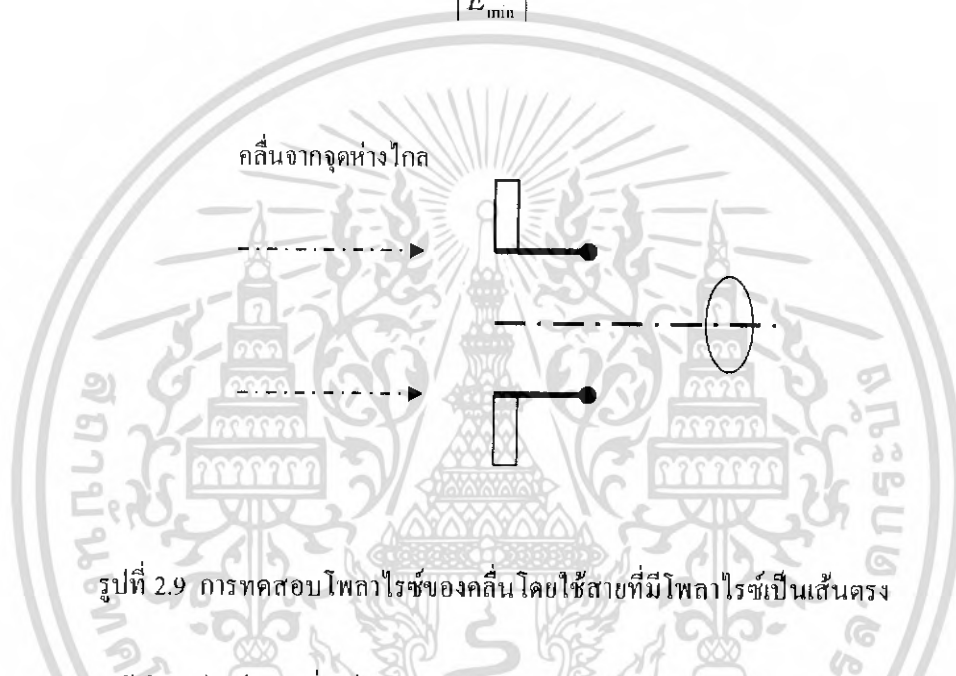
### 2.13 การทดสอบโพลาไรซ์ของคลื่น [6]

การทดสอบโพลาไรซ์ของคลื่นนั้นว่าเป็นสิ่งจำเป็น ในกรณีที่เราต้องการส่งที่มีโพลาไรซ์ อย่างใดอย่างหนึ่งออกอากาศจากสายอากาศ และทำการตรวจสอบจากการทดสอบว่าได้คลื่นที่มีโพลาไรซ์ตามที่ต้องการหรือไม่ นอกจากนี้การวัดโพลาไรซ์ของคลื่นก็ทำให้รู้สภาพของคลื่นที่บริเวณที่สนใจว่ามีโพลาไรซ์อยู่ในรูปใด ในกรณีแรกนั้นจะมีความจำเป็นอย่างมาก ถ้าเราต้องการใช้โพลาไรซ์ตั้งฉากกันในการส่งสัญญาณคนละช่องกันโดยใช้สายอากาศตัวเดียวกัน เช่น ในระบบไมโครเวฟซึ่งมีการใช้โพลาไรซ์ในแนวขนานกับพื้นโลกและใน

แนวตั้งฉากกับพื้นโลก ในการส่งสัญญาณคนละช่องกัน การใช้งานในลักษณะนี้สายอากาศจะต้องสร้างโพลาไรซ์ตรงตามที่ถูกกระตุ้น เช่น ถ้าถูกกระตุ้นด้วยโพลาไรซ์แบบขนานกับพื้นโลกจากพีดอร์น ก็ควรส่งคลื่นที่มีโพลาไรซ์ขนานกับพื้นโลกออกไปเท่านั้น ถ้ามีคลื่นที่มีโพลาไรซ์แนวตั้งฉากกับพื้นโลกออกไปด้วย คลื่นนั้นก็จะเป็คลื่นรบกวนของโพลาไรซ์ในแนวตั้งฉากของอีกของสัญญาณหนึ่ง เราเรียกคลื่นที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับที่ต้องการนี้ว่าโพลาไรซ์ในแนวตั้งฉากกับที่ต้องการ การวัดโพลาไรซ์ของคลื่นส่วนใหญ่จะเป็นการตรวจสอบอัตราส่วนของโพลาไรซ์นี้ ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่บ่งบอกคุณสมบัติของสายอากาศในเชิงการสร้างโพลาไรซ์

วิธีการทดสอบโพลาริซ์ของคลื่น นี้จะทำได้โดยใช้สายอากาศที่รับคลื่นมีกรโพลาริซ์แบบเส้นตรง เช่น สายอากาศแบบไดโพลและสายอากาศแบบฮอร์นรูปพีระมิด การวัดโพลาก็ทำได้โดยนำสายอากาศดังกล่าวรับคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามา แล้วหมุนสายอากาศนั้นรอบตัวเองดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 ขนาดของสนามไฟฟ้าที่วัดมุมต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับโพลาริซ์ของคลื่นนั้น รูปที่ 2.17 แสดงสนามไฟฟ้าที่วัดได้ในกรณีที่โพลาริซ์ของคลื่นเป็นแบบวงรีที่ทำมุมกับพื้นโลก อัตราส่วนของแกนหลักของวงรี  $r$  จะได้เป็น

$$r = \left| \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \right|$$



รูปที่ 2.9 การทดสอบโพลาริซ์ของคลื่นโดยใช้สายที่มีโพลาริซ์เป็นเส้นตรง

ถ้าโพลาริซ์ของคลื่นเป็นแบบวงกลม  $r$  จะเท่ากับ 1 และถ้าโพลาริซ์ เป็นแบบเส้นตรง  $r$  จะเท่ากับ  $\infty$  การทดสอบที่ได้ผลตามรูปที่ 2.9 นั้นเพียงแค่ออกรูปร่างของโพลาริซ์เท่านั้นยังไม่บอกว่า เป็นแบบหมุนซ้ายหรือหมุนขวา ซึ่งจะต้องทำการวัดเฟสของคลื่น ในทิศทางตั้งฉากกันด้วยจึงจะระบุออกมาได้ว่าเป็นแบบไหน การวัดทิศทางของการหมุนนี้จะทำได้โดยอาศัยหลักการที่ว่าคลื่นที่มีโพลาริซ์แบบใดก็ตาม จะสามารถแยกออกเป็นส่วนประกอบของคลื่นที่มีโพลาริซ์ แบบวงกลมหมุนขวา และแบบวงกลมหมุนซ้าย ดังนั้นการวัดนั้นจะทำได้โดยใช้สายอากาศแบบโพลาริซ์เชิงวงกลม เช่น สายอากาศแบบครอสดีไดโพล และแบบเอลิกซ์เป็นต้น โดยใช้แบบที่รับคลื่นวงกลมหมุนขวา และรับคลื่นวงกลมหมุนซ้ายมาวัด ทั้งคู่ แล้วพิจารณาจากค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ถ้า  $|E_H|$  และ  $|E_V|$  เป็นขนาดของสนามไฟฟ้าที่วัดได้สำหรับแบบ หมุนขวาและ แบบหมุนซ้ายตามลำดับ อัตราส่วนของแกนหลักของวงรี  $r$  จะคำนวณได้ดังนี้คือ

$$r = \frac{|E_R| + |E_I|}{|E_R| - |E_I|} \quad (2.62)$$

ในขณะที่เดียวกันก็จะได้ว่าถ้า  $|E_R|$  ใหญ่กว่า  $|E_I|$  คือ  $r$  เป็นบวกคลื่นนั้นก็จะ เป็นแบบหมุนขวา และ ถ้า  $|E_R|$  เล็กกว่า  $|E_I|$  คลื่นนั้นจะเป็นแบบหมุนซ้าย ในกรณีพิเศษที่คลื่นนั้นมีโพลาไรซ์แบบวงกลมก็จะมี เฉพาะ  $|E_R|$  หรือ  $|E_I|$  เท่านั้น และ  $r$  จะมีค่าเป็น 1 หรือ -1 สำหรับกรณีที่เป็นโพลาไรซ์แบบเส้นตรง เนื่องจาก  $|E_R| = |E_I|$  ดังนั้น  $r$  จะเป็น  $\infty$  และคลื่นนั้นไม่มีการหมุน จะมีแต่การแกว่งในแนวเส้นตรง เท่านั้น รูปที่ 2.18 แสดงการแยกส่วนประกอบของโพลาไรซ์ แบบวงกลมหมุนขวาและซ้ายในคลื่น ที่มีโพลาไรซ์แบบต่าง ๆ



(ก) กรณีของโพลาไรซ์แบบตรง

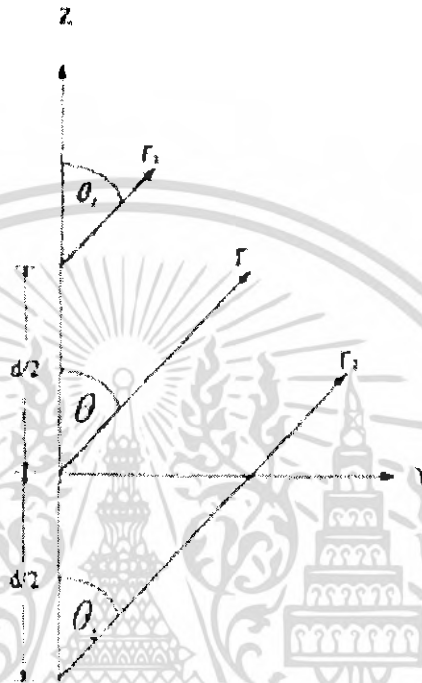
(ข) กรณีของโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนขวา

รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของโพลาไรซ์แบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้ายของคลื่นที่มีโพลาไรซ์แบบต่าง ๆ

## 2.14 ตัวประกอบแถวลำดับ (Array factor)

เนื่องจากรูปแบบของสายอากาศเพียงองค์ประกอบเดียวไม่สามารถจะให้ค่าสภาพการชี้ทิศทางและค่าอัตราขยาย ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบสายอากาศให้มีค่าตามที่ต้องการมาก ๆ ได้ ดังนั้น วิธีการหนึ่งที่จะทำให้ค่าสภาพการชี้ทิศทางและค่าอัตราขยายให้มีค่ามากขึ้นได้ คือ การจัดรูปแบบของสายอากาศให้เป็นแถวลำดับ ซึ่งเป็นการนำสายอากาศตั้งแต่สององค์ประกอบขึ้นไปมาจัดเรียงในรูปแบบต่างๆ แต่รูปแบบที่ได้นั้นต้องมีความเหมาะสมที่จะทำให้สนามที่แพร่กระจายออกจากตัวสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเกิดการเสริมกันในทิศทางที่ต้องการและหักล้างกันในทิศทางที่ไม่ต้องการ ในการจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้นมีหลายแบบด้วยกัน

เพื่อให้ง่ายในการพิจารณาเริ่มแรกจะพิจารณาจากสายอากาศไดโพลสององค์ประกอบ ที่วางอยู่ในแนวแกน  $z$  ดังรูป เมื่อทำการสังเกตที่สนามระยะไกล ( $r \rightarrow \infty$ ) จะให้จุดอ้างอิงอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างสายอากาศทั้งสององค์ประกอบจะได้ว่า



รูปที่ 2.11 สายอากาศไดโพลสององค์ประกอบที่วางบนแกน  $Z$

$$\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta$$

$$r_1 = r - \frac{d}{2} \cos \theta$$

$\Rightarrow$

สำหรับการแปรผันของเฟส

$$r_2 = r + \frac{d}{2} \cos \theta$$

$$r_1 \approx r_2 \approx r \Rightarrow$$

สำหรับการแปรผันของขนาด

ซึ่งที่จุดจะได้สนามรวมในการแพร่กระจายคลื่นของไดโพลสององค์ประกอบเป็นดังนี้

$$\bar{E} = \hat{a}_0 j \eta \frac{k I_0 l}{4\pi} \left\{ \frac{e^{i[k\eta - \frac{\beta}{2}]} }{r_1} |\cos \theta_1| + \frac{e^{i[k\eta - \frac{\beta}{2}]} }{r_2} |\cos \theta_2| \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \hat{a}_0 j \eta \frac{kI_0 l}{4\pi} \cos \theta_2 \frac{1}{r} \left\{ e^{-jkr + jk \frac{d}{2} \cos \theta + \frac{j\beta}{2}} + e^{-jkr - jk \frac{d}{2} \cos \theta + \frac{j\beta}{2}} \right\} \quad (2.63)$$

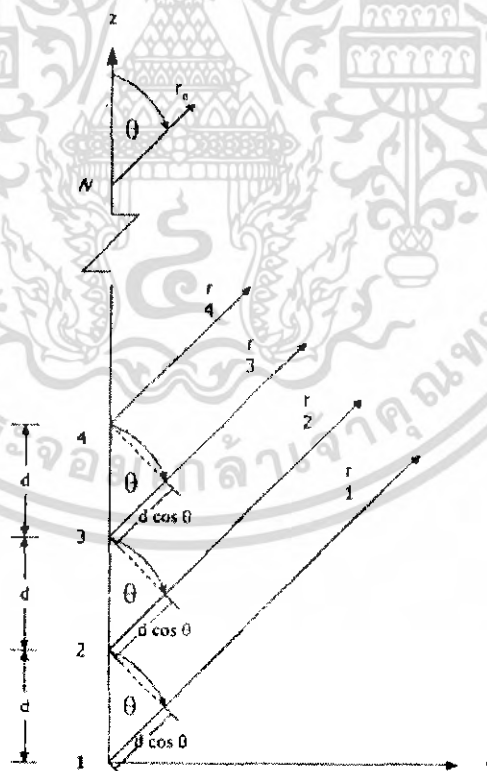
$$\bar{E}_1 = \hat{a}_0 j \eta \frac{kI_0 l}{4\pi} \cos \theta_2 \frac{1}{r} e^{-jkr} \left[ e^{j \frac{(kd \cos \theta + \beta)}{2}} + e^{-j \frac{(kd \cos \theta - \beta)}{2}} \right] \quad (2.64)$$

เมื่อ  $\beta$  คือความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

จากสมการจะพบว่า สนามรวมในการแพร่กระจายคลื่นของไดโพลสององค์ประกอบ จะมีค่าเท่ากับสนามของไดโพลหนึ่งองค์ประกอบ คูณอยู่กับพจน์ ๆ หนึ่ง ซึ่งพจน์ นี้ถูกเรียกว่าเป็น ตัวประกอบแฉก ลำดับ ซึ่งเราจะได้พจน์ของตัวประกอบแฉกลำดับ คือ

$$AF = e^{j \frac{(kd \cos \theta + \beta)}{2}} + e^{-j \frac{(kd \cos \theta - \beta)}{2}} \quad (2.65)$$

ต่อไปจะพิจารณาจากสายอากาศไดโพล N องค์ประกอบที่วางอยู่ในแนวแกน z โดยเริ่มที่ ตำแหน่ง  $z=0$  และจากการสังเกตที่สนามระยะไกล โดยให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเป็น  $d$  ดังรูป จะได้ว่า



รูปที่ 2.12 สายอากาศไดโพล N องค์ประกอบ ที่วางอยู่บนแกน z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_N \approx \theta_{N-1} \approx \dots \approx \theta_3 \approx \theta_2 \approx \theta_1 \approx \theta$$

$$r_2 = r_1 - d \cos \theta$$

$$r_3 = r_1 - 2d \cos \theta$$

⇒ สำหรับการแปรผันของเฟส

$$r_N = r_1 - (N-1)d \cos \theta$$

$$r_1 \approx r_2 \approx r_3 \approx \dots \approx r_N$$

⇒ สำหรับการแปรผันของขนาด

จากสมการรวมของสายอากาศไดโพลสององค์ประกอบ จะได้สมการรวมของสายอากาศไดโพล N องค์ประกอบได้ดังนี้

$$\bar{E}t = \hat{a}_\theta j \eta \frac{kI_0}{4\pi} \left[ \frac{e^{-j(kr_1-\beta)}}{r_1} |\cos \theta_1| + \frac{e^{-j(kr_2-\beta)}}{r_2} |\cos \theta_2| + \dots + \frac{e^{-j(kr_N-\beta)}}{r_1} |\cos \theta_1| \right] \quad (2.65)$$

โดยกำหนดให้ความต่างเฟสของกระแส ( $\beta$ ) ที่ป้อนให้กับสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเป็นแบบ (Progressive phase) คือเฟสของกระแสในสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ จะนำหน้าเฟสของกระแสในสายอากาศที่อยู่ก่อนหน้าในแถวลำดับเดียวกัน

เมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกล จะได้ว่า

$$\bar{E}t = \hat{a}_\theta j \eta \frac{kI_0}{4\pi} |\cos \theta_1| \left[ e^{-j(kr_1-\beta)} + e^{-j(kr_2-\beta)} + \dots + e^{-j(kr_N-\beta)} \right] \quad (2.66)$$

เนื่องจากที่  $r_1$  เรากำหนดให้เป็นจุดอ้างอิงที่  $z=0$  ดังนั้นจะได้ว่าความต่างเฟสของกระแสในส่วนของ  $r_1$  มีค่าเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นจากสมการรวม  $E_1$  จะได้ว่า

$$\bar{E}t = \hat{a}_\theta j \eta \frac{kI_0}{4\pi} \frac{1}{r} |\cos \theta_1| e^{jkr_1} \left[ 1 + e^{-j(kd \cos \theta + \beta)} + \dots + e^{-j(N-1)(kd \cos \theta + \beta)} \right] \quad (2.67)$$

ถ้าพิจารณาในพจน์ของตัวประกอบแถวลำดับ จะได้ว่า

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{-j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2.68)$$

$$= \sum_{n=1}^N e^{-j(n-1)\Psi} \quad ; \Psi = kd \cos \theta + \beta \quad (2.69)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้รูปแบบของตัวประกอบแถวลำดับ เรียงง่ายขึ้น สามารถทำได้โดยทำการคูณทั้งสองข้างของสมการที่ 2.41 กับ  $e^{j\psi}$  ทำให้ได้ว่า

$$AF.e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{jN\psi} \quad (2.70)$$

นำสมการที่ 2.70 ลบกับสมการที่ 2.69 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} AF(e^{j\psi} - 1) &= -1 + e^{jN\psi} \\ AF &= \frac{-1 + e^{jN\psi}}{(e^{j\psi} - 1)} \\ AF &= e^{j\frac{(N-1)\psi}{2}} \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right] \end{aligned} \quad (2.71)$$

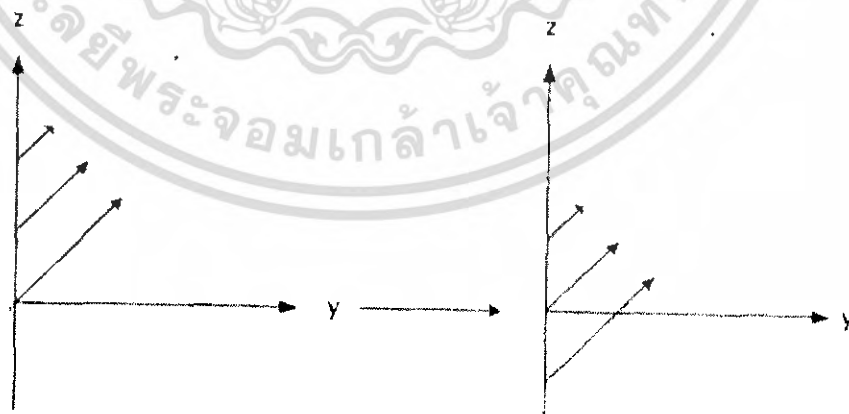
เมื่อ N คือจำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ

ดังนั้นจากสมการที่ 2.71 ก็คือ รูปแบบอย่างง่ายที่สามารถแทนค่าจำนวนสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบที่แสดงในสมการที่ 2.69 ซึ่งจะให้ค่าที่เท่ากัน

ต่อไปเราจะกำหนดให้จุดอ้างอิงอยู่ที่กึ่งกลางของสายอากาศที่มีอยู่ทั้งหมด N องค์ประกอบ ซึ่งแบ่งการพิจารณาได้ 2 กรณี คือ

1. เมื่อ N เป็นจำนวนคี่

เราจะได้จุดอ้างอิงตรงกับตำแหน่งของสายอากาศที่จะแบ่งสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบ ในแนวแกน +z และ -z อย่างละ N-1/2 องค์ประกอบ เช่น N=3 ก็จะแบ่งสายอากาศออกในแนวแกน +z และ -z อย่างละ 1 องค์ประกอบ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.13 การกำหนดจุดอ้างอิงให้อยู่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดที่เป็นจำนวนคี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.69 เมื่อทำการคิดที่สนามระยะไกล จะได้ว่า

$$AF = 1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi} + e^{-j\psi} + e^{-j2\psi} + \dots + e^{-j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi}$$

จากนั้น ทำการคูณทั้งสองข้างของสมการที่ 2.72 ด้วย  $e^{j\frac{\psi}{2}}$  และ  $e^{-j\frac{\psi}{2}}$  จะได้ว่า

$$AF = \left( e^{j\frac{\psi}{2}} - e^{-j\frac{\psi}{2}} \right) = e^{j\frac{N}{2}\psi} - e^{-j\frac{N}{2}\psi}$$

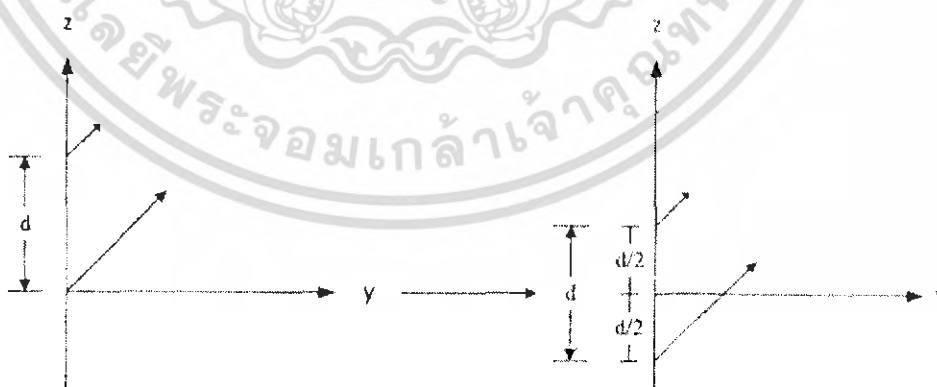
$$AF = \frac{e^{j\frac{N}{2}\psi} - e^{-j\frac{N}{2}\psi}}{e^{j\frac{\psi}{2}} - e^{-j\frac{\psi}{2}}}$$

$$\therefore AF = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)}$$

เมื่อ N องค์ประกอบ คือจำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ

2. N เป็นจำนวนคู่

เราจะได้จุดอ้างอิงตรงกับตำแหน่งของสายอากาศที่จะแบ่งสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบ ในแนวแกน +z และ -z อย่างละ (N-1)/2 องค์ประกอบเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 แต่ต่างกันตรงที่ ระยะห่างระหว่างจุดอ้างอิงกับสายอากาศองค์ประกอบแรก ทั้งในแนวแกน +z และ -z จะมีค่าเป็น d/2 ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 การกำหนดจุดอ้างอิงให้อยู่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดที่เป็นจำนวนคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.69 เมื่อคิดที่สนามระยะไกล จะได้ว่า

$$AF = e^{j\frac{\psi}{2}} + e^{j\frac{3\psi}{2}} + \dots + e^{j\frac{(N-1)\psi}{2}} + \dots + e^{-j\frac{3\psi}{2}} + e^{-j\frac{(N-1)\psi}{2}} \quad (2.72)$$

จากนั้นทำการคูณทั้งสองข้างของสมการที่ 2.73 ด้วย  $e^{j\frac{\psi}{2}}$  และ  $e^{-j\frac{\psi}{2}}$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} AF &= \left( e^{j\frac{\psi}{2}} - e^{-j\frac{\psi}{2}} \right) = e^{j\frac{N\psi}{2}} - e^{-j\frac{N\psi}{2}} \\ AF &= \frac{e^{j\frac{N\psi}{2}} - e^{-j\frac{N\psi}{2}}}{e^{j\frac{\psi}{2}} - e^{-j\frac{\psi}{2}}} \\ \therefore AF &= \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \end{aligned} \quad (2.73)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ  
ซึ่งจะพบว่าไม่ว่า  $N$  จะเป็นจำนวนคี่หรือจำนวนคู่ ค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ได้จะ  
เหมือนกัน ดังนั้น การทำแถวลำดับของสายอากาศ  $N$  องค์ประกอบตามแกน  $z$  และให้จุดอ้างอิงอยู่  
กึ่งกลางของสายอากาศ  $N$  ตามแนวแกน  $z$  และให้จุดอ้างอิงอยู่กึ่งกลางของสายอากาศ  $N$  องค์ประกอบ จะได้  
ค่าตัวประกอบแถวลำดับ คือ

$$AF = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (2.74)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ  
จากการสังเกตที่สนามระยะไกลดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะพบว่า สามารถแสดง  
รูปแบบของตัวประกอบแถวลำดับได้ใหม่ ดังนี้

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{-j(n-1)(kl \cos \gamma + \beta)} \quad (2.75)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{n=1}^N a_n e^{-j(n-1)\psi} \quad ; \psi = kd \cos \gamma + \beta \quad (2.76)$$

โดย  $a_n$  คือ แอมพลิจูดของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ  
 $\gamma$  คือ ค่าระหว่างแกนที่องค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบถูกนำมาจัดเรียงกันเป็นแถวลำดับ  
 จากรูปแบบของตัวประกอบแถวลำดับนี้ สามารถแสดงตัวประกอบแถวลำดับเมื่อ  
 องค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบจัดเรียงกันในแนว แกน x y z ได้ดังนี้

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{-j(n-1)(kd \cos \gamma + \beta)} \quad (2.77)$$

สามารถหา  $\gamma$  ได้จาก การคูณแบบ จุด (Dot product) ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector)  
 ในทิศทางของจุดสังเกต สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \hat{a}_z \cdot \hat{a}_r &= |\hat{a}_z| |\hat{a}_r| \cos \gamma = \cos \gamma \\ \therefore \cos \gamma &= \hat{a}_z \cdot \hat{a}_r \\ &= \hat{a}_z \cdot \{ \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta \} \\ &= \cos \theta \\ \therefore \gamma &= \theta \end{aligned}$$

ได้ว่า

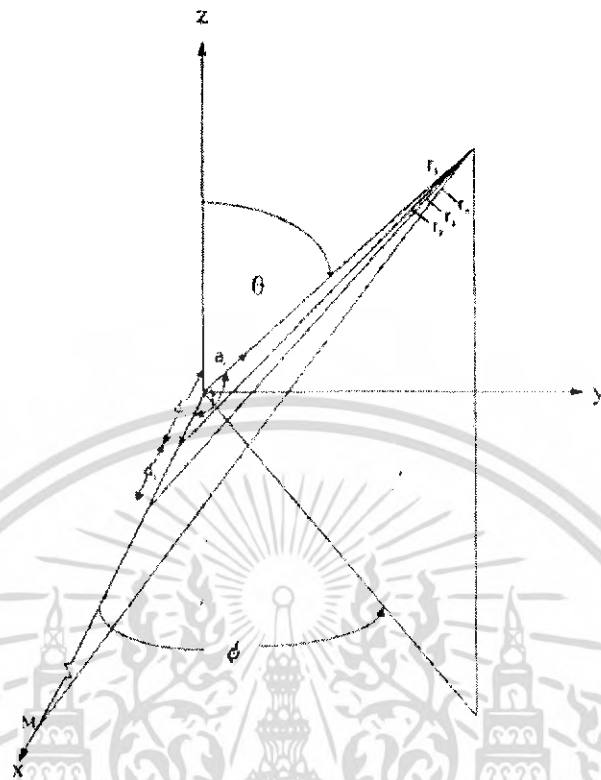
$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{-j(n-1)(kd \cos \gamma + \beta)} \quad (2.78)$$

ถ้าให้  $\hat{a}_z$  มีค่าเท่ากับ 1 ในสายอากาศทุกๆ องค์ประกอบ จะพบว่าตัวประกอบแถวลำดับที่  
 แกน z

ดังนั้น เราจะใช้ตัวประกอบแถวลำดับรูปแบบนี้ในการหาตัวประกอบแถวลำดับของ  
 สายอากาศที่วางตามแกน x และ y ต่อไป

2. กรณีวางตามแกน x

สามารถแสดงการจัดวางได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 การจัดวางสายอากาศแถวลำดับจำนวน  $M$  องค์ประกอบบนแกน  $x$

จาก

$$AF_x = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(n-1)(kd \cos \gamma + \beta)}$$

$$\therefore \cos \gamma = \hat{a}_z \hat{a}_r$$

$$= \hat{a}_z \{ \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta \}$$

$$\therefore \gamma = \cos^{-1}(\sin \theta \cos \phi)$$

ถ้าให้  $\hat{a}_r$  มีค่าเท่ากับ 1 อากาศทุกๆ องค์ประกอบจะได้ว่า

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(n-1)(kd \sin \theta \cos \phi + \beta)} \quad (2.79)$$

จัดรูปใหม่โดยให้  $\psi_x = (kd \sin \theta \cos \phi + \beta)$  ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 AF_x &= \frac{e^{jM\psi_x} - 1}{e^{j\psi_x} - 1} \\
 &= \frac{e^{j\frac{M}{2}\psi_x} \left( e^{j\frac{M}{2}\psi_x} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_x} \right)}{e^{j\frac{M}{2}\psi_x} \left( e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}} \right)} \\
 \therefore AF &= e^{j\frac{M-1}{2}\psi_x} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \quad (2.80)
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $M$  คือจำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน  $x$  แต่โดยทั่วไปแล้ว เราจะกำหนดจุดอ้างอิงไว้ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดในแถวลำดับ จากกรณีของแถวลำดับในแกน  $z$  จะพบว่า ไม่ว่าจะมียังจำนวนสายอากาศเป็นจำนวนคี่หรือจำนวนคู่ในแถวลำดับ ก็จะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเหมือนกัน ได้ว่า

$$\begin{aligned}
 AF_x \left( e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}} \right) &= e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}} \\
 AF_x &= \frac{e^{j\frac{M}{2}\psi_x} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_x}}{e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}}} \\
 \therefore AF &= \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \quad (2.81)
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $M$  คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงลำดับในแนวแกน  $x$

### 3. กรณีวางตามแกน $y$

จากสมการที่ 2.75

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(n-1)(ka \cos \gamma + \beta)}$$

$$\therefore \cos \gamma = \hat{a}_z \hat{a}_r$$

$$= \hat{a}_y \{ \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_z \cos \theta \}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore \gamma = \cos^{-1}(\sin \theta \sin \phi)$$

ถ้าให้  $\alpha_n$  มีค่าเท่ากับ  $\beta$  ในสายอากาศทุกๆ องค์ประกอบได้ว่า

$$AF_y = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \sin \gamma \sin \phi + \beta)} \quad (2.82)$$

จัดรูปใหม่ โดยให้  $\psi_y = (kd \sin \gamma \sin \phi + \beta)$  ได้ว่า

$$\begin{aligned} AF_y &= \frac{e^{jM\psi_y} - 1}{e^{j\psi_y} - 1} \\ &= \frac{e^{j\frac{M}{2}\psi_y} \left( e^{j\frac{M}{2}\psi_y} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_y} \right)}{e^{j\frac{M}{2}\psi_y} \left( e^{j\frac{\psi_y}{2}} - e^{-j\frac{\psi_y}{2}} \right)} \\ \therefore AF_y &= e^{j\frac{M-1}{2}\psi_y} \left[ \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right] \end{aligned} \quad (2.83)$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน  $y$  เมื่อกำหนดจุดอ้างอิงไว้ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศทุกองค์ประกอบในแถวลำดับจะได้

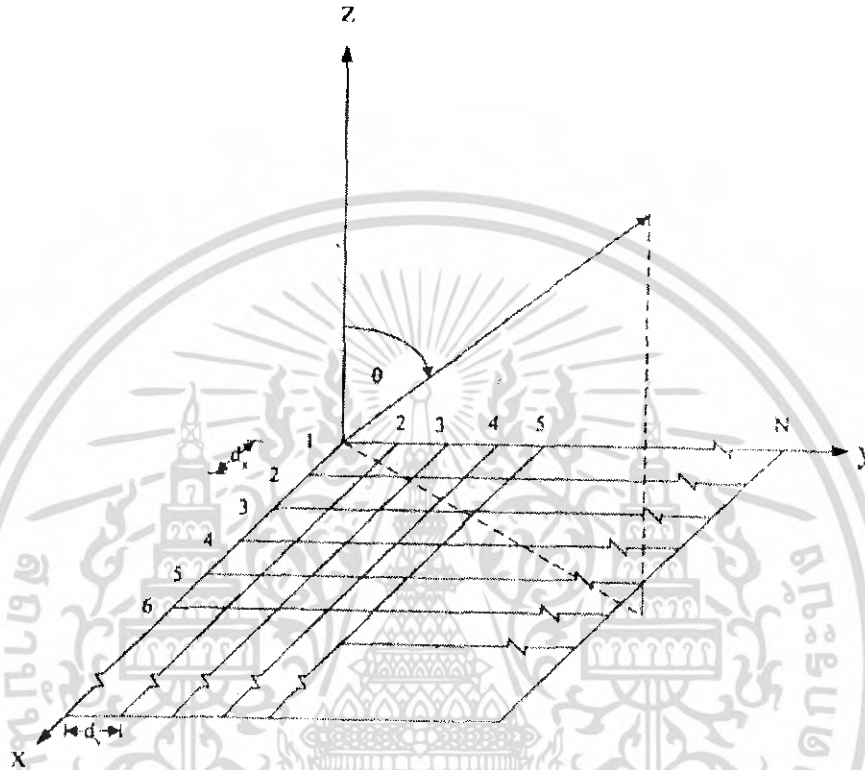
$$\begin{aligned} AF_y \left( e^{j\frac{M}{2}\psi_y} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_y} \right) &= e^{j\frac{M}{2}\psi_y} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_y} \\ AF_y &= \frac{e^{j\frac{M}{2}\psi_y} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_y}}{e^{j\frac{\psi_y}{2}} - e^{-j\frac{\psi_y}{2}}} \\ \therefore AF_y &= \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \end{aligned} \quad (2.84)$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน  $y$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. กรณีวางแบบระนาบ (planar)

คือ การวางรวมกันระหว่างแถวลำดับในแนวแกน  $x$  และลำดับในแนวแกน  $y$  โดยให้สายอากาศแต่ละองค์ประกอบในแนวแกน  $x$  มีจำนวนทั้งหมด  $M$  องค์ประกอบ แต่ละองค์ประกอบห่างกัน  $dx$  และเฟส เป็น  $\beta_x$  สามารถแสดงการจัดเรียงสายอากาศแบบระนาบ ได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.17 การจัดเรียงสายอากาศแบบระนาบ

ดังนั้น ตัวประกอบแถวลำดับที่ได้สำหรับแถวลำดับแบบระนาบ คือ การคูณกันระหว่าง ตัวประกอบแถวลำดับในแนวแกน  $x$  กับตัวประกอบแถวลำดับในแนวแกน  $y$  ได้ว่า

$$Af = AF_x \times AF_y \quad (2.85)$$

$$AF = e^{j\left(\frac{M-1}{2}\right)\psi_x} \left( \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right) e^{j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi_y} \left( \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right) \quad (2.86)$$

เมื่อพิจารณากรณีที่จุดอ้างอิงอยู่ที่กึ่งกลางของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_y\right)\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi_f}{2}\right)} \quad (2.87)$$

เมื่อ  $M$  คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน  $x$   
 $N$  คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน  $y$



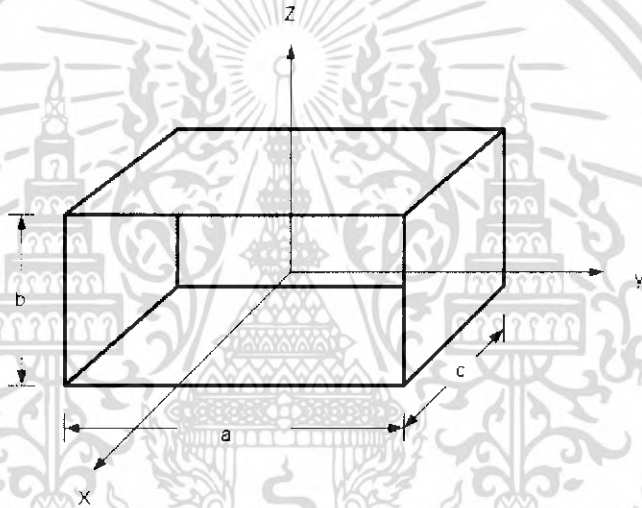
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

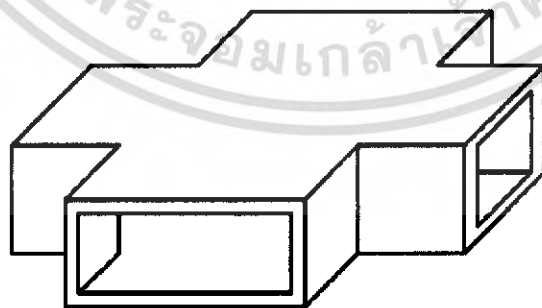
#### วิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบ

##### 3.1 โครงสร้างสายอากาศจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ลักษณะของสายอากาศสองทิศทางจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงดังรูป 3.1 ลักษณะเป็นท่อปลายเปิดสองด้าน จากรูปเป็นโครงสร้างส่วนประกอบของสายอากาศรอบทิศทางจากแถวลำดับของช่องเปิด ซึ่งจะประกอบจากท่อกลางสี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่ ชิ้นมาประกอบกัน ซึ่งเมื่อประกอบกันแล้วจะได้ลักษณะสายอากาศดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ลักษณะสายอากาศสองทิศทางจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายเปิดทั้งสองด้าน



รูปที่ 3.2 ลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด

จาก

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{a}\right)^2}} = \frac{2}{\sqrt{\frac{1}{a^2}((m)^2 + (n)^2)}} = \frac{2a}{\sqrt{(m)^2 + (n)^2}}$$

เมื่อทำการพิจารณาที่ Dominant mode จะได้ คือ  $TE_{1,0} = TE_{0,1}$  โดยที่ Higher mode คือ  $TE_{1,1}$  ที่ Dominant mode ที่  $TE_{1,0} = TE_{0,1}$  มี

$$\lambda_c = \frac{2a}{\sqrt{((1)^2 + (0)^2)}} = \frac{2a}{1} = 2a$$

และที่ Higher mode  $TE_{1,1}$  มี

$$\lambda_c = \frac{2a}{\sqrt{((1)^2 + (1)^2)}} = \frac{2a}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}a$$

ดังนั้นความกว้างของ  $a$  จะอยู่ในช่วง

$$\frac{\lambda}{2} < a < \frac{\lambda}{\sqrt{2}}$$

$$0.5\lambda < a < 0.707\lambda$$

จาก ความถี่ที่ใช้งานนั้น เท่ากับ 2.45 GHz จะได้ค่าความยาวคลื่นของความถี่ใช้งาน

$$\lambda_c = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.45 \times 10^9 \text{ s}^{-1}} = 0.1224 \text{ m}$$

จึงได้ค่า

$$0.5(0.1224 \text{ m}) < a < 0.707(0.1224 \text{ m})$$

$$0.0612 \text{ m} < a < 0.0865 \text{ m}$$

$$6.12 \text{ cm} < a < 8.65 \text{ cm}$$

จากการคำนวณ  $TE_{10}$  สามารถ คำนวณหาความยาวด้าน  $a$  และ  $b$  ส่วนด้าน  $c$  จะต้องใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กเชิงไฟฟ้าเลขรุ่นที่ 2D (NEC2D) ช่วยในการออกแบบ การคำนวณต้องคำนวณค่าความถี่ cut off เพื่อหาความยาวด้าน  $a$  และ  $b$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ  $a=2b$   
 และ  $\lambda_c=2a$   
 $f_0=1.25f_c$   
 $f_c= c/\lambda_c$

เมื่อ  $f_0$  เท่ากับ 2.45 GHz

$$f_c = 1.96 \text{ GHz}$$

$$\lambda_c = 0.153 \text{ m}$$

$$= 15.3 \text{ cm}$$

จากการคำนวณความถี่ Cut off จะได้ความยาว ด้าน a และ b ออกมา

a ประมาณเท่ากับ 7.6 cm

b ประมาณเท่ากับ 3.8 cm

จากค่าที่ได้ จะได้ ค่าความกว้างด้าน a ระหว่าง

$$6.12 \text{ cm} < a < 8.65 \text{ cm}$$

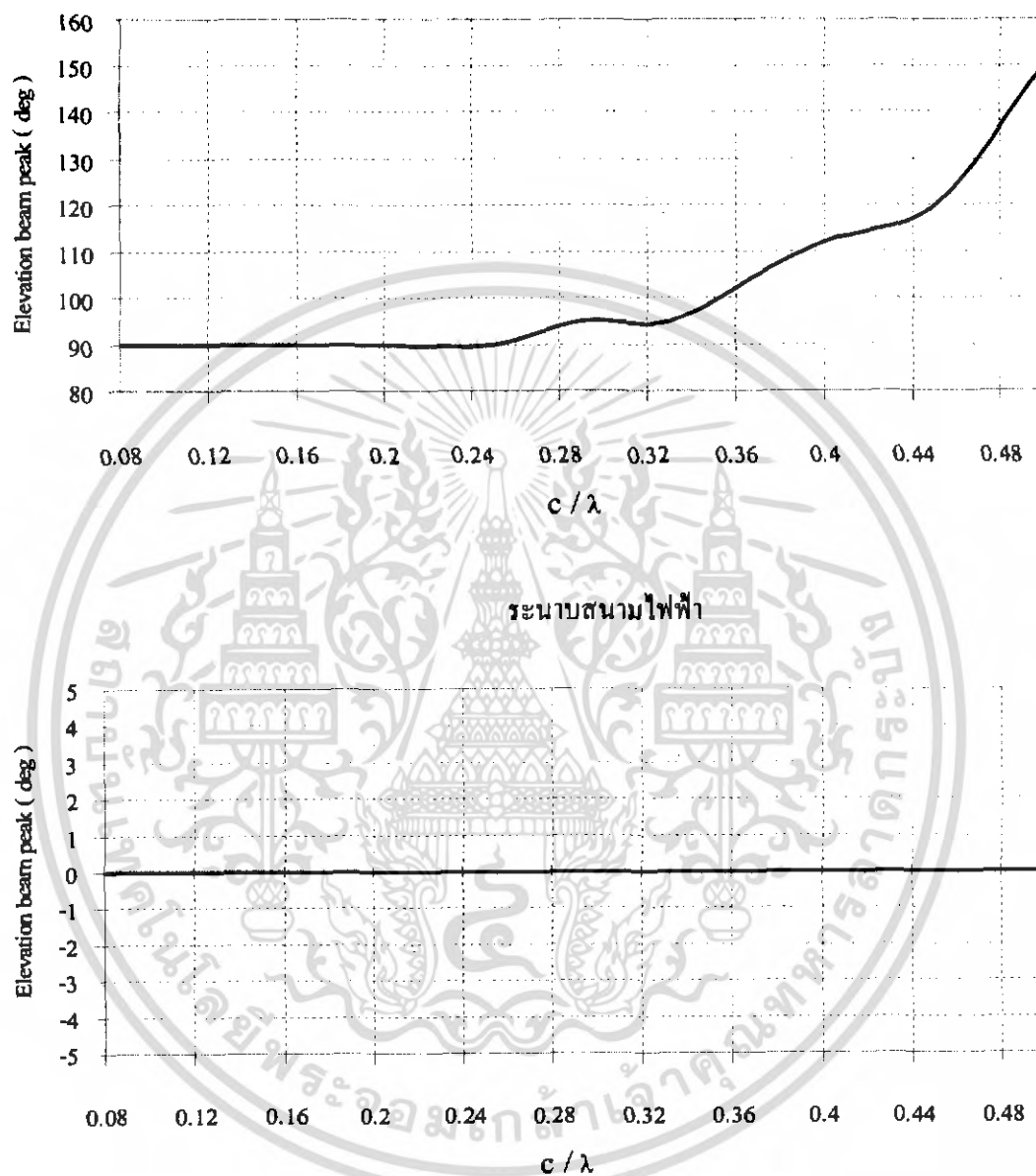
### 3.3 การเปลี่ยนแปลงความหนา ด้าน c ของสายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด

การคำนวณความหนา ด้าน c นี้จะใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กเชิงไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2D มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสม โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของท่อนำคลื่น ตั้งแต่ 2 เซนติเมตร ไปจนถึง 6 เซนติเมตร ซึ่งจากการใช้โปรแกรมพบว่า ด้านความหนา ด้าน c ซึ่งทำให้ ได้รูปแบบ แพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางที่ดีที่สุด ที่ประมาณ 2.5 cm

### 3.4 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศจากท่อนำคลื่น

การออกแบบสายอากาศจากแถวลำดับช่องเปิด จะทำการดูค่ามุมในระนาบมุมยก และระนาบมุมกวาด ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าธรรมดา ค่ามุมที่สนามไฟฟ้าสูงสุด จะต้องมีย่านเท่ากับ 90 องศา และค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามแม่เหล็กต้องเท่ากับ 0 องศา ท่อเวฟไกด์ แบบแถวลำดับช่องเปิดนี้จะต้องมีระนาบไฟฟ้าสูงสุด ทั้งสี่ มุม คือ 90 องศา แต่ระนาบสนามแม่เหล็ก ต้องมีสนามสูงสุดที่ทั้งสี่มุม คือ 0, 90, 180, 360 องศา แต่ จะพิจารณาที่ 0 องศา เท่านั้น เพราะทุกมุมจะมีสนามสูงสุด เท่ากันจากรูป แสดงค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบไฟฟ้า และระนาบแม่เหล็ก โดยจะหาความหนาของ ด้าน c

ดั่งรูป 3.2 โดยจะใช้ค่าตั้งแต่ช่วง 0.08 (1 เซนติเมตร) ถึง 0.5 (6 เซนติเมตร) ซึ่งจะพบว่าความหนาของ ค้าน c จะเท่ากับ 0.2 (2.5 เซนติเมตร)



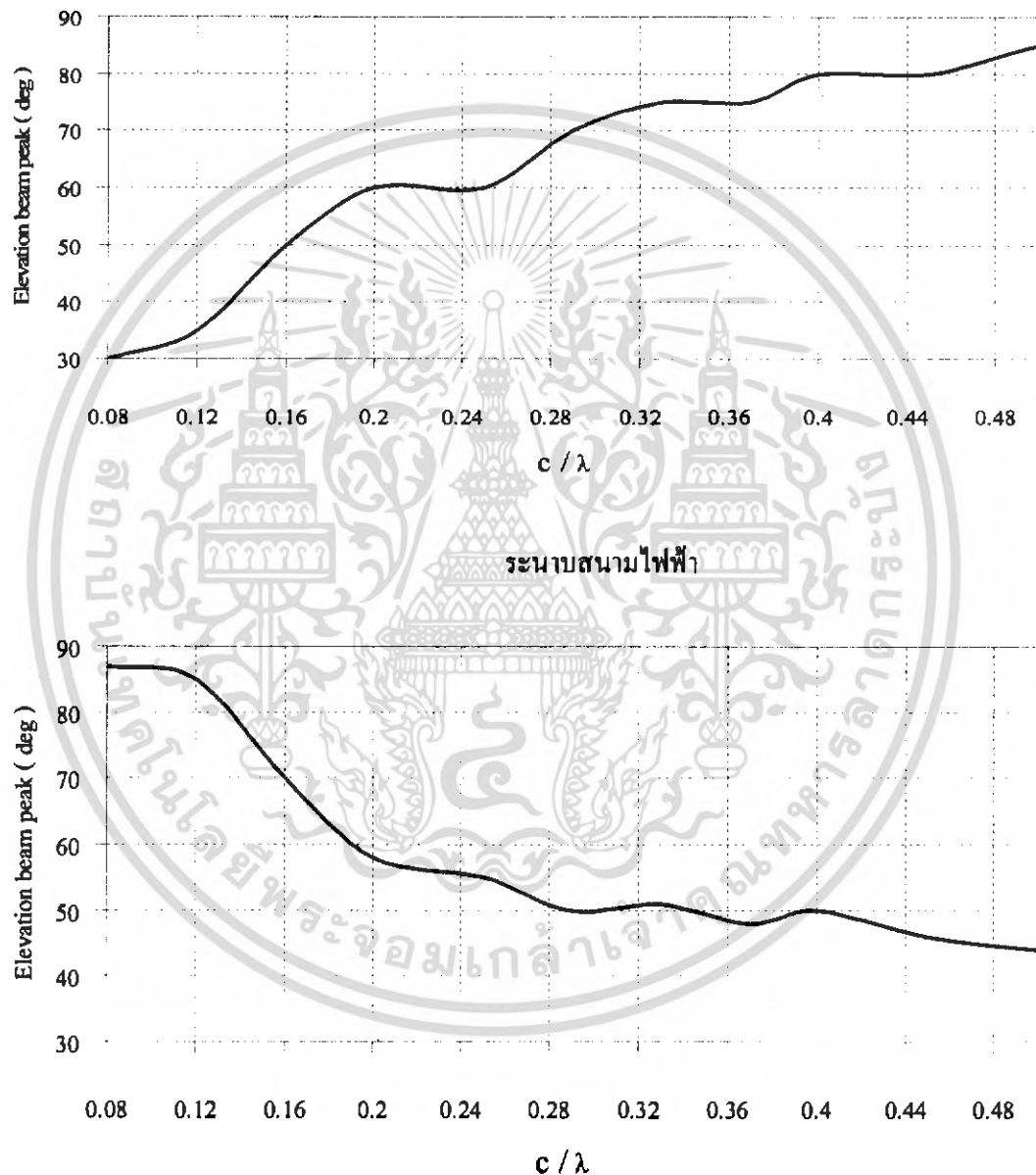
ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.3 สนามสูงสุดใระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศจากท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ค่าความกว้างที่สนามตกตงครึ่งหนึ่ง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศจากท่อนำคลื่นแฉกดำดับช่องเปิด

เป็นคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศโดยค่าความกว้างของลำคลื่น จะต้องมิลักษณะแคบ เพื่อให้ได้ทิศทางไปได้ไกล แม่นยำ และจะต้องมีการสูญเสียกำลังในทิศทางที่ไม่ต้องการที่น้อยที่สุด



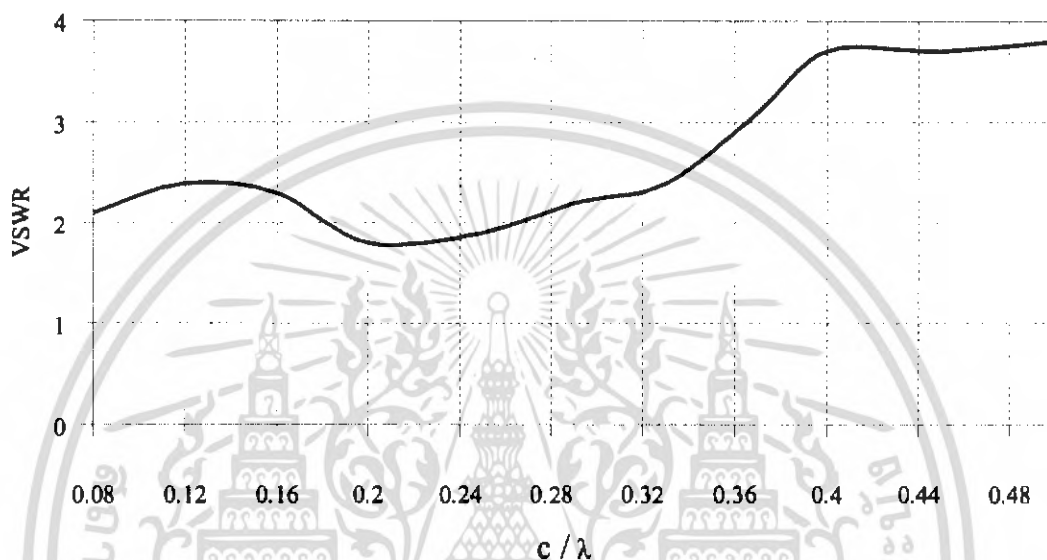
ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.4 ค่ามุมที่สนามตกตงครึ่งหนึ่งของสายอากาศจากท่อนำคลื่นแฉกดำดับช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การเปลี่ยนแปลงความหนาเมื่อดูจาก ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมซึ่ง จะเห็นได้ว่าค่า อัตราส่วนคลื่นนิ่งในท่อนำคลื่นรอบทิศทางจากแกนลำดับของช่องเปิด นั้น จะมีค่าต่ำสุด ที่ความหนาของด้าน  $c$  มีค่าเท่ากับ 0.2 (2.5 เซนติเมตร) ซึ่งมีค่าประมาณ 1.7 ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ อัตราส่วนคลื่นนิ่งนี้ ต้องมีค่าไม่เกิน 2 เพื่อที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 3.5 อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบโดย โปรแกรม NEC2D

#### สรุป

จากที่ผ่านมาได้ใช้การคำนวณ วิเคราะห์ โดยใช้ โปรแกรม NEC2D เข้ามาช่วย เพื่อให้ได้สายอากาศที่ต้องการตามความถี่ที่ใช้ เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างสายอากาศ คุณลักษณะในการวิเคราะห์คือคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ ลักษณะการแพร่กระจายคลื่น จากการวิเคราะห์จะเริ่มการคำนวณ หาขนาด ความกว้าง ความยาว เมื่อได้ขนาดก็ทำการวิเคราะห์หาค่า VSWR ที่มีค่าไม่เกิน 2 เพื่อนำไปใช้งาน ส่วน ค่าสภาพจะจางทิศทางต้องมีค่าที่มากจึงต้องทำการหาความหนาของด้าน  $c$  ที่ดีที่สุดที่ได้ค่าสภาพจะจางทิศทางที่ดีที่สุด และเพื่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งจากการคำนวณและการทดสอบด้วยโปรแกรม NEC จะได้ ด้านความยาวของท่อประมาณ 7.6 เซนติเมตร ความกว้างท่อได้ ประมาณ 3.8 เซนติเมตร ความหนาท่อ ประมาณ 2.5 เซนติเมตรการการคำนวณ และออกแบบ จะนำไปสร้าง และทดสอบ เปรียบเทียบ ต่อไป

## บทที่ 4

### การสร้าง ทดสอบ และผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

จากผลวิเคราะห์บทที่ 3 จะนำค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาข้อผิดพลาด โดยในบทนี้จะนำเสนอกรทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแบบรอบทิศทาง จากแวลวลำดับของช่องเปิด

#### 4.2 การสร้าง

จากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ได้ทำการสร้างสายอากาศแบบที่ออกแบบโดยทำงานที่ความถี่ ปฏิบัติการ เท่ากับ 2.45 GHz โดยมีขนาดของสายอากาศอย่างเหมาะสมมีขั้นตอนดังนี้คือ

1. การเลือกใช้น้ำหนักของสายอากาศให้เหมาะสมกับย่านความถี่ใช้งาน เราจะเลือกใช้สายอากาศรอบทิศทาง จากท่อนำคลื่นจากแวลวลำดับของช่องเปิด มีค่าดังนี้

1.1 ความยาวของท่อ (a) = 7.65 เซนติเมตร

1.2 ความสูงของท่อ (b) = 3.8 เซนติเมตร

1.3 ความหนาแน่น (c) ซึ่งมีค่าความหนาแน่นประมาณ 2.5 เซนติเมตร ตามการคำนวณด้วย

#### โปรแกรม

2...เลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมมาใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบสองทิศทางโดยใช้อลูมิเนียม (Aluminum) เพราะมีน้ำหนักเบา หาง่าย ราคาไม่แพงมากนัก

3.จะรู้ได้โพรงภายในสายอากาศ จะใส่ไว้บริเวณกึ่งกลางท่อเพราะจะมีสนามไฟฟ้าในโหมด  $TE_{10}$  จะมีค่ามากที่สุดตรงกลางท่อนำคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยทำการสร้าง สายอากาศให้มีคุณสมบัติดังที่กล่าวมาโดยใช้เป็นตัวส่ง

4. หาความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดสอบ จากสมการ

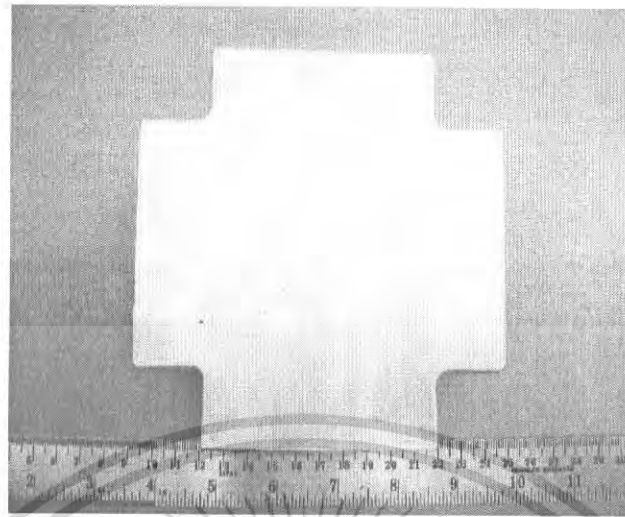
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

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

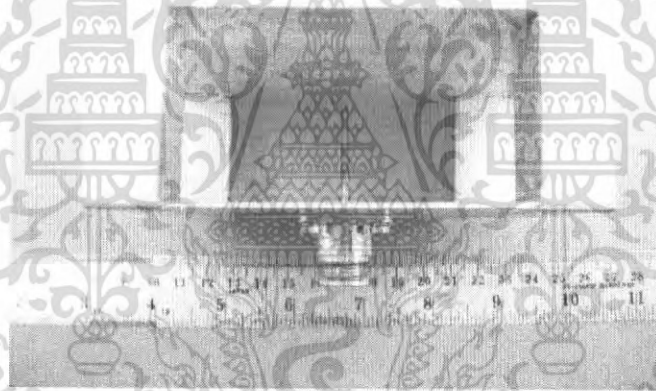
$f$  คือ ค่าความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ เท่ากับ 2.45 GHz

$\lambda = 12.24$  เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ท่อน้ำคูลื่นจากแถวลำดับของช่องเปิด ที่ใช้ในการทดสอบ



(ข) ลักษณะการต่อ คอนเนคเตอร์ กับ โพรบเข้ากับท่อน้ำคูลื่น

รูปที่ 4.1 ลักษณะของท่อน้ำคูลื่นแบบรอบทิศทางจากแถวลำดับของช่องเปิดที่ได้สร้างขึ้น

#### 4.3 การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบในโครงการนี้จะทำการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด โดยจะทำการวัดค่าและทดสอบคุณสมบัติของพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ปีมิวต์จากรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ค่าอัตราขยายของสายอากาศ การโพลาไรซ์ และการเปรียบเทียบแถบกว้างความถี่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1 การทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง อิมพีแดนซ์ และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบ ทิศรอบทิศทางจากทิศทางจากแนวลำดับของช่องเปิด

การทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง อิมพีแดนซ์และค่าการสูญเสียย้อนกลับ ของสายอากาศ แบบรอบ ทิศทางแบบแนวลำดับของช่องเปิด เนื่องจากในทางปฏิบัติจริง ๆ นั้น สายอากาศเราจะไม่สามารที่จะปรับค่า อิมพีแดนซ์ (ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากขั้วของสายอากาศ) ได้เท่ากับอิมพีแดนซ์ของเครื่องรับหรือ เครื่องส่งได้ ดังนั้น

เมื่อมีการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องรับหรือเครื่องส่ง ผลจะทำให้กำลังส่วนหนึ่ง เกิดการสะท้อนกลับ ที่จุดอินพุตของสายอากาศ ดังนั้นเพื่อเป็นการบ่งบอกแก่ผู้ทำสายอากาศ ไปใช้งานได้ว่า สายอากาศตัวนี้หาก สร้าง ไปใช้งานแล้ว จะสามารถรับกำลังที่ส่งมาได้มากน้อยเพียงใด จะสามารถบอกได้ด้วยค่าอัตราส่วนคลื่น นิ่ง

#### 4.3.2 อุปกรณ์การทดสอบ

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

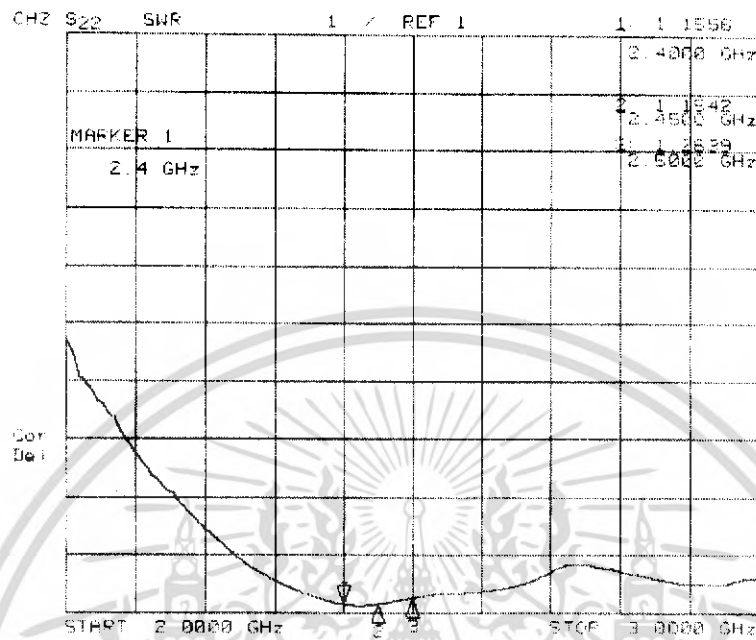
#### 4.3.3 ลำดับขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการปรับสภาวะเครื่อง 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 2.4GHz
  - 4.2 ให้ MARKER 1 อยู่ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz
  - 4.3 ให้ MARKER 3 อยู่ที่ความถี่สิ้นสุด 2.5 GHz
5. กดปุ่ม CAL (Calibrator) เลือกที่ S22 เป็นการทำการ Calibrator เครื่องโดยจะขึ้น ข้อความ OPEN, SHORT, LOAD
6. นำตัว Calibrator แบบ open มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม open แล้วทำการ ถอดตัว Calibrator ออก

7. นำตัว Calibrator แบบ short มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม short แล้วทำการถอดตัว Calibrator ออก
8. นำตัว Calibrator แบบ Broad band Load มาต่อเข้ากับสายอากาศสัญญาณแล้วกดปุ่ม Broadband และ DONE LOAD สองครั้ง ทางจอภาพจะแสดงตัวหนังสือ "COR" (Correction) แล้วทำการถอดตัว LOAD ออก
9. ทำการกดปุ่ม FORMAT จะมีเมนูให้เลือก ทำการเลือก Smith Chart
10. นำตัว Calibrator แบบ Short มาต่อเข้ากับสายนำสัญญาณอีกครั้งเพื่อทำการปรับสเกลอ้างอิงโดยทำการปรับสเกลอ้างอิงโดยทำการปรับที่ Electrical delay เลื่อนไปที่ตำแหน่งของลูกศร ไปที่ตำแหน่งซ้ายมือสุดของ Smith Chart แล้วทำการปลดตัว Calibrator ออก
11. ขั้นตอนที่ 1-10 เป็นขั้นตอนการ Calibrator เครื่อง
12. นำท่อนำคลื่นแบบรอบทิศทาง มาทำการต่อเข้ากับเครื่อง
13. กดปุ่ม FORMAT เครื่องจะแสดง LOG MAG, SMITH CHART, SWR PHASE และ DELAY
14. เลือกที่ SWR เครื่องจะแสดงค่า SWR ของท่อนำคลื่น ของท่อนำคลื่นแบบรอบทิศทาง ที่วัดออกมาได้ ถ้าค่าที่วัด ได้ยังไม่เข้าใกล้ 1.00 ให้ทำการปรับแต่งความยาวของสายโพรบสายอากาศตัวกระตุ้นจนกว่าจะได้ค่า SWR ที่เข้าใกล้ 1.00 มากที่เท่าที่จะสามารถทำได้ แล้วจากนั้นกดปุ่ม COPY เพื่อทำการพิมพ์รูปออกมา
15. ทำการเลือก LOG MAG และ SMITH CHART แล้วทำการกดปุ่ม COPY การพิมพ์รูปออกมา

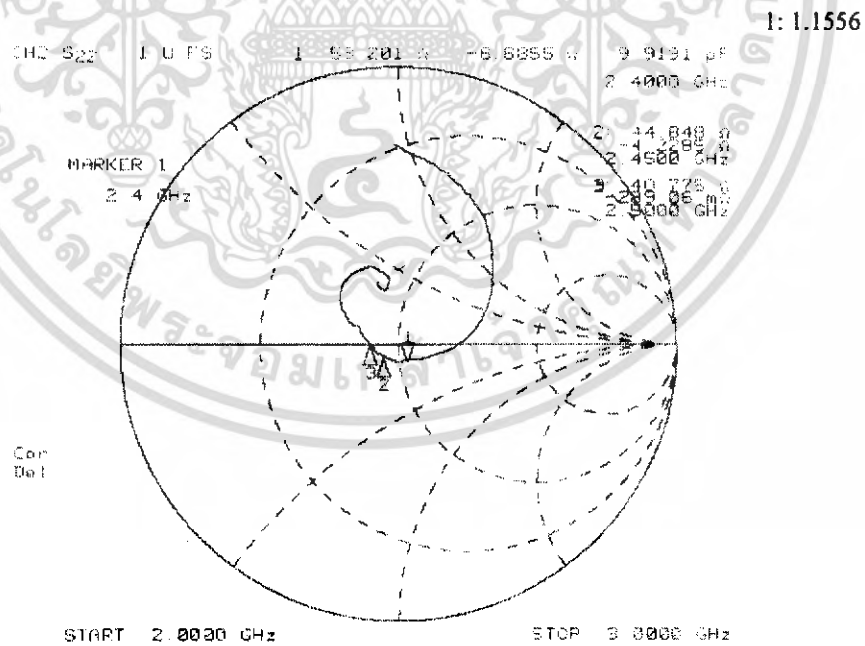
โดยทั่วไปแล้วค่า VSWR ที่ได้จะสามารถนำมาใช้งานได้ต้องไม่เกิน 2:1 มาตรฐานในงานทางวิชาการ และค่าอิมพีแดนซ์ต้องมีค่า ใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม ซึ่งเราอาจจะทำการปรับที่ค่าความยาวโพรบเพื่อให้ได้ค่า VSWR และค่าอิมพีแดนซ์ ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด

4.3.4 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์และค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ



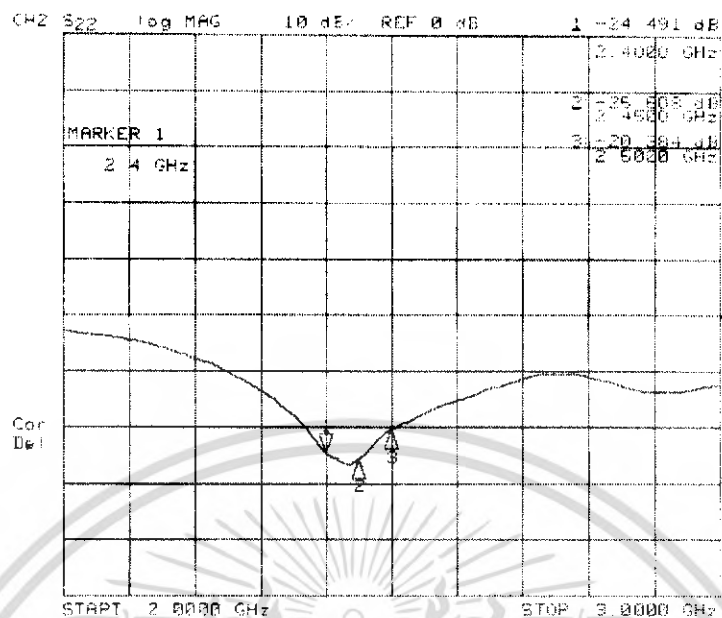
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ต่ำสุด จะอยู่ที่ 2.451 GHz ซึ่งจะ

ได้



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

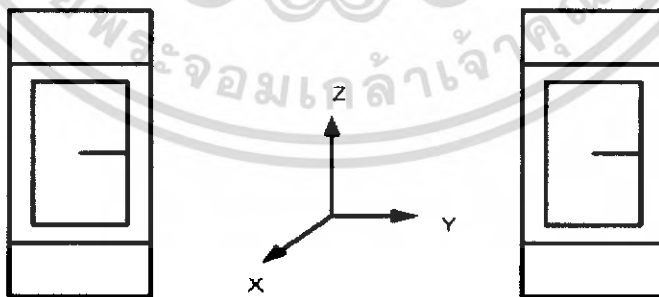


รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด

จากกราฟที่ได้จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ใช้งาน 2.45GHz มีค่าอิมพีแดนซ์  $53.2-j6.685$  โอห์ม ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ได้  $-25.8$  dB

#### 4.3.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

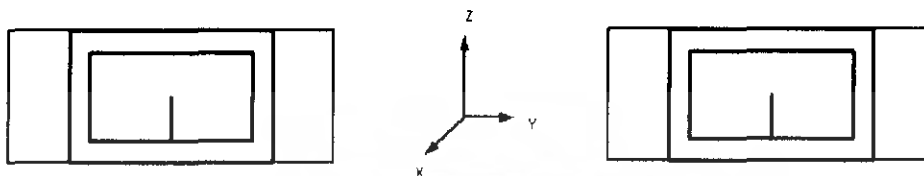
เมื่อทำการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์เสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำสายอากาศมาทดสอบหาค่าระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก โดยที่ลักษณะการวางสายอากาศเมื่อทำการวัดในระนาบ E-Plan จะเป็นดังนี้



รูปที่ 4.5 ลักษณะการวางสายอากาศเมื่อทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการวางสายอากาศเริ่มต้น โดยวางสายอากาศ เข้าหากันให้โพรบ ขนานและตรงกันและให้ห่างกันมากกว่าระยะ Far Field จากนั้นให้สายอากาศ ตัวรับหมุนไปที่ละ 10 องศาแล้วบันทึกค่า ส่วนตัวส่งนั้นให้อยู่กับที่



รูปที่ 4.6 ลักษณะการวางสายอากาศเมื่อทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามแม่เหล็ก

วางสายอากาศตัวรับและตัวส่งหันหน้าเข้าหากัน โดยโพรบตั้งตรงกัน ในทางแนวนอนและให้สายอากาศด้านรับและส่งห่างกันมากกว่าระยะสนามระยะไกล จากนั้นให้สายอากาศตัวส่งอยู่กับที่ สายอากาศรับหมุนจนครบ 360 องศา

#### 4.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่น

1. เครื่อง Network Analyzer
2. สายนำสัญญาณ
3. ขาตั้งสำหรับการติดตั้งสายอากาศจำนวน 2 ตัว
4. เครื่อง Turn table ที่ใช้ในการหมุนสายอากาศตัวรับ
5. ตัวสายอากาศ

#### 4.3.7 วิธีทดสอบ

1. ตั้งความถี่ให้กับเครื่อง Network Analyzer ด้วยความถี่ปฏิบัติการ 2.45 GHz
2. ตั้งค่า Center ที่ใช้กับความถี่ปฏิบัติการ 2.45 GHz และ SPAN ที่ 1 GHz
3. ทำการปรับ เครื่องเป็น Two port (S21)
4. ทำการ Marker ความถี่ที่ใช้งานและทำการ Calibrate menu
5. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศเข้ากับเครื่อง Network Analyzer ทั้งทางด้านรับและส่ง ซึ่งมีระยะห่างไม่น้อยกว่าระยะ สนามระยะไกล ซึ่งสามารถหาได้จาก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $D$  คือ ขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศ แต่ถ้ากรณีที่มีการทดสอบสายอากาศส่งและรับพร้อมกัน

$$D = D_s + D_r$$

โดยที่  $D_s$  คือขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศตัวส่ง

$D_r$  คือขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศตัวรับ

โดย  $D = 30$  เซนติเมตร

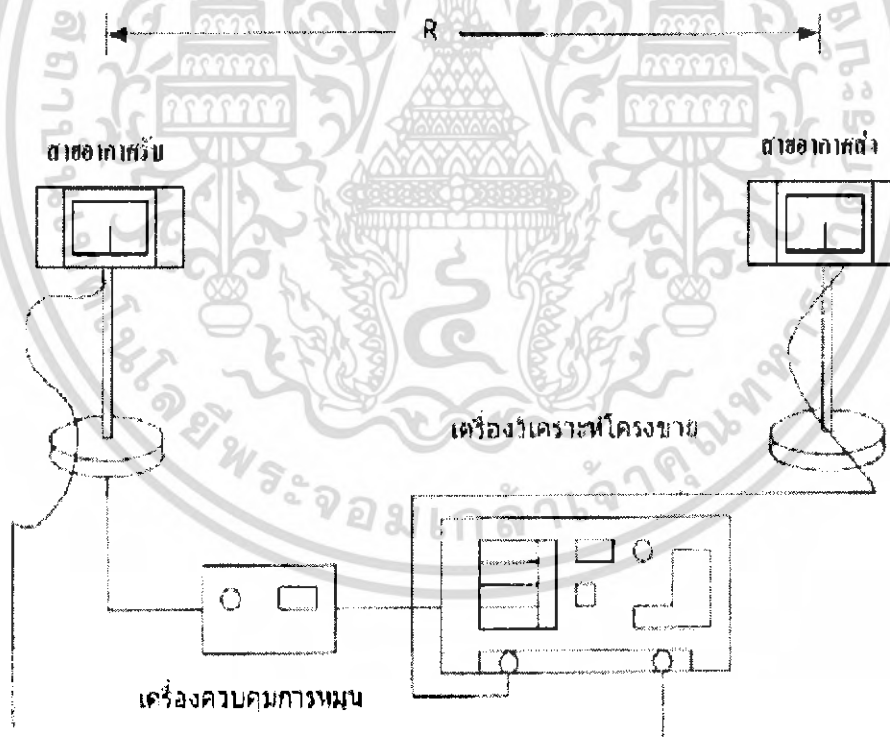
ในที่นี้ใช้ความถี่ ที่ 2.45 GHz และจะได้ค่า  $R$  ออกมา คำนึง จะได้

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

ในการทดสอบใช้ระยะห่างเท่ากับ 200 เซนติเมตร

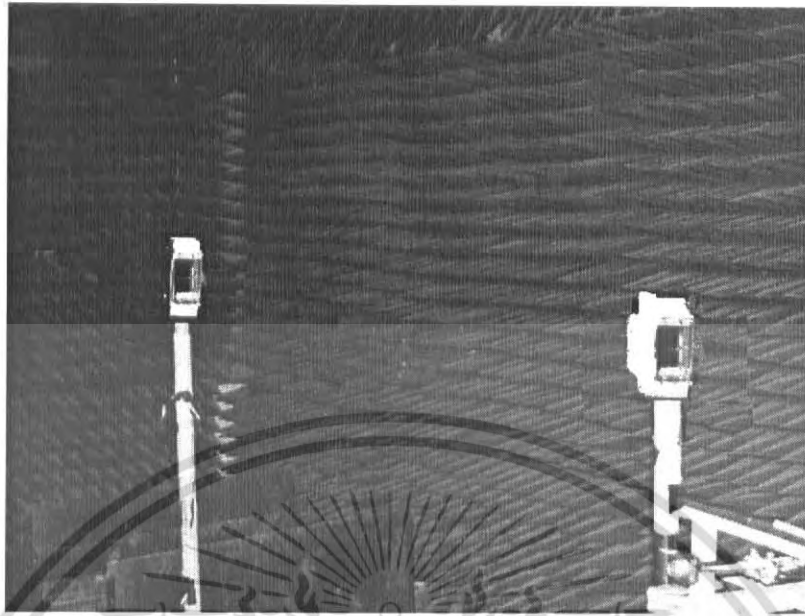
6. ทำการเขียนระนาบการทดสอบ

7. นำค่าที่ทดสอบได้ของสายอากาศแต่ละค่ามาทำการ Normalize แล้วทำการพล็อตค่าลง กราฟ

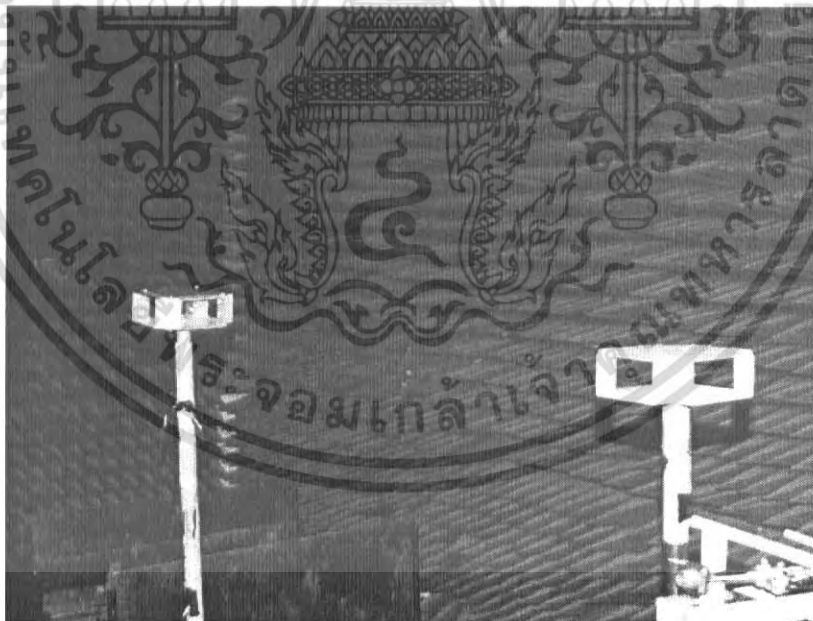


การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



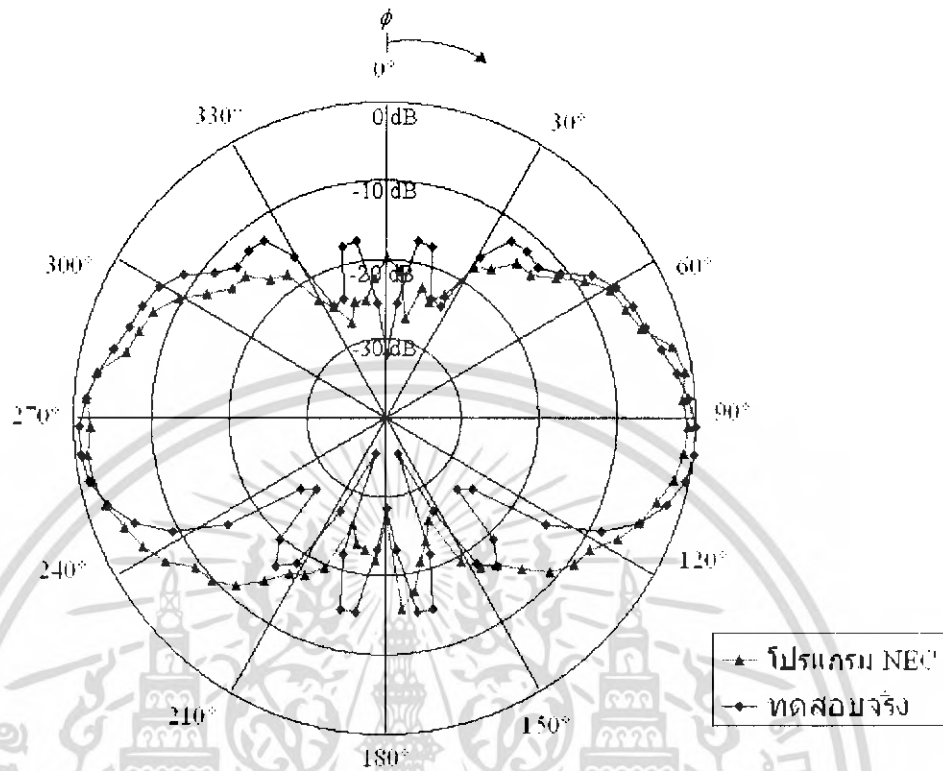
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในสนามไฟฟ้า



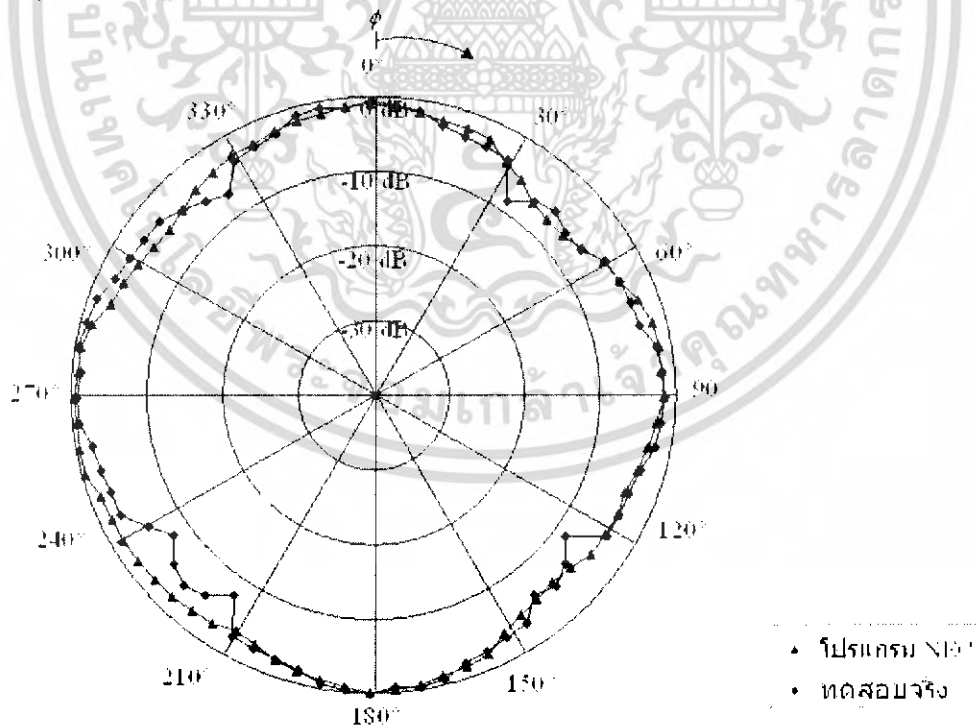
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.8 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

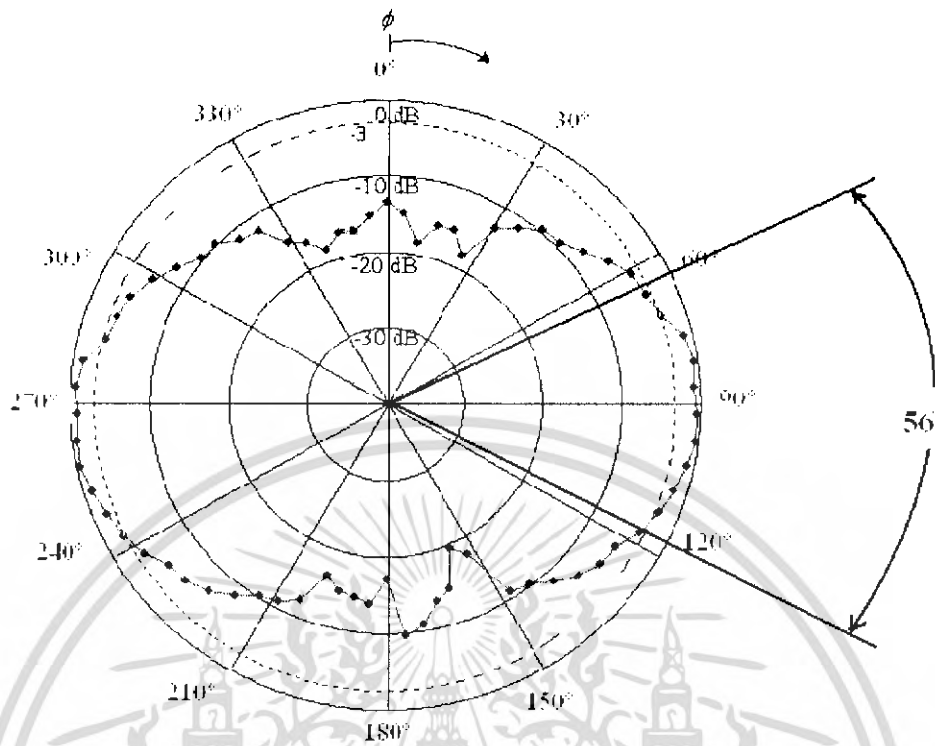
ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการคำนวณ โดยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 D กับผลการทดสอบจริง จะพบว่าสายอากาศมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นออกไป ทั้งสี่ทิศทาง การแพร่กระจายคลื่นมีลักษณะใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม โดยจะมีค่าผิดพลาดไปบ้างซึ่งเกิดขึ้นจากผลการเลี้ยวเบนของคลื่นในวัสดุที่ได้นำมาทำสายอากาศ

#### 4.3.9 การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

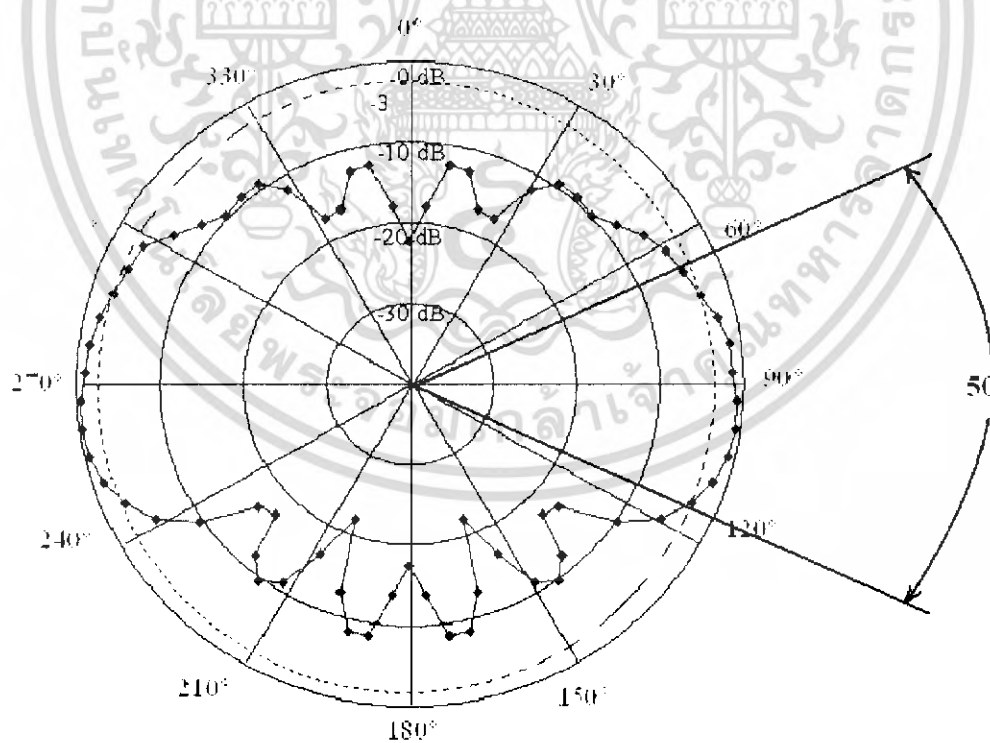
ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บอกถึง ความกว้างของโลบหลักจะเป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นใน โลบหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด คือ  $-3$  dB ซึ่งจากการวัด เพื่อดูแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตลงในกราฟที่แสดงการแพร่กระจายคลื่น สามารถนำมาหาค่าบีบอัดของสายอากาศได้ เนื่องจากการทดสอบเป็นแบบรูปการแพร่กระจายของกำลังงาน ดังนั้นจึงหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่  $-3$  dB

##### 4.3.9.1 วิธีการหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

1. การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็กจากรูปแบบของสนามแม่เหล็ก หาได้จากจุดตัดที่เกิดจากการตัดกันของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตัดกับ วงกลม  $-3$  dB จะได้จุดตัดสองจุดนำเอาค่ามุมที่ได้ทั้งสองมารวมกัน จะได้ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็ก
2. การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้าจากรูปแบบของสนามไฟฟ้า หาได้จากจุดตัดที่เกิดจากการตัดกันของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตัดกับ วงกลม  $-3$  dB จะได้จุดตัดสองจุดนำเอาค่ามุมที่ได้ทั้งสองมารวมกัน จะได้ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้า
3. นำค่ากำลังคลื่นที่ลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามแม่เหล็กและระนาบสนามไฟฟ้า มาเทียบกัน ค่ากำลังคลื่นที่ลดลงครึ่งหนึ่งที่ได้จากการคำนวณ โดย โปรแกรม



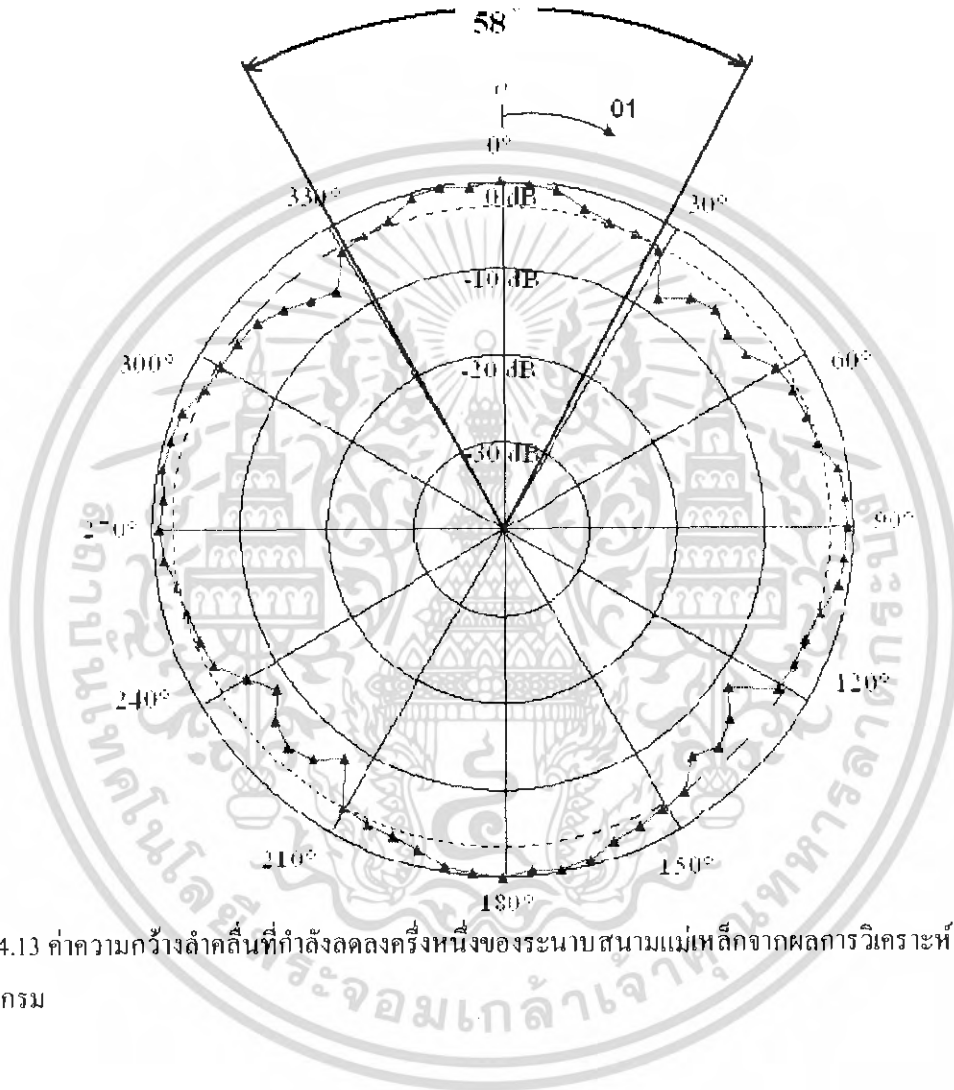
รูปที่ 4.11 การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้า ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.12 การหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้า ที่ได้จากการคำนวณ

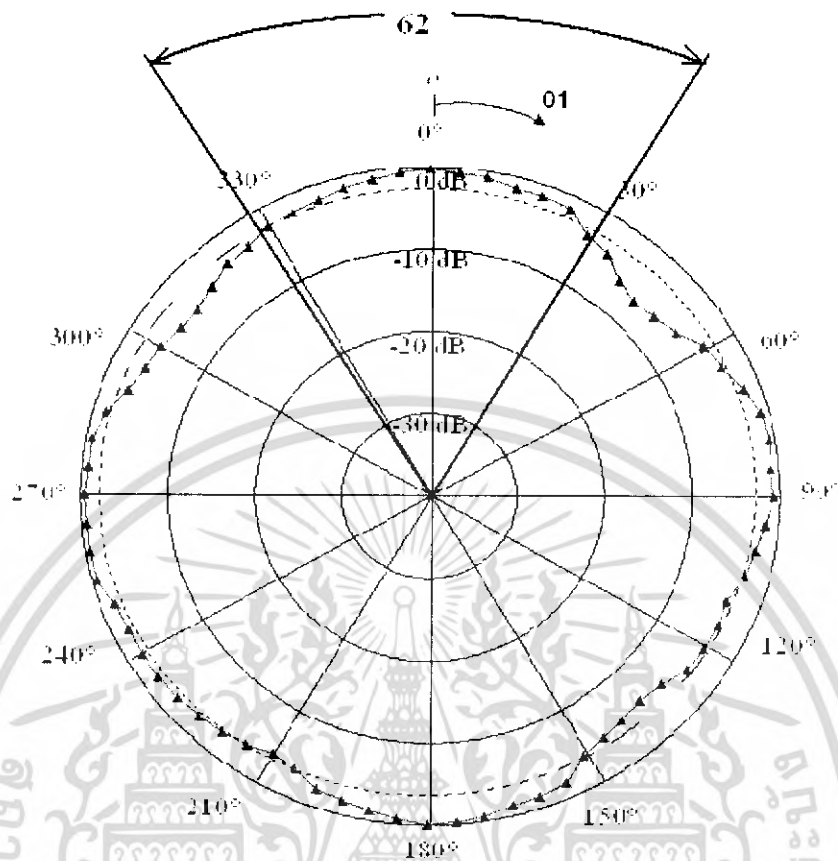
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.7 เป็นการหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้า ผลจากการทดสอบจะพบว่าสายอากาศมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ 55 องศา โดยอาศัยจากการตัดกันของแบบรูปของสนามไฟฟ้ากับวงกลม  $-3$  dB ได้ที่มุม 62 องศา และ 118 องศา และจากรูปที่ 4.8 ในระนาบสนามไฟฟ้า ผลจากการวิเคราะห์จะได้ว่าสายอากาศมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ 50 องศา โดยอาศัยจากการตัดกันของแบบรูปของสนามไฟฟ้ากับวงกลม  $-3$  dB ที่มุม 65 องศา กับ 115 องศา



รูปที่ 4.13 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็กจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการผลการทดสอบ

จากรูปที่ 4.9 เป็นการหาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็ก ผลจากการวิเคราะห์คำนวณด้วยโปรแกรมจะพบว่าสายอากาศมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ 58 องศา โดยอาศัยจากการตัดกันของแบบรูปของสนามไฟฟ้ากับวงกลม -3 dB ได้ที่มุม 29 องศา และ 301 องศา และจากรูปที่ 4.8 ในระนาบสนามแม่เหล็ก ผลจากการทดสอบจะได้ว่าสายอากาศมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ 62 องศา โดยอาศัยจากการตัดกันของแบบรูปของสนามไฟฟ้ากับวงกลม -3 dB ที่มุม 31 องศา กับ 229 องศา

#### 4.3.10 การวัดอัตราขยายสายอากาศจากแวลวลำดับของช่องเปิด

##### 4.3.10.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาอัตราขยายสายอากาศ

1. เครื่อง Network Analyzer
2. สายอากาศแบบสองทิศทางจากท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คู่
3. สายวัดสัญญาณ RG 223 50  $\Omega$  SUHNER SWITZERLAND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน 2 ตัว

#### 4.3.10.2 วิธีการทดสอบ

1. ทำการตั้งสายอากาศส่งและรับให้มากกว่าสนามระยะไกล
2. ทำการป้อนแหล่งจ่าย Signal Generator โดยตั้งความถี่ที่ 2.45 GHz ตั้งขนาด Amplitude ที่ 0 dBm
3. ตั้งค่าที่อ่านที่เครื่อง Spectrum Analyzer โดยตั้งความถี่ที่ 2.45 GHz ตั้ง Band ที่ อ่าน Start = 2.4 MHz Stop = 2.5 MHz
4. เมื่อจะทำการป้อนแหล่งจ่ายให้สายอากาศตัวส่งกด RF On แล้วทำการอ่านค่าได้จากเครื่อง Spectrum Analyzer โดยกดที่ปุ่ม Peak Search

#### 4.3.10.3 การหาอัตราขยายของสายอากาศ

จะหาอัตราขยายของสายอากาศได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - L_s \quad (4.1)$$

โดยที่

- $P_r$  คือ กำลังงานที่อ่านได้จากเครื่อง Spectrum Analyzer  
 $P_t$  คือ กำลังงานที่ส่งออกจากตัว Signal Generator  
 $G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศทางด้านส่ง (dB)  
 $G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศทางด้านรับ (dB)  
 $L_t$  คือ ค่าการสูญเสียสายนำสัญญาณทางด้านภาตส่ง (dB)  
 $L_r$  คือ ค่าการสูญเสียสายนำสัญญาณทางด้านภากรับ (dB)  
 $L_s$  คือ ค่าการสูญเสียในที่ว่าง (Free Space Loss) มีค่าเท่ากับ  $20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)$

โดย

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

องค์ประกอบที่ใช้ในการหาอัตราขยายของสาย ในทางปฏิบัติจะต้องมีปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ต้องสร้างสายอากาศแบบเดียวกัน ทั้ง 2 ตัว
  - 1.1 มีรูปร่างเหมือนกัน
  - 1.2 วัสดุที่ใช้ในการทำต้องเหมือนกัน
  - 1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าทั้ง VSWR และอิมพีแดนซ์ ต้องเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ต้องทำการวัดที่สนามระยะไกล  $R$  ที่ใช้ในการทดลองใช้ที่ค่า 2 เมตร  
ดังนั้นอัตราการขยายของสายอากาศจึงหาได้จากสมการ ของ Friis

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

$$P_r = -4.23 \text{ dBm}$$

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

$$L_s = 20 \log \left[ \frac{4\pi(2)}{0.1224} \right]$$

$$= 46.131 \text{ dB.}$$

จากสมการ 4.2 ทำการกาไลเบสปลายสาย จะทำให้ ไม่ต้องคิดค่า  $L_t$  และ  $L_r$

$$-39.5 = 0 + 2G - 46.131$$

$$G = 6.63 \text{ dBi}$$

$$\therefore G_r (\text{dBi}) = 3.315 \text{ dBi}$$

#### 4.3.11 การหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแล้วลำดับของช่องเปิด

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางถือได้ว่าเป็นค่าที่แสดงทิศทางของสายอากาศโดยปกติจะถือเอาตามทิศทางของโบลหลักเป็นหลัก โดยค่าสภาพเจาะจงทิศทางซึ่งเป็นอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกซ์พอยท์ซอส โดยถ้าค่าสภาพเจาะจงทิศทางซึ่งมีค่ามากจะมีคุณสมบัติในการชี้ทิศทางดีกว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มีค่าน้อยการหาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ของสายอากาศในทางปฏิบัติหาได้จากค่าค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ได้จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยนำมาคำนวณตาม สมการ 4.3 การหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางในทางปฏิบัติ

$$D_0 \approx \frac{4\pi \left( \frac{180}{\pi} \right)^2}{\theta_H \theta_V} \approx \frac{41253}{\theta_H \theta_V} \quad (4.2)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 D_0 &= \frac{41253}{(62 \times 58)} = 11.47 \\
 &= 10 \log 11.47 \\
 &= 10.59 \text{ dBi}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากสายอากาศเป็นแบบ 4 ทิศทางจึงต้องคิดค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ครึ่งหนึ่งของแบบทิศทางเดียวและค่ากำลังครึ่งหนึ่งของสายอากาศมีค่า -3 dB ดังนั้น จะได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแบบ 4 ทิศทาง คือ

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

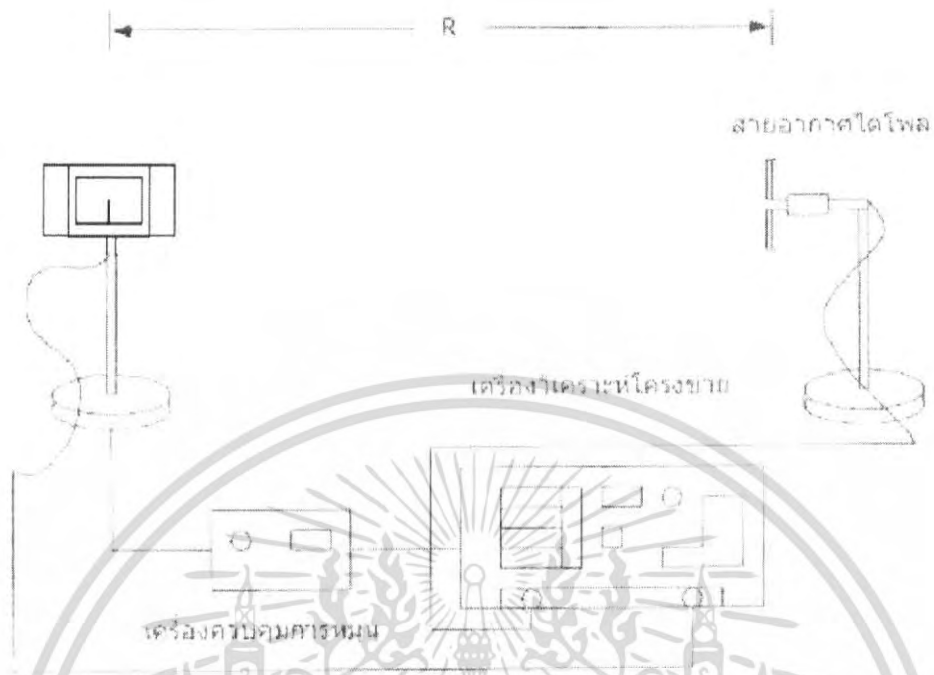
$$D = 7.59 \text{ dBi}$$

ประสิทธิภาพของสายอากาศจากสมการที่ 2.9

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{G}{D} \\
 &= \frac{3.315}{7.59} \times 100\% \\
 &= 43.67\%
 \end{aligned}$$

#### 4.3.12 การทดสอบโพลาไรซ์ของสายอากาศแบบแถวลำดับของช่องเปิด

การทดสอบโพลาไรซ์จะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz โดยใช้ไดโพลเป็นตัวส่ง และใช้สายอากาศแบบแถวลำดับของช่องเปิด เป็นตัวรับ โดยคอนแวนไดโพลให้หันหน้าเข้าหาสายอากาศ และวางในแนวเดียวกันกับสายอากาศ และ หมุน มุมของสายอากาศไดโพล ไปที่ละ 10 องศา แล้วทำการบันทึกค่าที่ได้ มาพล็อตในกราฟ



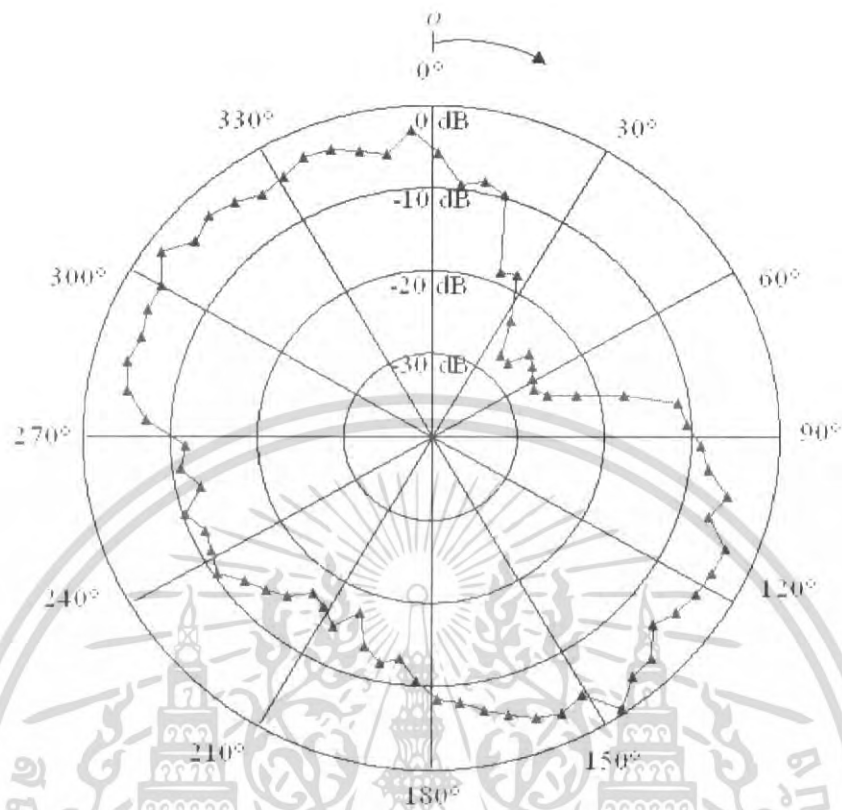
รูปที่ 4.15 ลักษณะการต่อในการทดลองการโพลาริซ์



รูปที่ 4.16 การทดสอบการโพลาริซ์

ค่า R ต้องมีค่ามากกว่าค่าสนามระยะไกล ของสาย อากาศ ในที่นี้ ใช้ ระยะ 2 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.17 โพลาริเซชันของสายอากาศแกลวลำดับของช่องเปิด  
 จากกราฟจะเห็นได้ว่าจะเป็นโพลาริเซชันแบบ วงรี เอียง -45 องศาอัตราส่วนแกนหลัก  
 ต่อแกนรองเท่ากับ -27 dB

#### 4.3.13 ทดสอบการใช้งาน

##### 4.3.13.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

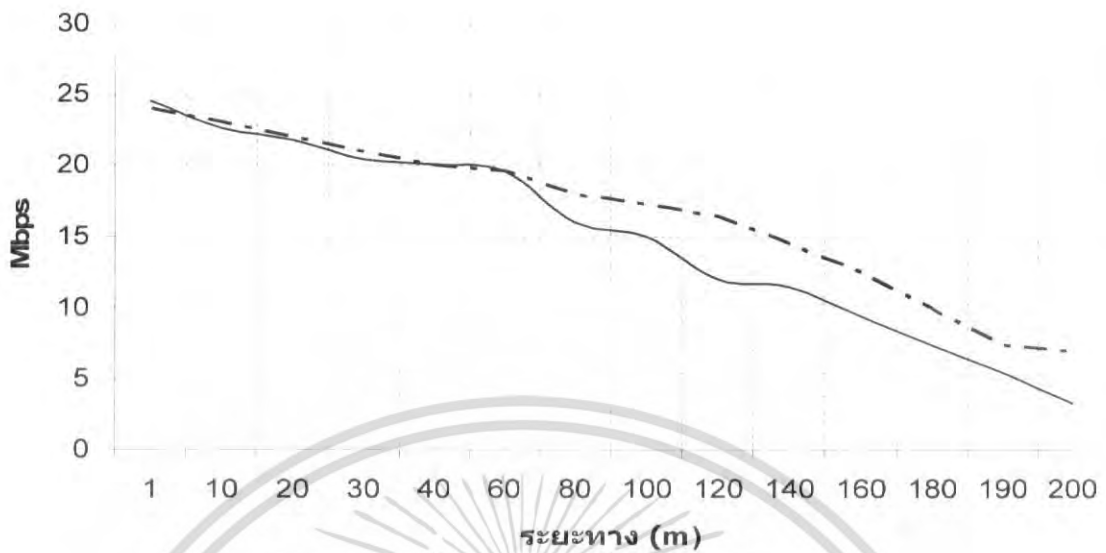
1. เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง โน้ตบุค 1 เครื่อง
2. Access point 1 ชุด
3. สายนำสัญญาณ ที่ต่อไปยังสายอากาศ
4. โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบ คือ โปรแกรม Chariot
5. สายอากาศที่นำมาทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 การทดสอบใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟ Throughput Average ตามระยะทาง จากการทดสอบใช้งาน โดยใช้สายอากาศ แถวลำดับของช่องเปิด เป็นตัวส่งสัญญาณ ไวลเลสแลนด์ แล้วใช้เน็ตเวิร์กรับสัญญาณ แล้วใช้โปรแกรม ซิมูเลชันในการเก็บค่า จะเห็นได้ว่า ที่ระยะ 220 เมตร Throughput ที่ได้ออกมา จะมีค่าเฉลี่ย ที่ 2.9 Mbps

**สรุป**

บทนี้เป็นการสร้างและทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศจากแถวลำดับของช่องเปิด ในส่วนการสร้างได้นำผลขนาดและลักษณะตามที่ได้ วิเคราะห์มาทำการสร้างแล้วจึงทำการแมตซ์สายอากาศ ด้วยการตัดโพรบ ให้ได้ค่าต่ำสุดที่ ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นออกมาใน 4 ทิศทาง มีโพลาไรซ์เป็นแบบ วงรี เอียง 45 องศา แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้ ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### สรุป

โครงการสายอากาศจากท่อนำคลื่น นี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาการใช้งานในย่านความถี่ 2.45 GHz โดยโครงสร้างไม่ซับซ้อน และได้พิจารณาการออกแบบสายอากาศด้วยตัวแปรที่มีอิทธิพล ต่อ การสร้าง สายอากาศ คือ ความกว้างของท่อนำคลื่น (a) ความยาวของท่อนำคลื่น (b) ความหนาของท่อนำคลื่น (c) โดย ค่าความหนาของท่อนำคลื่นนี้ ได้ใช้โปรแกรม NEC2D เป็นตัวออกแบบ และวิเคราะห์ เพื่อหาค่า ความหนาที่ทำให้สายอากาศรอบทิศทางตัวนี้ มีค่าแอมพลิจูดการแผ่กระจายคลื่น คุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ ค่ามุมที่สนามสูงสุด ความกว้างของลำคลื่นที่เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะ 4 ทิศทาง โดยจะได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต้องเข้าใกล้ 1 และค่าสภาพจะงทิศทางที่มีค่ามาก เพื่อส่งผลถึงคุณลักษณะในการชี้ทิศทางที่ดี จากการวิเคราะห์ จะได้ ด้านความกว้างของท่อนำคลื่น (a) ประมาณ 7.6 เซนติเมตร ความยาวของท่อนำคลื่น (b) ประมาณ 3.8 เซนติเมตร ความหนาของท่อนำคลื่น (c) ประมาณ 2.5 เซนติเมตร และเมื่อได้ จึงได้ทำการสร้างจริงโดยใช้ท่ออะลูมิเนียม ในการสร้างท่อนำคลื่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า และนำมาประกอบ กับ ให้อ้อ ซีไปทั้งสี่ทิศ ทาง ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม จะได้ ค่าสภาพจะงทิศทางเมื่อคูที่ระนาบมุมกวาด จะได้สูงสุดที่ มุม 0 ,90,180 ,360 องศา ส่วนค่า มุมที่สนามลดลงครึ่งหนึ่งนั้น จะไม่มี แต่ มีมุม 45 ,135, 225, 315 องศา ค่าสนามจะลดลง ประมาณ -3 dBi ถึง -8 dBi เท่านั้น

ในการทดสอบจริงจะทำการแมตซ์สายอากาศ โดยใช้โพรบลวดทองแดง และได้วัด ค่า อัตราส่วนคลื่นนิ่งออกมาได้ ค่า  $V_{SWR}$  : 1.15 ที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจะได้ค่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ประมาณ  $V_{SWR}$  : 1.6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นระนาบสนามแม่เหล็กและระนาบสนามไฟฟ้า ได้ผลออกมา ใกล้เคียงกับค่าที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ที่ -25.8 dB อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ 53.2-j6.685 โอห์ม แล้วนำไปทดสอบการใช้งานจริงในระบบ Wireless land เพื่อหาค่า Throughput ซึ่งจากการทดสอบได้ค่า Throughput Average 1.1 Mbps ที่ระยะทาง 220 เมตร โดยในมุมที่ 0,90,180,270 จะมีค่า Throughput ใกล้เคียงกัน

### เอกสารอ้างอิง

- [1] โมไนย ไกรฤกษ์, “ทฤษฎีสายอากาศ”, สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2535
- [2] C.A.Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design”
- [3] นิรันดร์ คำประเสริฐ, “วิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้าและวิศวกรรมไมโครเวฟ เล่ม 3”, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์ ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, 2542
- [4] พิชัย ภัคดีพานิชเจริญ, “ไมโครเวฟ”, พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ . 2540
- [5] David K. Chang , “Fundamental of Engineering Electromagnetic” .Addison Wesley Publishing Company. 1993
- [6] บัณฑิต โรจอารยานนท์, “วิศวกรรมสายอากาศ”, พิมพ์ครั้งที่ 4, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้