

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศย่านความถี่กว้างสำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับ

**Broadband Antenna for Unmanned Aerial Vehicles**

โดย

นายคงฤทธิ ชีพทรงสุข

นายจักรกมล สฤทธิกุล

ร/พ.  
ต 113 ล  
2548

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 62616

วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ค. 2549

b. 1162708b  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศย่านความถี่กว้างสำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับ

**Broadband Antenna for Unmanned Aerial Vehicles**



ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว  
(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว  
(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศย่านความถี่กว้างสำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับ

Antenna for Unmanned Aerial Vehicles

ผู้จัดทำ

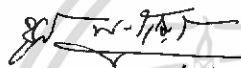
1. นายคงฤทธิ ชีพทรงสุข 46015002

2. นายจักรกมล ตฤณศิริกุล 46015004



(ผศ.ดร.ทองทศ วานิชศรี)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สายอากาศย่านความถี่กว้างสำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับ

## Broadband Antenna for Unmanned Aerial Vehicles

โดย นาย คงฤทธิ์ ชีพทรงสุข 46015002

นาย จักรกมล สฤณดิกุล 46015004

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ทองทศ วานิชศรี

ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

### บทคัดย่อ

โครงการนี้จะนำเสนอการศึกษา ออกแบบ วิเคราะห์ สร้างและทดสอบ สายอากาศย่านความถี่กว้างโดยใช้สายอากาศไมโครสตริป ซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีขนาดเล็ก และมีน้ำหนักเบา แบบราบกับบริเวณที่จะติดตั้ง สายอากาศที่นำเสนอเป็นสายอากาศที่สามารถชี้ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นลงมายังสถานีภาคพื้นดินได้ โดยมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงพอที่จะทำให้การสื่อสารประสบความสำเร็จ โดยโครงการนี้จะได้วิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง การโพลาไรซ์และอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ซึ่งผลจากการวิเคราะห์มีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศสำหรับใช้งานจริงในระบบอากาศยานไร้คนขับ

### Abstract

This project presents the study, design, analysis, fabrication and test of the broadband antenna using microstrip patch antenna. The antenna will be made using the printed circuit board with the small size, lightweight and flush-mounted structure. The proposed antenna will be directed the radiation beam to the ground station. The directivity of the antenna is high enough to achieve the communication system. We analyse the radiation pattern, beamwidth, directivity, polarization and standing wave ratio. The measured result will be used to verify the antenna for applying in the Unmanned Aerial Vehicles system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดีนั้น ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่าน คือ อาจารย์ทองทศ วานิชศรี อาจารย์ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำปริญญานิพนธ์ และ คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้กับทางคณะผู้จัดทำทั้งในอดีตและปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้ที่เป็นแรงบันดาลใจอันสำคัญยิ่ง รวมถึงกำลังใจที่ได้รับเสมอมาจากคุณพ่อ คุณแม่ อีกทั้งญาติพี่น้องและคุณสุวรรณฯ สมเจริญ และเพื่อนที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังของทางคณะผู้จัดทำที่ ทำให้คณะผู้จัดทำมีความมานะพากเพียรทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์	1
1.2 เนื้อหาของปริิญาานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีหรือหลักการ	3
2.1 ลักษณะการปฏิบัติงานของระบบอากาศยานไร้คนขับ	3
2.2 โครงสร้างของระบบอากาศยานไร้คนขับ	3
2.3 คุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของสายอากาศ	4
2.3.1 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)	4
2.3.2 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น	4
2.3.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)	5
2.3.4 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio)	5
2.3.5 อัตราขยาย (Gain)	6
2.3.6 ค่าความกว้างลำคลื่นจุดศูนย์กู่แรก (First Null Beam width)	6
2.3.7 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half - power beam width)	6
2.3.8 โพลาริเซชัน (Polarization)	6
2.4 สายอากาศไมโครสตริป	7
2.4.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	7
2.4.2 ชนิดของสายอากาศไมโครสตริป	8
2.4.3 การป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับสายอากาศไมโครสตริป ( Microstrip Feed )	10
2.4.4 หลักการกระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป	13
2.4.5 สนามที่แผ่กระจายของสายอากาศไมโครสตริป	20
2.4.6 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริป	23
2.5 สายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก (square spiral microstrip antenna)	27
2.5.1 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก (standard square spiral parameters)	28
2.5.2 การใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ (An overview of the numerical analysis method)	28
2.6 ทฤษฎีเบื้องต้นของสายอากาศอิสระเชิงความถี่ (Frequency – independent antennas)	30
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ และการออกแบบ	33
3.1 โครงสร้างที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า	33
3.2 โครงสร้างที่จะนำไปวิเคราะห์ของสายอากาศ	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.3 โครงสร้างที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์การสร้างตัวป้อนสัญญาณแบบบาลัน	35
3.3.1 หลักการการทำงานของบาลัน	35
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D และผลการทดลอง	37
4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ	37
4.2 คุณลักษณะของตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าของสายอากาศ	37
4.3 คุณลักษณะของสายอากาศ	39
4.3.1 คุณลักษณะอัตราการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss Ratio)	39
4.4 โครงสร้างขั้นสุดท้ายที่ออกแบบก่อนนำไปทำการทดสอบ	42
4.5 การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR)	43
4.5.1 การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	43
4.6 การทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	44
4.6.1 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	44
4.7 การทดสอบอัตราการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss Ratio)	45
4.7.1 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ	45
4.8 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	46
4.8.1 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	47
4.9 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ	52
4.9.1 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ	53
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	55
5.1 สรุปผลการทดลอง	55
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	56
กิตติกรรมประกาศ	57
หนังสืออ้างอิง	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริปเมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟ	8
2.2 ข้อดีและข้อเสียของวิธีการป้อนสัญญาณแบบต่างๆ	12
4.1 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	44
4.2 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	45
4.3 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ระยะเวลาปฏิบัติงานของระบบอากาศยานไร้คนขับ	3
2.2 โครงสร้างของระบบอากาศยานไร้คนขับ	4
2.3 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	7
2.4 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น	9
2.5 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสลีต	9
2.6 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบ Travelling – Wave	10
2.7 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีสายส่งไมโครสตริป	10
2.8 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีโคแอกเซียล	11
2.9 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีผ่านช่องเปิด	11
2.10 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีวางไว้ใกล้กัน	12
2.11 ลักษณะของสนามไฟฟ้าภายใต้แผ่นและบริเวณขอบของสายอากาศไมโครสตริป	14
2.12 ลักษณะการเกิดสลีต	14
2.13 แหล่งจ่ายกระแสแบบที่ทำให้เกิดสนามระยะไกลเหมือนกัน	16
2.14 แหล่งจ่ายกระแสเชิงควิอีกแบบหนึ่งที่ทำให้เกิดสนามในระยะไกลเหมือนกัน	17
2.15 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และสนามที่แพร่กระจายบริเวณขอบของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	18
2.16 ระบบ โคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	21
2.17 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบแนวนอน	22
2.18 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบแนวตั้ง	22
2.19 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริป	23
2.20 ไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$ และ $w/h \ll 1$	26
2.21 คุณสมบัติดิสเพอร์ชัน $\epsilon_r(f)$ ในไมโครสตริป	26
2.22 โครงสร้างของสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก	27
2.23 โครงสร้างของสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก	28
3.1 สายอากาศที่นำไปวิเคราะห์มีโครงสร้างเป็นสายอากาศวงก้นหอยสี่เหลี่ยมมุมฉาก	34
3.2 บาลันที่ใช้กับสายอากาศวงก้นหอย	35
3.3 ส่วนประกอบของบาลัน	35
3.4 การแปลงความต้านทานของบาลัน	36
4.1 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าของสายอากาศ	37
4.2 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าที่ต่อแบบ บาลัน ๆ บาลัน	38
4.3 แสดงอัตราการแทรกสอดของตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าที่ต่อแบบ บาลัน ๆ บาลัน	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูปภาพ(ต่อ)

### รูปที่

	หน้า
4.4 ตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้า	39
4.5 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ทำการป้อนสัญญาณแบบบาลันในช่วงความถี่ 100 MHz – 1.5 GHz	39
4.6 แสดงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 900 MHz ในแนวมุมยก	40
4.7 แสดงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 900 MHz ในแนวมุมกวาด	40
4.8 แสดงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz ในแนวมุมยก	41
4.9 แสดงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz ในแนวมุมกวาด	41
4.10 โครงสร้างสายอากาศสวางกันหอยสี่เหลี่ยมมุมฉาก	42
4.11 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	43
4.12 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	44
4.13 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ	45
4.14 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	46
4.15 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก	47
4.16 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด	47
4.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก	48
4.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด	48
4.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยกและมุมกวาด	49
4.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด	49
4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก	50
4.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยกและมุมกวาด	50
4.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก	51
4.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก	51
4.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยกและมุมกวาด	52
4.26 การจัดเรียงสายอากาศในช่วงความถี่เพื่อทดสอบอัตราขยาย	53
4.27 อัตราขยายของสายอากาศ	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์

ระบบอากาศยานไร้คนขับนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องใช้สายอากาศในการติดต่อสื่อสารรับหรือส่งข้อมูลกับสถานีภาคพื้นดิน ลักษณะการทำงานของระบบอากาศยานไร้คนขับนั้นจะต้องบินเพื่อเก็บข้อมูลต่างๆ ตัวอย่างเช่น รูปภาพทางอากาศหรือ ภาพถ่ายภูมิประเทศแล้วส่งกลับมาทางสถานีภาคพื้นดินโดยที่ระบบอากาศยานไร้คนขับนั้นสามารถบินระยะทางไกลที่สุด 200 กิโลเมตร และมีเพดานบิน 8 กิโลเมตร ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ถึงระยะทางและเพดานบินของระบบอากาศยานไร้คนขับแล้วจะพบว่า เมื่อระบบอากาศยานไร้คนขับบินอยู่ในระยะทางไกลๆ นั้นจะทำมุมกับสถานีภาคพื้นดินเป็นมุมน้อยมาก เป็นผลให้สายอากาศที่จะนำมาใช้กับระบบอากาศยานไร้คนขับนั้นต้องคำนึงถึงข้อมูลเบื้องต้นนี้และข้อจำกัดของระบบอากาศยานไร้คนขับในด้านอื่นอีกด้วย เช่นการนำสายอากาศไปติดตั้งบนระบบอากาศยานไร้คนขับจะต้องมีความแข็งแรงและทนทานต่อแรงลมในขณะที่บินได้ ขณะเดียวกัน สายอากาศนั้นต้องมีโครงสร้างที่ไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อการบิน เมื่อพิจารณาถึงการนำสายอากาศไปใช้กับระบบอากาศยานไร้คนขับ ที่ใช้ช่วงความถี่แถบกว้างในการสื่อสารข้อมูล ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่นำไปใช้จึงต้องเป็นสายอากาศที่สามารถใช้ในช่วงความถี่แถบกว้างได้ เช่น สายอากาศแบบวงก้นหอย (Spiral Antenna) สายอากาศแบบลูปเพอร์ริโอดิกไดโพล (Log-periodic Dipole Antenna) สายอากาศเฮลิคัลซ์ (Helical Antenna) หรือสายอากาศแบบดิสโคเน (Discone)

สายอากาศเหล่านี้มีคุณสมบัติที่ใช้งานได้ดีในช่วงแถบความถี่กว้างทั้งสี่สิ่งๆ ที่พิจารณาต่อไปก็คือ ลักษณะการทำงานของระบบอากาศยานนั้นต้องติดต่อกับสถานีภาคพื้นดินได้ในระยะทางไกลๆ ดังนั้นจึงต้องเลือกสายอากาศที่มีแบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นออกรอบตัว (Omnidirectional) เพื่อให้ลำคลื่นนี้มายังสถานีภาคพื้นดินเพื่อที่จะทำให้การสื่อสารประสบความสำเร็จ

โครงการนี้จะทำการวิเคราะห์สายอากาศแบบวงก้นหอย (Spiral Microstrip Antenna) ซึ่งจะมีคุณลักษณะของสายอากาศที่สามารถใช้ได้ดีในช่วงกว้างแถบความถี่และยังมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบออกรอบตัว ทั้งยังเป็นสายอากาศที่ส่งคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบตั้งฉากกับพื้นโลก โดยที่โครงสร้างของสายอากาศนั้นยังมีลักษณะไม่ด้านคมอีกด้วยและ การนำไปติดตั้งบนตัวอากาศยานนั้นทำได้ไม่ยาก ในการวิเคราะห์ โครงสร้างของสายอากาศแบบวงก้นหอยนั้น จะพิจารณาถึงขนาดความหนาของแผ่นไมโครสตริปและ ชนิดของแผ่นที่นำมาใช้รวมถึงรูปร่างที่จะนำไปติดตั้งจริง ตลอดจนโครงสร้างทั้งหมดของสายอากาศเพื่อที่จะทำให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุด โดยคุณลักษณะที่ได้พิจารณา คือ คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ คุณลักษณะเชิงโพลาไรเซชัน คุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จากนั้นได้สร้างสายอากาศต้นแบบ และทดสอบเพื่อเปรียบเทียบยืนยันผลที่ได้จากการวิเคราะห์ จะพบได้ว่าเมื่อพิจารณาสายอากาศแบบวงก้นหอยจากคุณสมบัติข้างต้นนี้แล้ว สายอากาศแบบวงก้นหอยนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับระบบอากาศยานไร้คนขับนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์

บทที่ 1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีและหลักการของสายอากาศ วิธีการหาสนามของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คุณสมบัติของสายอากาศ เช่น ความกว้างของลำคลื่น ค่าสภาพเงาะจงทิศทางการโพลาริซั อัตรารส่วนคลื่นนิ่งและรวมถึงโครงสร้างเบื้องต้นของระบบอากาศยาน ไร้คนขับด้วย

บทที่ 3 ออกแบบสายอากาศ ซึ่งอาศัยทฤษฎีที่ได้จากบทที่ 2 และผลของการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศโดยอาศัยโปรแกรมการ IE3D

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D และผลการทดลอง

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป

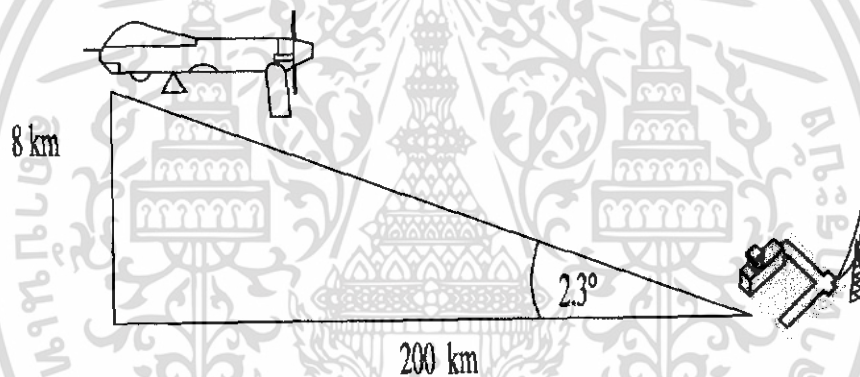


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีหรือหลักการ

### 2.1 ลักษณะการปฏิบัติงานของระบบอากาศยานไร้คนขับ

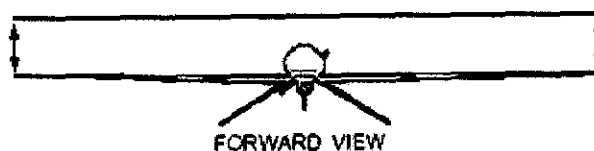
ลักษณะการปฏิบัติงานของระบบอากาศยานไร้คนขับนั้น ระบบอากาศยานไร้คนขับสามารถทำการบินห่างออกไปจากสถานีฐานได้ไกลสุดถึง 200 กิโลเมตร ระดับเพดานบิน 8 กิโลเมตร โดยในขณะที่ทำการบินอยู่นั้นก็จะทำการเก็บข้อมูลต่างๆ ส่งกลับมายังสถานีฐานด้วยเช่นรูปภาพทางอากาศ เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันนั้นระบบอากาศยานไร้คนขับยังต้องได้รับการควบคุมจากสถานีฐานอีกด้วยการติดต่อสื่อสาร รับส่งข้อมูลกับสถานีฐานนั้นจะใช้ช่วงความถี่แถบกว้างในการสื่อสารข้อมูล ช่วงความถี่ที่ใช้นั้น ได้แก่ ช่วงความถี่แถบกว้าง ความถี่ตั้งแต่ 520 MHz -2.7GHz จะพบว่าเมื่อระบบอากาศยานไร้คนขับบินปฏิบัติงานในระยะทางไกลๆ ระบบอากาศยานจะทำมุมกับสถานีภาคพื้นดินเป็นมุมน้อยมาก โดยที่ระบบอากาศยานไร้คนขับมีระบบการทำงานดังรูปที่ 2.1



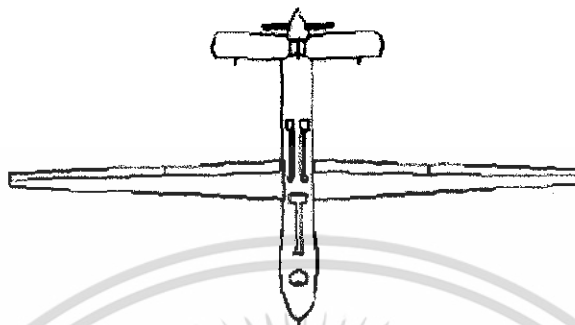
รูปที่ 2.1 ระยะปฏิบัติงานของระบบอากาศยานไร้คนขับ

### 2.2 โครงสร้างของระบบอากาศยานไร้คนขับ

เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของระบบอากาศยานไร้คนขับดังรูปที่ 2.2 จะพบว่าบริเวณที่จะนำสายอากาศไปติดตั้งบนตัวอากาศยานนั้น จะอยู่บริเวณด้านล่างของลำตัวอากาศยาน โดยจะต้องเป็นจุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการบินของระบบอากาศยาน และเนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ทำลำตัวของระบบอากาศยานไร้คนขับเป็นไฟเบอร์ (Fiber) จึงไม่มีผลกระทบกับการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ข้อมูลเบื้องต้นเหล่านี้จะนำไปสู่การวิเคราะห์สายอากาศเพื่อนำไปใช้กับระบบอากาศยานไร้คนขับ



FORWARD VIEW



BOTTOM VIEW



SIDE VIEW

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของระบบอากาศยานไร้คนขับ

## 2.3 คุณลักษณะพื้นฐานที่สำคัญของสายอากาศ

### 2.3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อเป็นตัวบอกว่าทิศทางต่างๆ รอบตัวสายอากาศ สายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นอย่างไรมีอยู่ 2 รูปแบบ คือแบบพิกัดฉาก (Rectangular) กับแบบ เชิงขั้ว (Polar) ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด (Amplitude) ของสนาม (Field) หรือกำลังงาน (Power) กับทิศทาง (Direction) ของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งแสดงในรูปของมุม (Angle) ในหน่วยองศา (Degree) หรือเรเดียน (Radian)

### 2.3.2 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน (ตลอดพื้นผิวทรงกลม) แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นกับ สนามไฟฟ้าสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศในระยะไกล สายอากาศบางชนิดเช่นสายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) สายอากาศแบบรูป (Loop Antenna) จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบอกรอบตัว โดยที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นคังสมการ 2.1

$$U = |\sin^n(\theta)| \quad 0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \phi \leq 2\pi \quad (2.1)$$

### 2.3.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงว่า สายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆ มากน้อยแค่ไหน ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_o = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $P_{\text{rad}}$  คือกำลังงานที่แพร่กระจายคลื่นทั้งหมด

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.3)$$

### 2.3.4 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio)

โดยเงื่อนไขในทางอุดมคติ กำลังงานที่เกิดจากแหล่งกำเนิดควรที่จะส่งผ่านออกไปเป็นความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นทั้งหมด (Radiation Resistance :  $R_r$ ) แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียของความต้านทานและฉนวนจากการสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยธรรมชาติของสายส่งและสายอากาศซึ่งก็เช่นเดียวกับการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนของคลื่นที่ช่วงรอยต่อระหว่าง สายส่งและสายอากาศ ซึ่งคลื่นสะท้อนจะไปแทรกสอดทำให้เกิดการเสริมและหักล้างกันของคลื่นกับคลื่นที่เดินทางจากแหล่งกำเนิดไปยังสายอากาศนั้นหมายถึงการเกิดคลื่นนิ่งโดยที่สัมประสิทธิ์การสะท้อนหาได้จากสมการที่ (2.4)

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o}$$

(2.4)

$Z_L$  = ความต้านทานเชิงซ้อนของสายอากาศ

$Z_o$  = ความต้านทานเชิงซ้อนคุณลักษณะของสายส่ง

ดังนั้นอัตราส่วนคลื่นนิ่งหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

(2.5)

### 2.3.5 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยาย คือ ความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าการชี้ทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ประสิทธิภาพของสายอากาศ จะประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับประสิทธิภาพของตัวนำ และประสิทธิภาพของฉนวน

$$\text{อัตราขยาย} = \text{ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง} \times \text{ประสิทธิภาพของสายอากาศ} \quad (2.6)$$

### 2.3.6 ค่าความกว้างลำคลื่นจุดศูนย์คู่แรก (First Null Beam width)

ค่าความกว้างลำคลื่นจุดศูนย์คู่แรก คือ มุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าลดลงเป็นศูนย์ โดยจะวัดในหน่วยขององศา (Degree)

$$FNBW = 2|\theta_{U=0dB} - \theta_{U=\infty dB}| \quad (2.7)$$

### 2.3.7 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half - power beam width)

ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเป็นคุณลักษณะหนึ่งที่สำคัญของสายอากาศ ทั้งนี้เพราะค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเป็นสิ่งที่ใช้บ่งชี้ว่า คุณสมบัติของสายอากาศ โดยค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมีความต้องการให้ขนาดความกว้างน้อยๆ ทั้งนี้ เพื่อให้สายอากาศแผ่กระจายคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการมากขึ้น และมีการสูญเสียกำลังงานในส่วนที่ไม่ต้องการน้อยลง

$$HPBW = |\theta_{U=-3dB \text{ left}} - \theta_{U=-3dB \text{ right}}| \quad (2.8)$$

### 2.3.8 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชันของคลื่นที่แผ่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกจากอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายอากาศส่ง) หรือเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้น จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่เข้าของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีอัตราขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกันจะแตกต่างกัน

ตัวนำสายอากาศสามารถติดตั้งในแนวตั้งหรือในแนวนอนก็ได้ ไม่ว่าจะแบบใด สนามไฟฟ้าก็จะมีทิศทางเดียวกับแนวการตั้งสายอากาศ ต่อมาได้มีการพัฒนาสายอากาศที่มีทั้งโพลาริเซชันในแนวตั้งและแนวนอนอยู่ในคันเดียวกัน เรียกว่า โพลาริเซชันเชิงวงกลม (Circular polarization) ข้อดีของแบบนี้คือสามารถรับสัญญาณได้ทั้งสองทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแบ่งชนิดของโพลาริเซชัน อาจแบ่งออกได้ เป็นแบบลิเนียร์โพลาริเซชัน (Linearly polarization) โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circularly polarization) และโพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptically polarization) ขึ้นอยู่กับลักษณะของการหมุนของยอดของเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า ถ้าเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในสเปซซึ่งเป็นเส้นตรงเสมอ จะเรียกว่าเป็นโพลาริเซชันแบบเส้นตรง หรือลิเนียร์โพลาริเซชัน แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีการหมุนรูปวงรี จะเรียกสนามแบบนี้ว่าเป็นโพลาริเซชันแบบวงรี

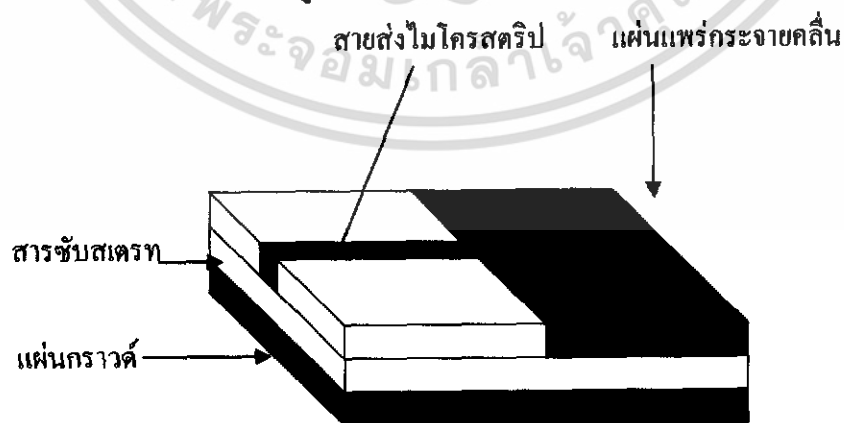
## 2.4 สายอากาศไมโครสตริป

### 2.4.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศชนิดที่กำลังได้รับความนิยมในระยะหลัง คือสายอากาศไมโครสตริปซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบแต่ลักษณะโดยทั่วไปประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

1. แผ่นโลหะตัวนำที่บางมากเรียกว่า แพทช์ (Patch)
2. สารฉาบสเตรทไดอิเล็กตริก
3. แผ่นกราวด์ซึ่งกว้างกว่าแพทช์
4. สายป้อน (feed) ซึ่งเป็นตัวป้อนกำลังให้กับเอเลเมนต์

ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปจะประกอบด้วย แผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกันอยู่ โดยมีแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนซึ่งจะมีรูปร่างต่างๆ เช่น รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม วงรี เรียกว่าตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiating Patch) โดยทั่วไปมักจะเป็นแผ่นทองแดงหรือทองคำ แผ่นตัวนำที่อยู่ด้านล่างจะเป็นลักษณะแผ่นตัวนำทั้งแผ่น โดยอุดมคติจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าตัวแพร่กระจายคลื่นอย่างมาก เรียกว่า แผ่นกราวด์ (Ground Plane) และมีวัสดุที่ไม่เป็นสื่อกลางทางไฟฟ้า (Dielectric Substrate) กั้นกลางระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง ขนาดของตัวแพร่กระจายคลื่นจะมีขนาดตามความต้องการ แผ่นกราวด์ตามทฤษฎีจะต้องมีขนาดที่ไม่จำกัด ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะทำให้แผ่นกราวด์มีขนาดเป็นอนันต์ได้ ดังนั้น ในการออกแบบจึงไม่มีข้อจำกัดของแผ่นกราวด์ว่าควรมีขนาดเท่าใด เพียงแต่จะต้องมีขนาดที่ใหญ่กว่าตัวแพร่กระจายคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศไมโครสตริปมีข้อดีหลายอย่าง เมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟดั้งเดิม ดังนั้นจึงมีประโยชน์หลายอย่างในช่วงความถี่ 100MHz-50GHz ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อดีและข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริปเมื่อเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟ

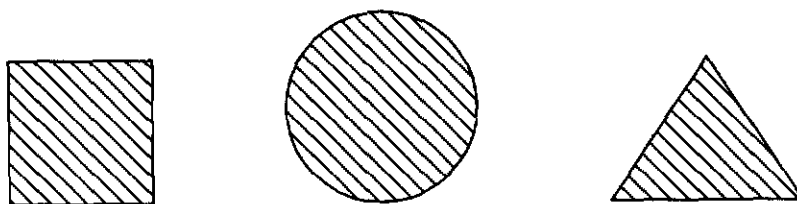
ข้อดี	ข้อเสีย	ประโยชน์
<ul style="list-style-type: none"> <li>- น้ำหนักเบา , low profile</li> <li>- ทำให้บางได้ จึงไม่ทำให้ยุ่งในด้านอากาศพลศาสตร์ ของอากาศยาน</li> <li>- ติดตั้งได้ง่ายบน จรวด, ดาวเทียม, จีปนาวธ</li> <li>- ทำ dual frequency ได้ง่าย</li> <li>- ไม่ต้องการ cavity backing</li> <li>- มีการโพลาไรซ์ได้ทั้งวงกลมและเส้นตรง ด้วยการเปลี่ยนแปลงจุดป้อนสัญญาณ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- แบนด์วิดแคบ</li> <li>- มีเกนต่ำ</li> <li>- สายอากาศไมโครสตริปส่วนใหญ่จะแพร่รังสีในครึ่งระนาบ</li> <li>- มีข้อจำกัดที่ gain สูงสุดที่ 20 dB</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การสื่อสารผ่านความถี่</li> <li>- เครื่องวิเคราะห์สูง</li> <li>- เรดาร์ และ Doppler</li> <li>- ใช้ในระบบสั่งงานและควบคุม</li> <li>- จีปนาวธ</li> </ul>

#### 2.4.2 ชนิดของสายอากาศไมโครสตริป

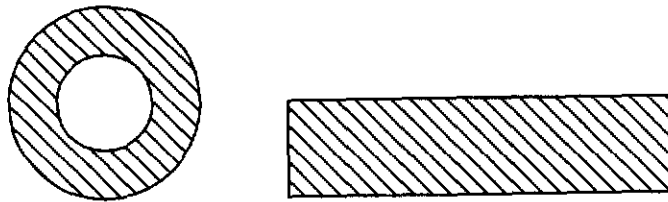
สายอากาศแผ่นไมโครสตริปจะมีพารามิเตอร์ต่างๆ ทางฟิสิกส์มากกว่าสายอากาศที่ใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟทั่วไป ที่พบเห็นได้ชัด คือ รูปร่างของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบต่างๆ อย่างไรก็ตาม สายอากาศแผ่นไมโครสตริปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้คือ

##### 1. สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Patch)

สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น Patch ประกอบด้วยแผ่นตัวนำบางๆ ที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตอยู่บนแผ่นสารตัวกลาง และอีกด้านหนึ่งของสารตัวกลางจะเป็นพื้นกราวด์ แผ่นตัวนำจะเป็นตัวกำหนดการแพร่กระจายรังสี ซึ่งหาได้จากการคำนวณตามรูปร่างลักษณะต่างๆ ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น

### 2. สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบสลิต (Slot)

สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบสลิต มีลักษณะคือ มีช่องที่พื้นกราวด์ และทำการป้อนสัญญาณโดยใช้เส้นไมโครสตริปที่เป็นช่อง รูปร่างของสลิตจะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม หรือวงแหวน ดังรูปที่ 2.5

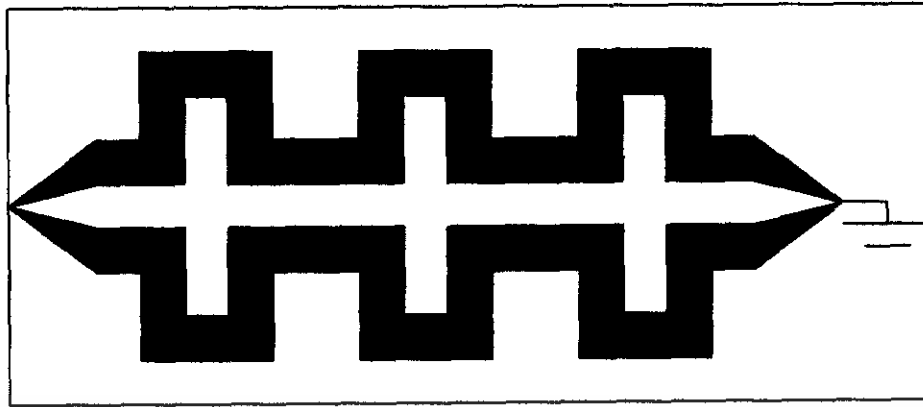


รูปที่ 2.5 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสลิต

### 3. สายอากาศไมโครสตริปแบบ Travelling-Wave

สายอากาศไมโครสตริปแบบ Travelling-Wave ประกอบด้วยนำลักษณะเป็นคาบ หรือมีความยาวตามเส้น TEM โดยที่ปลายเปิดของเส้น TEM จะต่อกับตัวภาวะที่ทำให้การแมทซ์แล้ว โดยที่จะมีรูปร่างแสดง ดังรูปที่ 2.6





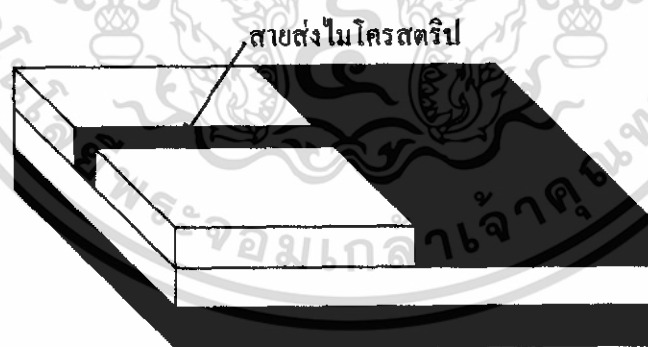
รูปที่ 2.6 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบ Travelling – Wave

#### 2.4.3 การป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับสายอากาศไมโครสตริป ( Microstrip Feed )

การป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งส่วนใหญ่สายอากาศแผ่นไมโครสตริป จะมีส่วนแพร่กระจายคลื่นอยู่ด้านบนใดด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองนั้น มีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี ได้แก่

##### 1. การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป (Microstrip Line)

การป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับสายอากาศไมโครสตริป เป็นการป้อนกำลังงานไฟฟ้าไปยังขอบด้านหน้าของสายอากาศด้านบนโดยพื้นกราวด์เป็นกราวด์ร่วมกับตัวสายอากาศและสำหรับสายส่งไมโครสตริปนี้จะต้องคำนึงถึงการแมทช์อิมพีแดนซ์ ระหว่างสายป้อนสัญญาณกับด้านสายอากาศไมโครสตริป การป้อนสัญญาณที่แนวศูนย์กลางของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 2.7

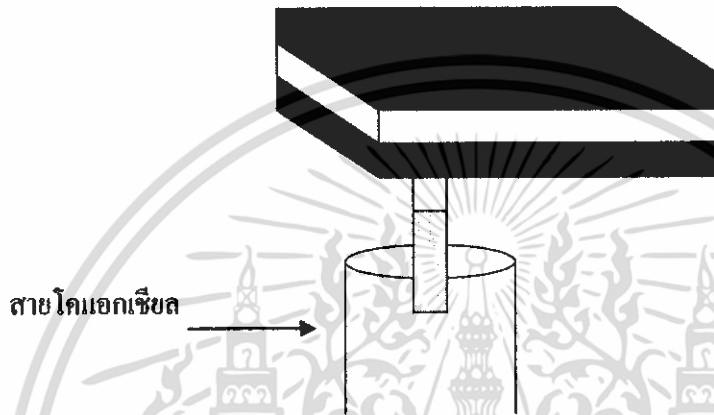


รูปที่ 2.7 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีสายส่งไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การป้อนสัญญาณด้วยโคแอกเซียล (Coaxial Cable)

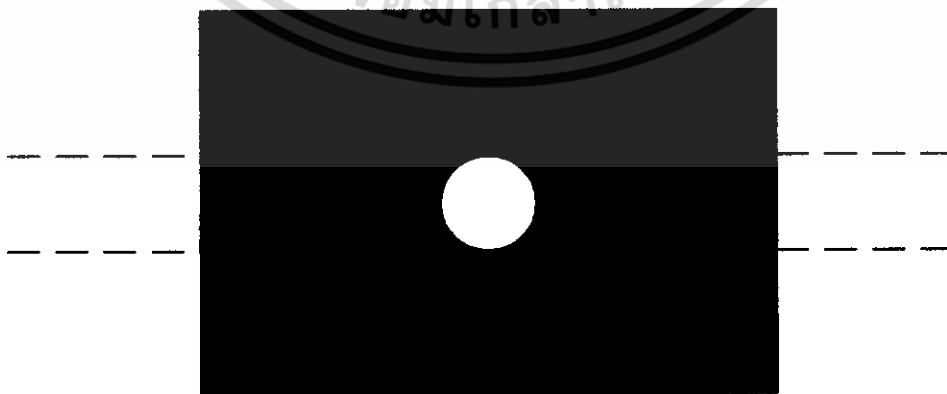
เป็นการป้อนกำลังงานโดยการเจาะทะลุจากกรวดทางด้านล่างต่อตัวนำด้านในของสายส่ง เข้ากับตัวสายอากาศ และตัวนำจะเชื่อมต่อเข้ากับแผ่นกรวด การป้อนกำลังงานจะทำการป้อนโดยที่จะต้องคำนึงว่าจุดที่เราป้อนเข้าไปนั้นว่า แมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายป้อนสัญญาณกับสายอากาศไมโครสตริปหรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีโคแอกเซียล

## 3. การป้อนสัญญาณผ่านช่องเปิด (Aperture)

การป้อนสัญญาณประเภทนี้จะนำเอาข้อบกพร่องของการป้อนสัญญาณในแบบที่ 1 และ 2 เนื่องจากทั้ง 2 แบบโดยธรรมชาติแล้วจะไม่สมมาตรกัน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดโหมดในอันดับที่สูงขึ้นกว่า (Higher Order Mode) ทำให้เกิดการแพร่กระจายที่โพลาไรเซชันไขว้ (Cross Polarization) จึงได้มีการคิดวิธีการป้อนสัญญาณ โดยการค้ำปลีงผ่านช่องเปิด แต่วิธีการนี้จะมีการสร้างยากที่สุด และมีแบนด์วิดท์แคบ แต่การแพร่กระจายคลื่นประเภทนี้จะช่วยลดการกระจายคลื่นปลอมปนได้ ดังรูปที่ 2.9

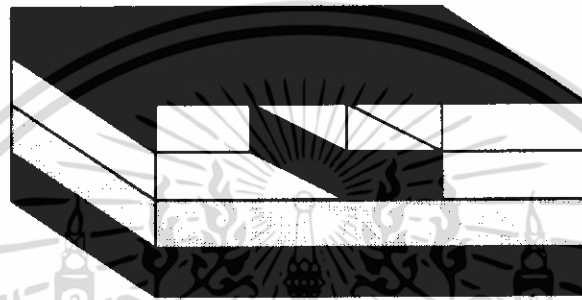


รูปที่ 2.9 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีผ่านช่องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. การป้อนสัญญาณด้วยการวางไว้ใกล้กัน (Proximity)

การป้อนสัญญาณประเภทนี้ มีลักษณะเช่นเดียวกับการป้อนสัญญาณประเภทที่ 3 โดยลักษณะโครงสร้างจะประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 2 ชั้นที่ถูกแยกออกจากกันด้วยระนาบสร้างเงาด้านล่างของวัสดุฐานรองแผ่นล่างสุด จะเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่สารตัวกลางต่ำกว่าระนาบสร้างเงาที่แบ่งวัสดุฐานรองทั้งสองออกจากกัน จะช่วยป้องกันการแพร่กระจายคลื่นออกจากส่วนป้อนสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดการแพร่กระจายคลื่นปลอมปน และทำให้ได้โพราไรเซชันที่บริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งการป้อนสัญญาณโดยการวางไว้ใกล้ๆกัน นั้นจะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด และยังง่ายต่อการสร้างแบบจำลองและมีการปลอมปนของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ แต่การสร้างยังทำได้ยากอยู่ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีวางไว้ใกล้กัน

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของวิธีการป้อนสัญญาณแบบต่างๆ

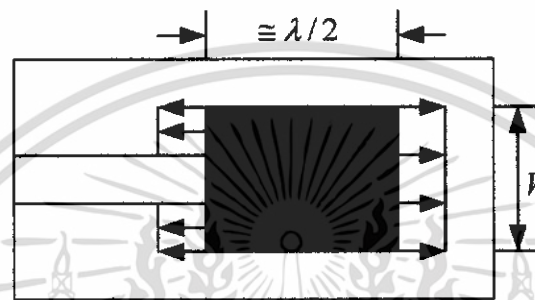
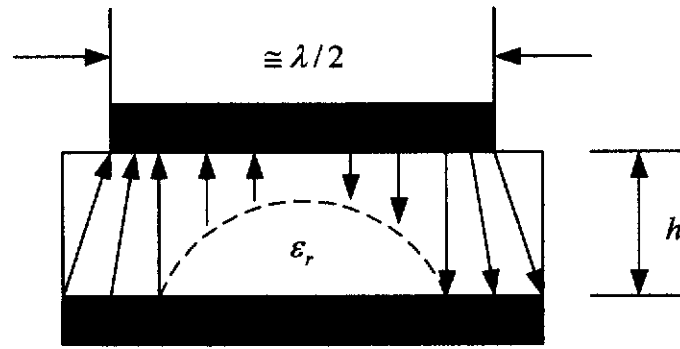
วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Microstrip Line - Radiating Edge	- การแพร่กระจายคลื่นเป็นกลุ่มก้อน	- มีการแพร่กระจายคลื่นแบบปลอมปน
- Nonradiating Edgd	- มีการโพราไรเซชันที่ดี	- ต้องใช้สตริปไลน์ภายในแผ่นแพร่กระจายคลื่น หรือใช้ทรานสเฟอร์เมอร์ในการแมทซ์
2. Coaxial Feed	- การแมทซ์อิมพีแดนซ์ทำได้โดยการเลื่อนตำแหน่ง โพรบ	- อิมพีแดนซ์จะมีค่ามากเมื่อใช้สารฐานรองที่หนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>3. Proximity Coupling</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Monolithic</li> <li>- Multilayer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเลื่อนตำแหน่งโพรบจะกระตุ้นให้เกิดการรวมกันของโหมด</li> <li>- ไม่มีกระแสไฟตรงบริเวณระหว่างจุดป้อนและแผ่นแพร่กระจาย</li> <li>- ใช้กับสายอากาศที่การแผ่แพร่กระจายคลื่นที่มีฐานรองหนามาก หรือแผ่นป้อนที่มีฐานรองบางมาก</li> <li>- สามารถเลือกองศาได้โดยอิสระในการแมทซ์หรือการปรับแต่ง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีการแพร่กระจายคลื่นโดยตรงจากบริเวณที่มีการคัปปลิ่ง</li> <li>- ยากในการออกแบบรูปร่าง</li> </ul>
<p>4. Aperture Coupling</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีการแพร่กระจายคลื่นปลอมปนจากจุดป้อน</li> <li>- ไม่ต้องเชื่อมต่อสัญญาณด้วยสายโคแอกเซียล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องออกแบบให้ใช้กับแบบหลายๆ ชั้นเท่านั้น</li> <li>- ยากในการออกแบบรูปร่าง</li> </ul>

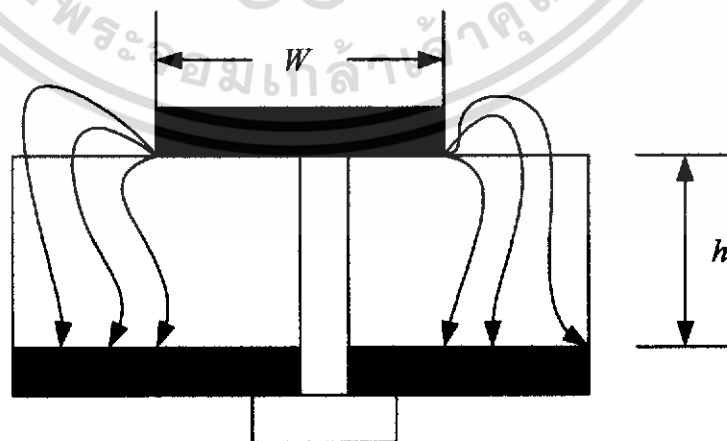
#### 2.4.4 หลักการกระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริบ

การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศไมโครสตริบสามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยจะมีส่วนแพร่กระจายคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะของสนามไฟฟ้าภายในแผ่นและบริเวณขอบของสายอากาศไมโครสตริป

สมมติให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าตามแนวความกว้าง และความหนาแน่นของสายอากาศไมโครสตริป สนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามแนวความยาวของส่วนกระจายคลื่น ซึ่งเท่ากับ  $\lambda/2$  การแพร่กระจายคลื่น สามารถอธิบายได้จากสนามบริเวณขอบที่เปิดวงจรของแผ่นแพร่กระจายคลื่น โดยจะแยกพิจารณาสนามไฟฟ้าที่ขอบเป็นส่วนประกอบแนวตั้งฉาก และส่วนประกอบแนวสัมผัส ส่วนประกอบตั้งฉากจะมีการกลับเฟส 180 องศา เพราะส่วนการการแพร่กระจายคลื่นมีความยาว  $\lambda/2$  ดังนั้น สนามระลอกที่เกิดขึ้นจะ ไม่มีการแพร่กระจายสูงสุด โดยตั้งฉากกับผิวของส่วนกระจายคลื่น



รูปที่ 2.12 ลักษณะการเกิดสล็อต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง สายอากาศแผ่นไมโครสตริปจะเกิดเป็นสล็อตซึ่งจะเรียกแต่ละสล็อตว่า เซลล์สนาม (Field-Cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งเซลล์ของแต่ละสนามมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ

$$Z_i = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = Z_o \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (2.9)$$

$$Z_c = \frac{Z_o}{n\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{377}{10\sqrt{2}} = 26.7 \quad (2.10)$$

ถ้าเป็นสายอากาศ  $\mu_r = \epsilon_r = 1$  และ  $Z_i = Z_o = 377$  โอห์ม ดังนั้น ถ้ามีจำนวนเซลล์สนามค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปมีค่า

$$Z_c = \frac{Z_o}{\sqrt{N\epsilon_r}} \quad (2.11)$$

โดย  $N = \frac{W}{t}$  เพราะฉะนั้น

$$Z_c = \frac{Z_o}{\sqrt{W\epsilon_r}} t \quad (2.12)$$

ในรูปจะตัดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากขอบทั้งสองข้างทิ้งไป แต่ถ้าต้องการค่าที่ละเอียดจะเขียนได้ว่า

$$Z_c = \frac{Z_o}{\sqrt{\epsilon_r} [(W/t) + 2]} \quad (2.13)$$

ถ้าความยาว  $L$  ไม่ใช่  $\lambda/2$  แต่มีค่าเท่ากับ  $\lambda$  โดย  $\lambda = \lambda_o / \sqrt{\epsilon_r}$  เซลล์สนามทั้งสองข้างของขอบของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปจะมีผลต่อการกระจายคลื่นทันที สมมติ  $\epsilon_r = 1$  จะได้ว่า

$$Z_c = \frac{Z_o^2}{4Z_d} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $Z_0$  คือ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่อยู่บนสูญญากาศ ซึ่งเท่ากับ 377 โอห์ม

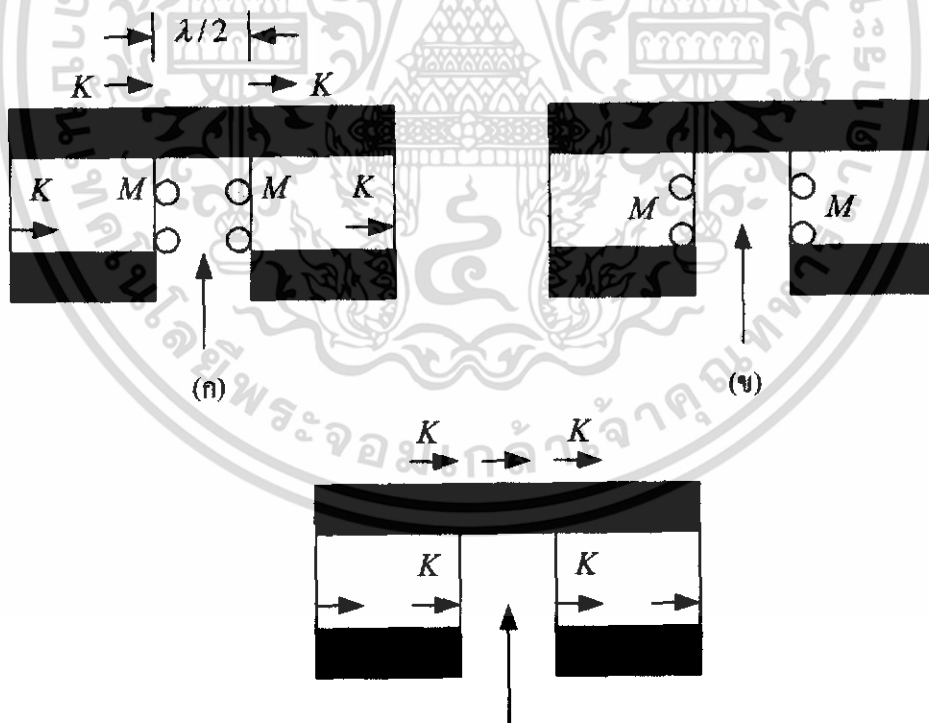
$Z_d$  คือ ค่า Impedance Complementary Dipole (โอห์ม)

ซึ่งสามารถหาค่าสภาพเจาะจงของทิศทางได้โดยใช้สูตร

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\Omega_A$  คือ มุมที่กระจายคลื่น (Beam Area)

การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากแผ่นไมโครสตริป สามารถหาได้จากการสมมติสถานะและการจ่ายกระแสให้แก่สายอากาศ แหล่งจ่ายกระแสที่สมมติขึ้นนี้จะมีอยู่ 3 แบบดังรูปที่ 2.13 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากกระแสเชิงผิวสามารถพิจารณาได้จากรูป (ก) สนามระยะไกลสามารถคำนวณได้จากสนามแม่เหล็ก ( $\vec{M}$ ) ร่วมกับสถานะตัวนำสมบูรณ์ ดังรูป (ข) ความหนาแน่นกระแสของสนามไฟฟ้าแนวสัมผัสจะทำให้สนามระยะไกลเป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้า ( $\vec{K}$ ) ร่วมกับสถานะตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ พิจารณาได้จากรูป (ค)



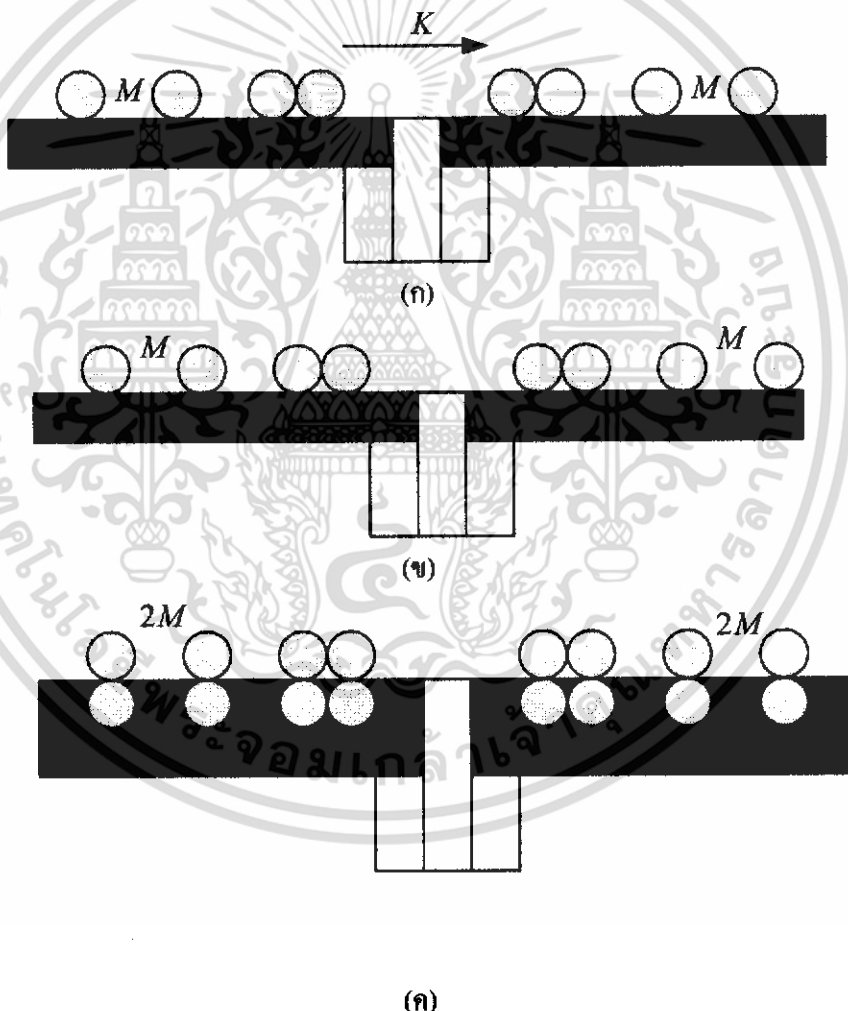
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$\begin{aligned} \vec{E} \times \vec{a}_n &= 0 \\ \vec{a}_n \times \vec{H} &= \vec{K} \end{aligned} \tag{2.16}$$

บนแผ่นแพร่กระจายคลื่นและพื้นกราวด์  
 เมื่อ  $\vec{a}_n$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ขนานกับพื้นผิว  $\vec{E}$  กับ  $\vec{H}$  คือสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนว  
 สัมผัสภายในสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

ซึ่งแหล่งจ่ายจะทำให้เกิดสนามในระยะไกลเหนือแผ่นแพร่กระจายคลื่น สนามไฟฟ้าที่อยู่ใต้พื้น  
 กราวด์จะเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.14 (ก) แสดงกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กในระนาบ ดังรูปที่ 2.14 (ข)  
 แสดงกระแสแม่เหล็ก และค่านำกระแสเชิงผิวจะเพิ่มเป็น 2 เท่า



รูปที่ 2.14 แหล่งจ่ายกระแสเชิงผิวอีกแบบหนึ่งที่ทำให้เกิดสนามในระยะไกลเหมือนกัน

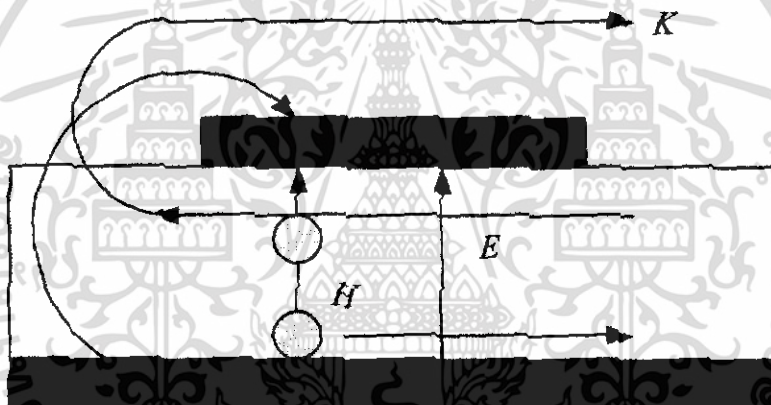
สภาวะดังกล่าวทั้ง 6 อย่างจะต้องมีการกระจายกระแสที่เที่ยงตรง เนื่องจากสามารถคำนวณหา  
 สนามในระยะไกลได้ถูกต้อง ถ้าวัสดุฐานรองเป็นเนื้อเดียวกัน ตามคุณสมบัติ (Isotropic)

การเหมือนกัน (Homogeneous) และมีการสูญเสียค่าความนำของตัวนำของส่วนแพร่กระจายคลื่น และพื้นกราวด์ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปมีค่าเป็นอนันต์ กระแสเชิงผิวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ สนามไฟฟ้าแนวสัมผัส  $\vec{M}$  เป็น

$$\vec{K} = \vec{a}_n \times \vec{H} \tag{2.17}$$

$$\vec{M} = \vec{E} \times \vec{a}_n \tag{2.18}$$

สมการทั้งสองแสดงความสัมพันธ์ของสนามภายในสายอากาศแผ่นไมโครสตริปกับกระแสเชิงผิว ดังรูปที่ 2.15 เพื่อความรวดเร็วในทางปฏิบัติ จะพิจารณาเพียงกระแสด้านบนและด้านล่างของส่วนกระจายคลื่น พังค์ชั้นของสคัลไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะทำให้ทราบส่วนที่แพร่กระจายที่เกิดจากกระแสเชิงผิวง่ายขึ้น ในขั้นแรกจะสมมติให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จุดใด ๆ ซึ่งอยู่ภายนอกสายอากาศแผ่นไมโครสตริป สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.17 และ 2.18



รูปที่ 2.15 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และสนามที่แพร่กระจายบริเวณขอบของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

ในขั้นแรก สมมติให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่จุดใด  $P(r, \theta, \phi)$  ซึ่งอยู่ภายนอกแผ่นไมโครสตริป สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.19 และ 2.20

$$\vec{E}_e(r) = \frac{-j}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - j\omega\vec{A} \tag{2.19}$$

$$\vec{H}_e(r) = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \tag{2.20}$$

โดยที่ตัวห้อย  $e$  ที่  $\vec{E}$  และ  $\vec{H}$  แสดงถึงสนามที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้า

- เมื่อ  $\mu$  คือ เพอร์มิบิลิตี (Permeability)  
 $\epsilon$  คือ เพอร์มิททิวิตี (Permittivity)  
 $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (Angular Frequency)  
 $\bar{A}$  คือ เวกเตอร์ศักย์แม่เหล็ก (Vector Magnetic Potential)

$\bar{A}$  สามารถหาได้จาก

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_s \bar{M}(r') \frac{e^{-jk_0|\bar{r}-\bar{r}'|}}{|\bar{r}-\bar{r}'|} ds' \quad (2.21)$$

เมื่อ  $k_0$  คือ จำนวนของคลื่นในอวกาศ

$\bar{M}(r')$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเชิงผิว ที่ห่างจากจุดกำเนิด

ในการทำงานเดียวกันโดยใช้เวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้า ( $\bar{F}$ ) สนามเนื่องจากสนามแม่เหล็ก สามารถแสดงได้ ดังสมการที่ 2.22

$$\begin{aligned} \bar{E}_m(r) &= -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \bar{F} \\ \bar{H}_m(r) &= \frac{-j}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \bar{F}) - j\omega\bar{F} \end{aligned} \quad (2.22)$$

โดยที่ตัวห้อย  $m$  ที่  $\bar{E}$  และ  $\bar{H}$  แสดงสนามที่เกิดจากสนามแม่เหล็กและเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้า สามารถหาได้จาก

$$\bar{F} = \frac{\epsilon}{4\pi} \iiint_s \bar{M}(r') \frac{e^{-jk_0|\bar{r}-\bar{r}'|}}{|\bar{r}-\bar{r}'|} \quad (2.23)$$

เพื่อความสะดวกจะตัดเทอม  $e^{-j\omega t}$  ซึ่งเกิดจากสนามที่เปลี่ยนแปลงตามสนามของเวลา (Time Varing Field) ดังนั้นสนามรวม คือ

$$\begin{aligned} \bar{E}(r) &= \bar{E}_e + \bar{E}_m \\ &= \frac{-j\nabla(\nabla \cdot \bar{A})}{\omega\mu\epsilon} - j\omega\bar{A} - \frac{\nabla \times \bar{F}}{\epsilon} \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\bar{H}(r) = \bar{H}_e + \bar{H}_m \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $\frac{\nabla \times \bar{A}}{\omega\mu\epsilon} - \frac{j\nabla(\nabla \cdot \bar{F})}{\omega\mu\epsilon} - j\omega\bar{F}$  อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้าและเวกเตอร์ศักย์แม่เหล็กที่นำไปใช้แก้ปัญหาสมการ 2 สมการ คือ

$$\begin{aligned}\nabla^2 \bar{A} + \omega^2 \mu \epsilon \bar{A} &= 0 \\ \nabla^2 \bar{F} + \omega^2 \mu \epsilon \bar{F} &= 0\end{aligned}\quad (2.26)$$

เมื่อพิจารณาสนามที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้า สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\begin{aligned}\bar{H}(r) &= \frac{\bar{E}}{\eta_0}(r) \\ \bar{E}(r) &= -j\omega \bar{A}\end{aligned}\quad (2.27)$$

และสำหรับสนามกระแสที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก คือ

$$\begin{aligned}\bar{H}(r) &= -j\omega \bar{F} \\ \bar{E}(r) &= \bar{H}(r)\eta\end{aligned}\quad (2.28)$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $120\pi$

สนามระยะไกลจะพิจารณาภายใต้เงื่อนไข หรือเป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของช่องเปิดคั่นนั้นจากสมการจะได้

$$\bar{E} = \frac{-j\omega \epsilon e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \iint_s K(r') [e^{-jk_0 r' \cos \phi}] ds' \quad (2.29)$$

จากสมการ ที่ 2.29

$$\bar{H} = \frac{-j\omega \epsilon e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \iint_s M(r') [e^{-jk_0 r' \cos \phi}] ds' \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\phi$  คือ มุมระหว่าง  $r$  กับ  $r'$

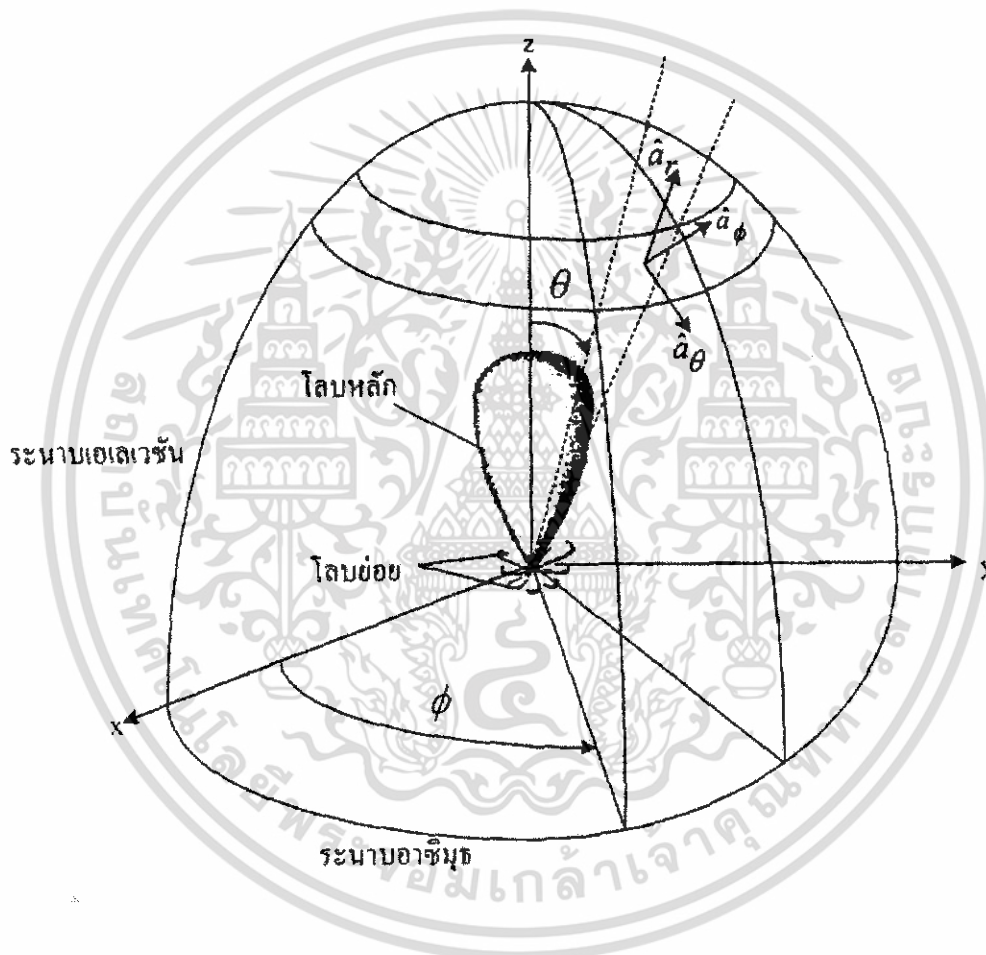
#### 2.4.5 สนามที่แพร่กระจายของสายอากาศไมโครสตริป

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนท (Space Coordinate) ส่วนใหญ่ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity), ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase), การโพลาไรเซชัน (polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

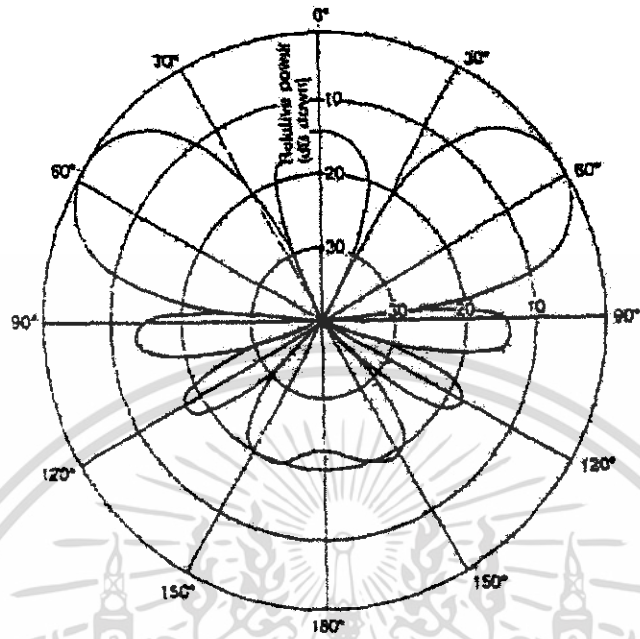
รูปที่ 2.16 แสดงระบบ โคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมี ที่มีค่าคงที่ที่มีชื่อเรียกว่ารูปการแพร่กระจายกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ที่มีชื่อเรียกว่า รูปแบบสนาม



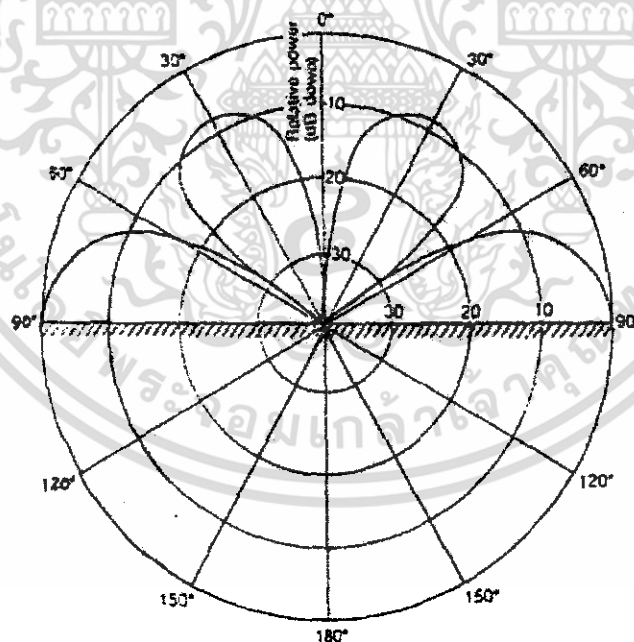
รูปที่ 2.16 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในสายอากาศ อาจจะมีทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นพุ่งขึ้นไปในท้องฟ้าหรือมุ่งไปในทิศทางต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบสายอากาศนั้นๆ โดยคุณสมบัติที่สำคัญอย่างยิ่งของสายอากาศก็คือรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่แสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้กระจายออกไปจากสายอากาศในทิศทางต่างๆ ตามธรรมชาติแล้วรูปแบบนี้จะมีลักษณะกระจายไปในสามมิติ แต่การเขียนรูปแบบการกระจายคลื่นในลักษณะสามมิตินั้นทำได้ลำบากดังนั้นโดยทั่วไปแล้ว การเขียนรูปแสดงรูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศจึงมักนิยมแบ่งเขียนกันอยู่ใน 2 ระนาบเท่านั้น คือการเอกสารเป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนรูปแสดงรูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบแนวนอนและในระนาบแนวตั้งซึ่งดูได้จากรูปที่ 2.17 และ 2.18



รูปที่ 2.17 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบแนวนอน

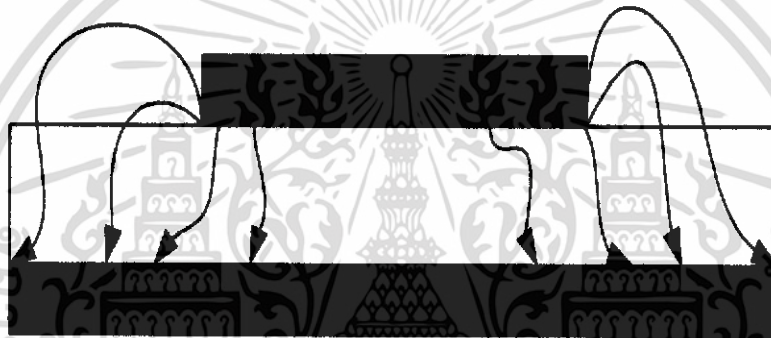


รูปที่ 2.18 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.6 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริป

ไมโครสตริปถึงแม้จะมีโครงสร้างง่าย ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปโดยละเอียดทางทฤษฎีนั้นเป็นสิ่งยุ่งยากมาก ทั้งนี้เป็นเพราะระบบแกนประสานที่ใช้และเงื่อนไขของขอบเขตของระบบค่อนข้างยุ่งยากเมื่อเทียบกับท่อนำคลื่น หรือสายนำสัญญาณชนิดอื่นในโหมด TEM มากแต่จะไม่ใช้โหมด TEM เสียทีเดียว เพราะมีสนามในแนวแกนร่วมอยู่ด้วยจึงนิยมเรียกโหมดดังกล่าวนี้ว่าโหมดกึ่ง TEM (Quasi TEM) ดังรูปที่ 2.19 แสดงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวาง ซึ่งไมโครสตริปที่มีสนามในแนวแกนอยู่ข้างนั้นเป็นเพราะมีโครงสร้างที่มีสารตัวกลาง และอากาศอยู่ในระบบเดียวกัน และในสภาพที่มีสนามแนวแกนเกิดอยู่ โหมดนั้นจะเกิดเป็นไฮบริดโหมด การที่คลื่นส่งผ่านไปโหมดกึ่ง TEM ซึ่งอนุโลมให้โหมดกึ่ง TEM นี้ ทำให้สามารถใช้หลักการวงกระจายในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของไมโครสตริปได้ กล่าวคือ ถ้าสามารถหาค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ จะนำค่าทั้งสองนี้ไปคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติได้



รูปที่ 2.19 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริป

อย่างไรก็ตามการหาค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของไมโครสตริปจะยุ่งยากกว่าสายอากาศคู่ขนานหรือสายอากาศโคแอกเซียล เพราะไมโครสตริปมีทั้งสารตัวกลางและอากาศอยู่ในบริเวณที่พลังงานของคลื่นส่งผ่าน สำหรับการหาค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวนั้น จะไม่ถูกรบกวนจากการที่มีสารตัวกลาง ถึงแม้ว่าการหาค่าคาปาซิแตนซ์จะยุ่งยากกว่าปกติ แต่มีวิธีทำให้ง่ายขึ้นโดยใช้วิธีหาค่าคงตัวของไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant:  $\epsilon_{eff}$ ) ของระบบซึ่งจะรวมผลของสารตัวกลาง และอากาศเข้าด้วยกัน

เนื่องจากสารตัวกลางทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่หรือดิสเพอร์ชันเชิงวัสดุ ดังนั้น  $\epsilon_{eff}$  ที่หาได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไปด้วย อย่างไรก็ตามจากการศึกษาทางทฤษฎี และการทดลองของผู้เชี่ยวชาญพบว่า ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 2 GHz ลงมา ค่า  $\epsilon_{eff}$  จะเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีของไฟฟ้าสถิตน้อยมาก จึงสามารถอนุโลมให้ใช้ค่า  $\epsilon_{eff}$  ของไฟฟ้าสถิตได้สำหรับช่วงความถี่สูงกว่า 2 GHz ต้องคำนึงถึงค่าดิสเพอร์ชัน โคนทำการปรับแต่งค่า  $\epsilon_{eff}$  ให้เหมาะสมกับความถี่ที่จะใช้งาน

ในการหาค่า  $\epsilon_{eff}$  ของกรณีไฟฟ้าสถิตนั้นจะใช้แนวความคิดของวงจรกระจายดังต่อไปนี้เมื่อคลื่นที่ส่งผ่านไปไมโครสตริปเป็นโหมด TEM อิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติ  $Z_c$  จะเขียนในรูปของค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว  $L$  และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว  $C$  ได้ในรูปต่อไปนี้

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.31)$$

ในขณะเดียวกันกับความเร็วเฟส  $V_p$  จะเขียนได้ดังนี้

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ 2.31 ทำให้อยู่ในรูปของ  $V_p$  กับ  $L$  และ  $C$  ได้ดังนี้

$$Z_c = V_p L = \frac{1}{V_p C} \quad (2.33)$$

ในขั้นต่อไป พิจารณาที่วัสดุฐานรองรับที่เป็นสารตัวกลางถูกดูดออกไป เหลือแต่อากาศเพียงอย่างเดียวที่โอบล้อมไมโครสตริปอยู่ในสภาพเช่นนี้ค่าความเร็วเฟสของคลื่น TEM ที่ส่งผ่านจะเท่ากับความเร็วแสง และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะเปลี่ยนแปลง โดยที่ค่าอินดักแตนซ์จะไม่ถูกกระทบ ถ้าให้ค่าคาปาซิแตนซ์เปลี่ยนไปนั้นมีค่าเป็น  $C_0$  กับความเร็วเฟสดังแสดงในสมการที่ 2.34

$$c = \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2.34)$$

ในขณะเดียวกันกับค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติ จะเขียนได้ดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2.35)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.31 หาค่าด้วยสมการที่ 2.35 จะได้ผลดังนี้ คือ

$$\frac{C}{C_0} = \left[ \frac{c}{V_p} \right]^2 \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $C/C_0$  นี้ตามนิยามโดยทั่วไปคือค่าคงตัวของสารตัวกลางที่โอบล้อมระบบเก็บประจุอยู่ในกรณีทีพิจารณาอยู่นี้ ค่านี้จะเปรียบเสมือนค่าคงตัวของสารตัวกลางสัมพัทธ์ประสิทธิภาพของระบบไมโครสตริปที่มีวัสดุฐานรองเป็นสารตัวกลางและด้านบนเป็นอากาศอยู่นั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการดังนี้

$$\epsilon_{eff} = \left[ \frac{C}{C_0} \right]^2 \quad (2.37)$$

จากสมการที่ 2.32 ถึงสมการที่ 2.35 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z_c$ ,  $Z_0$  และ  $\epsilon_{eff}$  ได้ดังนี้

$$Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \text{ หรือ } Z_0 = Z_c \sqrt{\epsilon_{eff}} \text{ หรือ } \epsilon_{eff} = \left( \frac{Z_0}{Z_c} \right)^2 \quad (2.38)$$

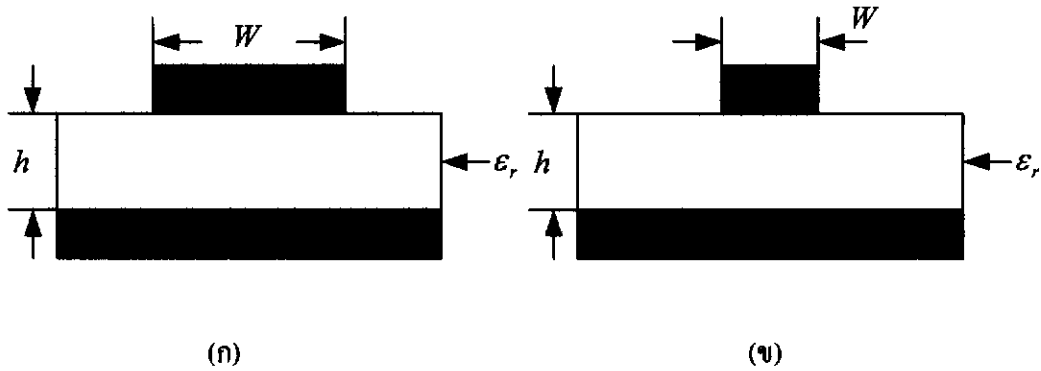
จากผลที่เห็นได้ว่า ถ้าสมการสามารถรู้ค่า  $\epsilon_{eff}$  ได้ จะทำให้สามารถคำนวณคุณสมบัติอื่นๆ ตามมาได้ อย่างไรก็ตามค่า  $\epsilon_{eff}$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามความกว้างของไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของวัสดุฐานรอง ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้โดยพิจารณา 2 กรณีต่อไปนี้ กรณีแรกคือ กรณีที่  $w/h \gg 1$  ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.20 ในกรณีนี้เนื่องจากเส้นแรงไฟฟ้าจะอยู่ส่วนบริเวณที่มีแถบสตริป หรือกล่าวอีกในหนึ่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านให้อยู่ในบริเวณดังกล่าวเกือบทั้งหมด สภาพดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าคงตัวของสารตัวกลางสัมพัทธ์ประสิทธิภาพมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $\epsilon_r$  ในกรณีเส้นแรงไฟฟ้าจะผ่านวัสดุฐานรองครึ่งหนึ่งและผ่านอากาศครึ่งหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ค่าคงตัวของสารตัวกลางสัมพัทธ์ประสิทธิภาพมีค่าเข้าใกล้  $(\epsilon_r + 1)/2$  จากที่อธิบายนี้จะเห็นได้ว่าค่า  $\epsilon_{eff}$  จะเปลี่ยนแปลงตามค่า  $w/h$  และจะมีขอบเขตบนและ

$$\frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) \leq \epsilon_{eff} \leq \epsilon_r \quad \text{ต่อไปนี้} \quad (2.39)$$

และเพื่อสะดวกในการคำนวณ และการออกแบบต่อไปนี้ ได้มีการเขียนค่า  $\epsilon_{eff}$  ในรูปต่อไปนี้

$$\epsilon_{eff} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \leq \epsilon_{eff} \leq \epsilon_r \quad 2.87 \quad (2.40)$$

ค่า  $q$  ในสมการที่ 2.40 นี้เรียกว่าฟิลลิงแฟกเตอร์ (Filling Factor) ซึ่งหมายถึงตัวประกอบที่แสดงให้รู้ว่าวัสดุฐานรองที่เป็นตัวกลางจะมีผลต่อโครงสร้างนั้นมากน้อยแค่ไหน

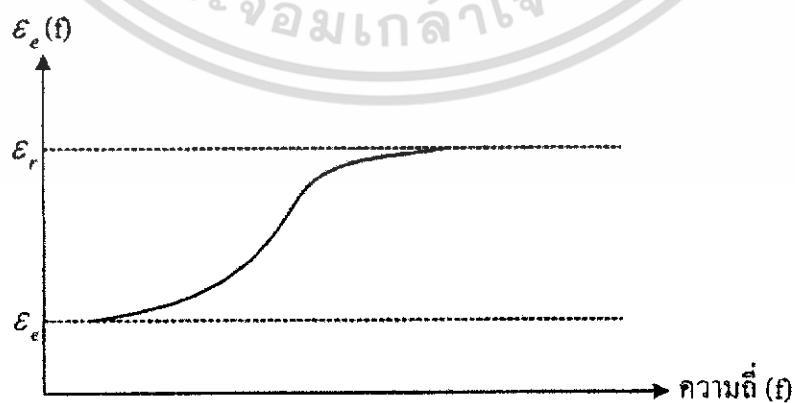


รูปที่ 2.20 ไมโครสตริปที่ (ก)  $w/h \gg 1$  และ (ข)  $w/h \ll 1$

เมื่อเขียนค่า  $\epsilon_{eff}$  ตามสมการที่ 2.40 นี้ ค่า  $q$  จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามค่า  $w/h$  ในกรณีที่มีความถี่ที่ใช้งานสูงกว่า 2 GHz นั้น คิสพอร์ชันเชิงวัสดุของวัสดุฐานรองจะมีผลมากกว่าการคำนึงถึงผลกระทบของคิสพอร์ชัน ในส่วนนี้จะทำได้โดยการพิจารณาว่าเมื่อเปลี่ยนไป ความเร็วเฟสจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งทำให้ค่า  $\epsilon_{eff}$  ตามสมการที่ 2.40 เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\epsilon_{eff}(f) = \left\{ \frac{C}{v_p(f)} \right\}^2 \quad (2.41)$$

เมื่อพิจารณาค่า  $\epsilon_{eff}(f)$  ตามสมการที่ 2.41 นี้จะพบว่าในช่วงความถี่ต่ำที่  $f \rightarrow 0$  นั้นค่า  $\epsilon_{eff}(f)$  จะเข้าหาค่า  $\epsilon_{eff}$  ของกรรไกรไฟฟ้าสถิตย์ และเมื่อ  $f$  มีค่าสูงขึ้นและเข้าหา  $\infty$  ค่า  $\epsilon_{eff}$  ของวัสดุฐานรองค่าความเร็วเฟสของวัสดุฐานรองจะเข้าหาความเร็วแสงในสารตัวกลางที่เป็นวัสดุฐานรอง โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงของค่า  $\epsilon_{eff}(f)$  ตามความถี่จะเป็นดังรูปที่แสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 คุณสมบัติคิสพอร์ชัน  $\epsilon_e(f)$  ในไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 สายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก (square spiral microstrip antenna)

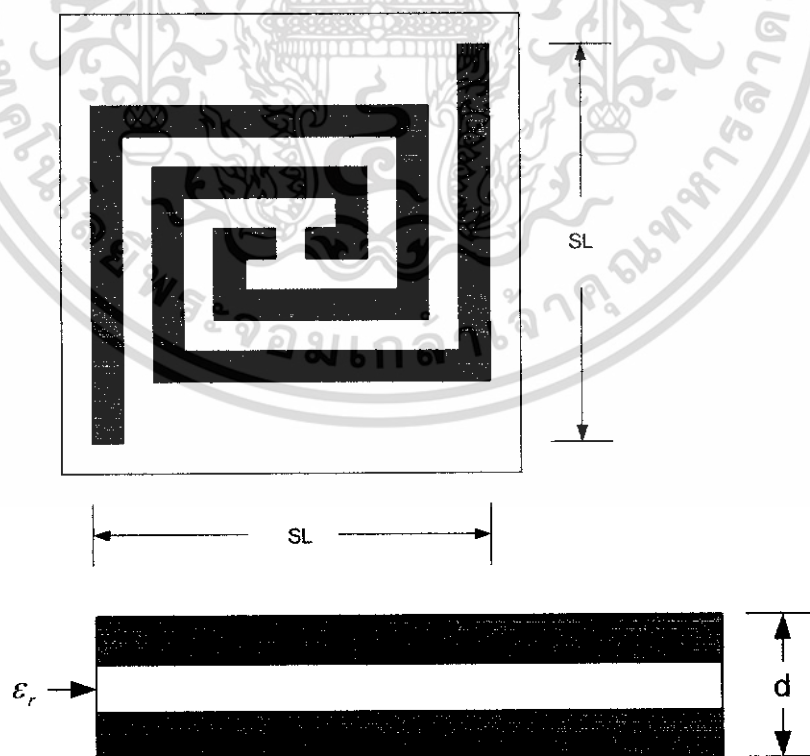
ด้วยคุณสมบัติที่มีแบนด์วิดท์กว้างและโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนจึงทำให้สายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก มีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้งานไร้สาย

ตามความต้องการที่จะเพิ่มสเปคตรัมที่กระจายและระบบมัลติฟังก์ชัน RF สายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้างจึงกลายมาเป็นที่ต้องการ เนื่องจากถูกใช้อย่างกว้างขวางในเชิงการค้า ราคาที่ถูกก็เป็นส่วนที่สำคัญด้วยเหมือนกัน สายอากาศไมโครสตริปที่รูปร่างแบบวงก้นหอย (spiral) เป็นทางออกที่ดีสำหรับหลายๆ การใช้งาน ชนิดของสายอากาศวงก้นหอย (spiral) ที่ใช้มากที่สุดคือ สายอากาศแบบวงก้นหอยที่มีมุมเท่ากัน หกเหลี่ยมสองแขน (two arm equiangular circular spiral)

ในปี 1993 สายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก (square spiral microstrip antenna) ได้ถูกสร้างขึ้นแล้วได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับสายอากาศวงก้นหอยแบบมีมุมเท่ากัน (Archimedean) ที่มีขนาดเท่ากัน ซึ่งประสิทธิภาพที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในทางปฏิบัติสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก มีข้อดีกว่าสายอากาศวงก้นหอยแบบมีมุมเท่ากัน (Archimedean) เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพมากกว่าในด้านของขนาดพื้นที่ที่เล็กกว่า

วิธีที่ทำให้ได้มาตรฐานสำหรับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการสร้างสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งจะแสดงถึงขอบเขตที่กว้างในการออกแบบสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากที่จะถูกกำหนดโดยค่าพารามิเตอร์เพียง 4 ค่า

ตัวอย่างการวิเคราะห์หว่าสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก ได้ถูกใช้งานได้อย่างไรแสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก (standard square spiral parameters)

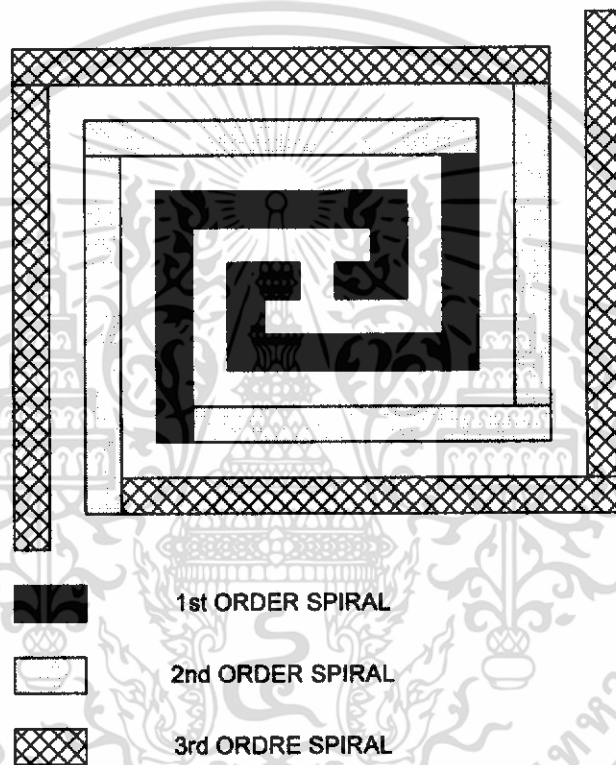
โครงสร้างของสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก ได้ถูกกำหนดโดยค่าพารามิเตอร์ 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.22 และ 2.23

Order คือ ค่าจำนวนรอบของวงก้นหอยของสายอากาศ

$d$  คือ ค่าความหนาของวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศ

SL คือ ค่าความกว้างของสายอากาศ

$\epsilon_r$  คือ ค่า ัซบสเตรทของสารตัวกลาง (substrate permittivity)



รูปที่ 2.23 โครงสร้างของสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าการนำไฟฟ้าของทองแดง ( $\sigma$ ) และขอบเขตของกราวด์เพลน จะถูกสมมุติให้มีค่าเป็นอนันต์ และความกว้างของวงก้นหอยจะมีค่าเท่ากับความกว้างของช่องที่วางอยู่

### 2.5.2 การใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ (An overview of the numerical analysis method)

เทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณได้ใช้สำหรับการวิเคราะห์นี้ ซึ่งจะได้พิสูจน์ให้เห็นถึงสเปกตรัมโดเมนของกรีนฟังก์ชันที่จะอธิบายเกี่ยวกับค่าโคเอเล็กทริกของสารฉัซบสเตรท, กราวด์เพลน, และ สภาวะที่เป็นช่องว่างระหว่างส่วนที่แพร่กระจายคลื่นกับกราวด์เพลน สำหรับกระแสที่อยู่ในส่วนที่แพร่กระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นที่เป็นวงกั้นหอยสามารถอธิบายได้ด้วยการอินทิเกรตที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าว

การใช้วิธีของโมเมนต์ สมการนี้จะถูกลดให้อยู่ในรูปแบบข้างล่างนี้ ซึ่งสมการนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและค่ากระแสความนำ ซึ่งจะสามารถแบ่งย่อยออกเป็นเมตริก 2 มิติของเรกเทงคูลาร์อิลิเมนต์ดังสมการที่ 2.42

$$\begin{bmatrix} E_x^{pq} \\ E_y^{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx}^{pqmn} & Z_{xy}^{pqmn} \\ Z_{yx}^{pqmn} & Z_{yy}^{pqmn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_x^{mn} \\ J_y^{mn} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

เมื่อ  $p = m =$  Number of x directed matrix elements

$q = n =$  Number of y directed matrix elements

จากสมการที่ 1 Z เมตริกจะแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ของส่วนที่แพร่กระจายคลื่น ซึ่งจะประกอบด้วยของจำกัดที่เกี่ยวกับช่องว่าง และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารฉนวน โดยที่เราจะให้สนามไฟฟ้า (E) เข้าไปที่แต่ละรอยต่อของส่วนที่แพร่กระจายคลื่น และค่ากระแส (J) สามารถคำนวณได้จากการอินทิเกรตเมตริก

ต่อมาเทคนิคได้ถูกประยุกต์ใช้กับสายอากาศไมโครสตริปรูปแบบอื่นๆ มากกว่าแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก ทำให้รูปร่างของฟังก์ชัน ได้ถูกแนะนำเพื่อตั้งเทอมเมตริกอิสระให้เป็นศูนย์ เมื่อไม่มีค่าความนำ เนื่องจากความเหมาะสมของการวิเคราะห์โดยใช้วิธีโมเมนต์ เทคนิคที่เหมือนกันจึงถูกใช้กับสายอากาศวงกั้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากด้วย เพราะสายอากาศวงกั้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากเป็นสายอากาศแบบทราเวลลิง ดังนั้นวิธีปฏิบัติของมันจึงต่างจากสายอากาศไมโครสตริปแพท

การกระตุ้น (Excitation) ของสายอากาศวงกั้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกสร้างเป็นสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งให้ศักย์ 1 โวลต์ตามขวาง ช่องว่างระหว่างสองแขนของสายอากาศวงกั้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกตั้งเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 3 ซึ่งการกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่าง 2 แขนถูกสร้างโดยค่าสนามไฟฟ้า (E) เมตริก 2 มิติที่เบาบาง (delta gap feed excitation) ค่าสนามไฟฟ้าถูกใช้หาความหนาแน่นกระแส (J) โดยแก้สมการเมตริกในสมการที่ (2.42)

เรารู้เทอมของเมตริกความหนาแน่นของกระแส (J) สนามไฟฟ้า (E) ถูกสร้างโดยแต่ละอิลิเมนต์จะคำนวณได้ และหลักของซูเปอร์โพสิชัน ให้กับทุกอิลิเมนต์ เพื่อจะได้สูตรสำหรับสนามไฟฟ้า (E) ที่แพร่จากสายอากาศ ดังสมการที่ 2.43

$$E_\theta^{mn}(r, \theta, \phi) \quad E_\phi^{mn}(r, \theta, \phi) \quad (2.43)$$

สมการนี้ค่อนข้างซับซ้อนและไม่จำเป็น การใช้สมการ (2.43) สามารถหาอัตราขยาย (gain) และ อัตราส่วนของแกน (axial ratio) ได้จากสมการที่ 2.44 และ 2.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(\theta, \phi) = \frac{\left[ |E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right]}{30 |I_{in(peak)}|^2 R_{in}} \quad (2.44)$$

$$AR = \cot \left\{ \frac{1}{2} \sin^{-1} \left[ \sin(2\gamma) \sin(\delta) \right] \right\} \quad (2.45)$$

โดย

$$\gamma = \tan^{-1} \left[ \frac{E_\theta(\theta, \phi)}{E_\phi(\theta, \phi)} \right] \quad \text{หรือ} \quad \gamma = \tan^{-1} \left[ \frac{E_\phi(\theta, \phi)}{E_\theta(\theta, \phi)} \right] \quad (2.46)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}\{E_\phi(\theta, \phi)\}}{\text{Re}\{E_\phi(\theta, \phi)\}} \right] - \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}\{E_\theta(\theta, \phi)\}}{\text{Re}\{E_\theta(\theta, \phi)\}} \right] \quad (2.47)$$

สมการ (2.44) ถึง (2.47) ใช้หาอัตราการขยาย และ อัตราส่วนของแกน ของวงกั้นหอยแบบ ที่เหลี่ยมมุมฉากในทิศทางใดก็ได้ เนื่องจากเรารู้ว่ามีศักย์ไฟฟ้าอยู่ตามขวางของ gap เป็น  $v_{in} = 1 + j0$  เป็น ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จำนวนได้โดยใช้สมการที่ 2.48

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in(peak)}} \quad (2.48)$$

ถ้าลักษณะเฉพาะของวงจรแม่เหล็กหาได้ที่ feed ของสายอากาศ ค่า VSWR ก็คำนวณได้ เหมือนกัน

## 2.6 ทฤษฎีเบื้องต้นของสายอากาศอิสระเชิงความถี่ (Frequency - independent antennas)

การวิเคราะห์สายอากาศอิสระเชิงความถี่ นำเสนอโดย Rumsey และ ตัวอย่างโดย Elliott สำหรับ รูปร่าง 3 มิติ เราเริ่มโดยการสมมติสายอากาศเชิงเรขาคณิต (geometry) ซึ่งการอธิบายที่ดีที่สุดสามารถ อธิบายได้โดยโคออดิเนตวงกลม  $(r, \theta, \phi)$  มีปลายทั้งสองวงปิดอินฟินิตี้ (infinite) ไปยังจุดเริ่มต้นและแต่  $\pi$  ละอันจะสามารถกันโดยดำเนินการตาม  $\theta = 0$ , แกน  $\pi$

เป็นการสมมติสายอากาศให้เป็นตัวนำสมบูรณ์ (perfectly conducting) บริเวณรอบๆจะมีลักษณะ ที่เหมือนกับเป็นอินฟินิตี้ และตัวกลางไอโซโทรปิก (isotropic) และพื้นผิวหรือขอบบนผิวของมันอธิบาย โดยส่วนโค้งดังสมการที่

$$r = F(\theta, \phi) \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $r$  จะแสดงถึงระยะตามพื้นผิวหรือขอบ (edge) ถ้าสายอากาศเป็นสเกลความถี่ที่มีค่าเป็น  $k$  เท่าและมีค่าต่ำกว่าความถี่เริ่มต้น พื้นผิวทางฟิสิกส์ของสายอากาศจะต้องถูกทำให้มีขนาด  $k$  ที่ใหญ่กว่าแต่ยังคงรักษาทิศทางของกระแสเหมือนเดิม เพราะฉะนั้นพื้นผิวใหม่จะสามารถอธิบายได้โดยสมการที่

$$r' = kF(\theta, \phi) \quad (2.50)$$

พื้นผิวเดิมและพื้นผิวใหม่ที่กำหนดนี้ ซึ่งไม่เพียงแต่มีความคล้ายคลึงกันแต่ยังมีความสอดคล้องกันด้วย (ถ้าพื้นผิวทั้งสองเป็นอินฟินิตี) โดยที่ความสอดคล้องกันเราสามารถกำหนดโดยการหมุนค่าใน  $\phi$  แต่ไม่อนุญาตให้มีการย้ายเพราะปลายทั้งสองของพื้นผิวทั้งสองอยู่ที่จุดเริ่มต้น การหมุนใน  $\theta$  เป็นการห้ามเพราะปลายทั้งสองอยู่ในลักษณะสมมาตรตามค่า  $\theta = 0$ , แกน  $\pi$

สำหรับสายอากาศตัวที่สอง จะมีความสอดคล้องกับแบบแรก โดยมันต้องเป็นการหมุนโดยมุม  $c$  ซึ่งแสดงดังสมการที่

$$kF(\theta, \phi) = F(\theta, \phi + c) \quad (2.51)$$

มุมการหมุนของ  $c$  ขึ้นอยู่กับค่า  $k$  แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับ  $\theta$  หรือ  $\phi$  ความสอดคล้องกันทางฟิสิกส์เป็นที่เข้าใจว่า จุดเริ่มต้นทางไฟฟ้าของสายอากาศจะประพฤติตัวคล้ายกันที่ความถี่ทั้งสอง แต่ถึงอย่างไรก็ตามรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะหมุนเป็นมุมกวาด (azimuthal) ด้วยมุม  $c$  สำหรับค่าของ  $k$  ที่ไม่จำกัด ( $0 \leq k \leq \infty$ ) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะหมุนด้วยค่า  $c$  ในมุม  $\phi$  กับความถี่ เพราะว่าค่า  $c$  ขึ้นอยู่กับค่า  $k$  แต่รูปร่างของมันจะไม่เปลี่ยนแปลงเพราะฉะนั้นค่าความต้านทาน (impedance) และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นอิสระเชิงความถี่

การได้มาซึ่งฟังก์ชัน  $F(\theta, \phi)$  แสดงให้เห็นว่าทั้งสองข้างของสมการที่ เป็นอนุพันธ์กับค่า  $c$  ดังแสดงในสมการที่

$$\frac{d}{dc} [kF(\theta, \phi)] = \frac{dk}{dc} F(\theta, \phi) = \frac{\partial}{\partial c} [F(\theta, \phi + c)] = \frac{\partial}{\partial(\phi + c)} [F(\theta, \phi + c)] \quad (2.52)$$

และมุม  $\phi$  โดยที่

$$\frac{\partial}{\partial \phi} [kF(\theta, \phi)] = k \frac{\partial F(\theta, \phi)}{\partial \phi} = \frac{\partial}{\partial \phi} [F(\theta, \phi + c)] = \frac{\partial}{\partial(\phi + c)} [F(\theta, \phi + c)] \quad (2.53)$$

สมการที่ กับ เป็นผลทำให้เกิด

$$\frac{dk}{dc} F(\theta, \phi) = k \frac{\partial F(\theta, \phi)}{\partial \phi} \quad (2.54)$$

จากสมการที่ เราสามารถเขียน ได้ใหม่คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{k} \frac{dk}{dc} = \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial \phi} \quad (2.55)$$

เมื่อสมการข้างซ้ายของ เป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กับค่ามุม  $\theta, \phi$  สมการทั่วไปของพื้นผิว  $r = F(\theta, \phi)$  ของสายอากาศเป็น

$$r = F(\theta, \phi) = ef(\theta) \quad (2.56)$$

ซึ่ง  $a = \frac{1}{k} \frac{dk}{dc}$

และ  $f(\theta)$  เป็นฟังก์ชัน completely arbitrary

เพราะฉะนั้นสายอากาศที่คุณลักษณะทางความถี่ พื้นผิวของมันต้องอธิบายได้โดยสมการที่ ซึ่งจะทำให้เป็นผลสำเร็จโดยลักษณะจำเพาะของฟังก์ชัน  $f(\theta)$  หรืออนุพันธ์ของมัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### ผลการวิเคราะห์ และ การออกแบบ

##### 3.1 โครงสร้างที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศแบบวงก้นหอยสี่เหลี่ยมมุมฉากจะอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า IE3D ช่วยในการวิเคราะห์ หาโครงสร้างของสายอากาศที่ทำให้คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่ดีที่สุด เช่น คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น โดยใช้วิธีวิเคราะห์หาโครงสร้างที่ดีที่สุด ของสายอากาศที่ได้ทำการเปลี่ยนค่าไป เช่น ความหนาของแผ่นFR4 ขนาดความกว้างของแผ่นFR4 จำนวนรอบของวงก้นหอยและค่าเพอร์มิติวิตีตัวกลางของสายอากาศ

เนื่องจากระบบอากาศยานไร้คนขับใช้ช่วงความถี่ในการสื่อสารกับสถานีภาคพื้นดินแบ่งออกเป็นช่วงความถี่ตั้งแต่ 400 MHz -2.6 GHz ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบสายอากาศเพื่อนำมาใช้กับช่วงความถี่นี้ โดยในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆของสายอากาศจะทำการวิเคราะห์เป็นลำดับขั้นตอนในแบบเดียวกันทั้งช่วงความถี่โดยที่จะแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของโครงสร้างของสายอากาศไปตามลำดับขั้นตอนดังนี้

สร้างสายอากาศที่จะนำไปวิเคราะห์โดยใช้โครงสร้างของสายอากาศแบบวงก้นหอยสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งมีความหนาของแผ่นFR4 โดยที่  $d = 1.6$  มิลลิเมตร และค่าเพอร์มิติวิตีของสารที่ขึ้นระหว่างแผ่นทองแดงหรือ  $\epsilon_r = 4.4$  โดยเนื่องจากค่าความหนาและค่าเพอร์มิติวิตีเป็นค่าตายตัวของแผ่นFR4 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ คือ

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in(Peak)}} \quad (3.1)$$

การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งสามารถทำได้โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เพื่อดูว่าคลื่นสามารถส่งผ่านกำลังไปได้มากน้อยเท่าไร ในทางอุดมคติแล้วต้องการอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) 1:1 ซึ่งหมายถึงสายอากาศสามารถส่งผ่านกำลังไปได้ทั้งหมดสายอากาศที่นำไปใช้งานในช่วงกว้างแถบความถี่จำเป็นต้องพิจารณาว่าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงกว้างแถบความถี่ที่นำไปใช้งานจะต้องเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัติคือจะต้องการค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ไม่ควรเกิน 2:1 โดยจะทำการพิจารณาตลอดทั้งช่วงกว้างแถบความถี่ที่นำไปใช้งานการพิจารณาช่วงกว้างแถบความถี่ของสายอากาศที่สามารถใช้งานได้ดังที่กล่าวมาแล้วได้จากสมการที่ 3.2

$$\Delta f(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_C} \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่  $f_H$  คือค่าความถี่สูงสุดที่สามารถทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

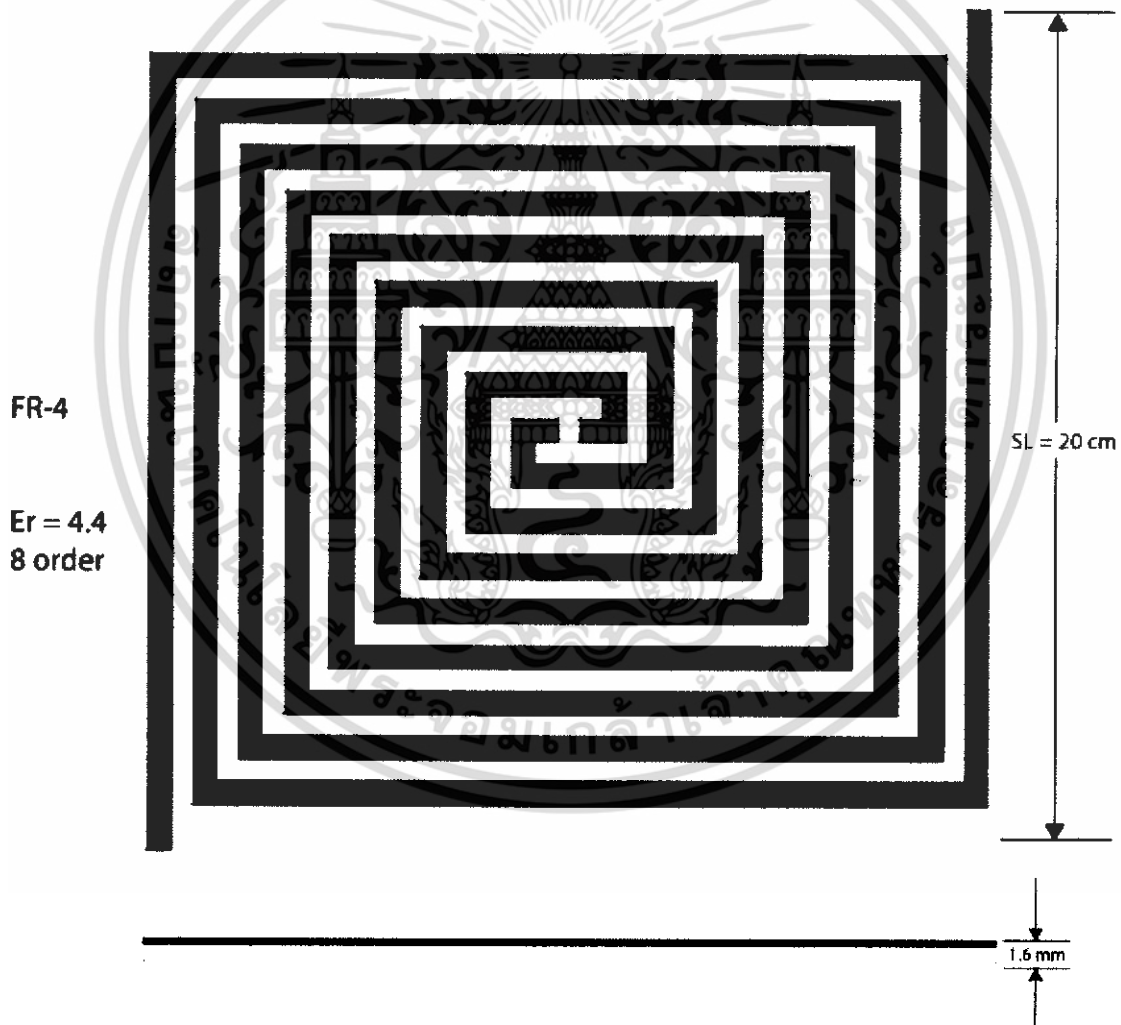
$f_L$  คือค่าความถี่ต่ำสุดที่สามารถทำงานได้

$f_C$  คือค่าความถี่กลาง

### 3.2 โครงสร้างที่นำไปวิเคราะห์ของสายอากาศ

เมื่อออกแบบให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศแบบวงก้นหอยสี่เหลี่ยมมุมฉากเป็น 80 โอห์ม โดยใช้แผ่น FR4 ในการทดลองสร้างสายอากาศเพราะฉะนั้นค่าความหนาจึงมีค่าเท่ากับ  $d = 1.6$  มิลลิเมตร และค่าค่าเพอร์มิติวิตีของสารตัวกลางหรือ  $\epsilon_r = 4.4$  และค่าความยาวของสายทองแดง  $SL = 22$  เซนติเมตร และจำนวนรอบของวงก้นหอยหรือค่าออร์เดอร์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 8 ออร์เดอร์

นำค่าต่างๆที่ได้จากทดลองในโปรแกรม IE3D ไปสร้างสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากในแต่ละช่วงความถี่เพื่อทดลองเปลี่ยนโครงสร้างต่างๆในโปรแกรม IE3D ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สายอากาศที่นำไปวิเคราะห์มีโครงสร้างเป็นสายอากาศวงก้นหอยสี่เหลี่ยมมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 โครงสร้างที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์การวางตัวป้อนสัญญาณแบบบาลัน

เมื่อไหร่ที่เราต้องการใช้สายอากาศแบบบาลานซ์ เช่น สายอากาศแบบไดโพล, สายอากาศแบบรูป, หรือ สายอากาศแบบวงก้นหอย การป้อนสัญญาณเข้าไปต้องมีความสอดคล้องกับตัวสายอากาศด้วย เพราะว่าสายอากาศแบบบาลานซ์ นั้น ต้องการป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าแบบบาลานซ์ จึงทำให้ต้องใช้บาลัน

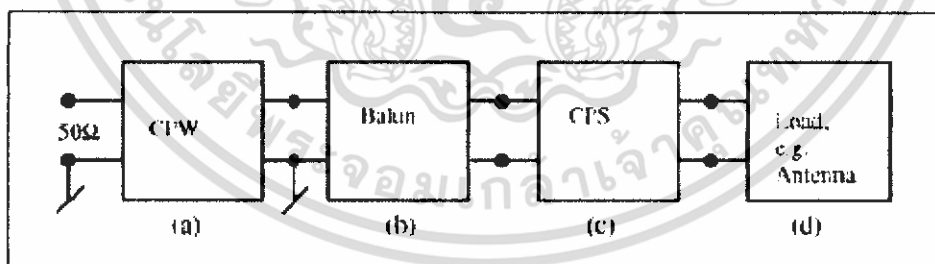
#### 3.3.1 หลักการทำงานของบาลัน

บาลันแบบกว้างทำหน้าที่แปลง อันบาลานซ์โคพลาน่าเวฟไกด์ (Unbalanced Coplanar Waveguide) ไปเป็นบาลานซ์โคพลาน่าสตริป (Balanced Coplanar Strip) บาลันจากรูปที่ 3.2 จะเป็น ที่ใช้กับสายอากาศวงก้นหอย ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 บาลันที่ใช้กับสายอากาศวงก้นหอย

การที่เราจะรู้ถึงคุณลักษณะ ของบาลัน นั้น เราต้องมาดู โครงสร้างของบาลัน กันก่อน จากรูปที่ 3.3 จะเป็นโครงสร้างของบาลัน ซึ่งจะใช้อธิบายถึงการทำงานส่วนต่างของ บาลัน



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของบาลัน

- โคพลาน่าเวฟไกด์ในส่วน (a) เนื่องจากค่าความต้านทานที่ต่างกันระหว่างตัวสายอากาศแบบก้นหอยสองแขน (two-arm spiral antenna) กับตัวสายอินบาลานซ์ โคแอกซ์เชียด จึงจำเป็นที่จะต้องทำการแมท ค่าความต้านทานให้เข้ากันจึงจะทำให้สายอากาศนั้นมีประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแมท ค่าความต้านทานระหว่างสายโคแอกซ์เฮลิค กับ ตัวบาลัน นั้นจะทำการแปลงเป็นลำดับขึ้นไปจาก 50 โอห์ม ไปเป็นค่าความต้านทานของสายอากาศ ที่เราจะนำไปต่อด้วย โดยใช้ทฤษฎีของเซฟวีเซฟมัลติเซ็กชั่น

- บาลันในส่วน (b) เป็นส่วนที่จะแปลงจากโหมคอินบาลานซ์ ไปเป็นโหมคบาลานซ์ ตัวโพลาน่าเวฟไกด์ (a) และตัวโพลาน่าสตริป (b) จะเป็นแค่ตัวรับและตัวส่งสำหรับสายอากาศเท่านั้น
- โพลาน่าสตริปไลน์ (c) เป็นตัวที่เชื่อมระหว่างเอาท์พุทของบาลานซ์ กับ สายอากาศแบบบาลานซ์และความยาวระหว่างตัวบาลัน กับตัวสายอากาศ นั้นคือความยาวของสตริปไลน์ จะต้องทำให้สั้นที่สุดเพื่อจะนำไปต่อกับสายอากาศ

ต่อไปเป็นตัวอย่างการแปลงความต้านทานจากสายโคแอกซ์เฮลิค ไปจนถึงตัวสายอากาศ



รูปที่ 3.4 การแปลงความต้านทานของบาลัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D และผลการทดลอง

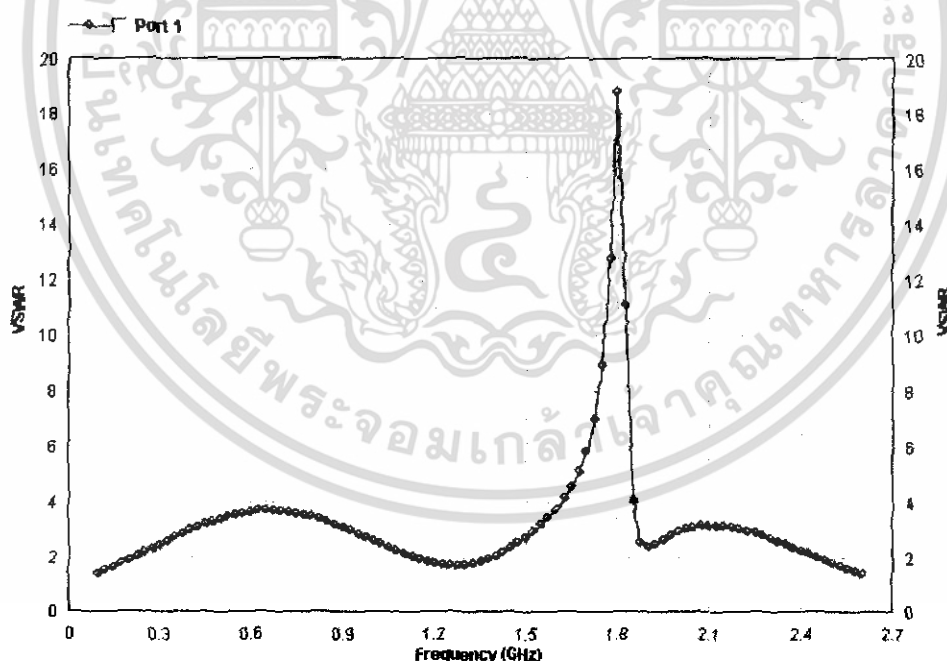
#### 4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศ

เมื่อสร้างสายอากาศที่มีโครงสร้างจางวงกันหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากนั้น จะต้องทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศเป็นลำดับดังนี้

#### 4.2 คุณสมบัติของตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าของสายอากาศ

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศที่จะนำไปใช้ใน ช่วงความถี่แถบกว้างเนื่องจากเราก่อแบบให้เป็นสายอากาศแบบวงกันหอยชนิดสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งเป็นสายอากาศแบบบาลานซ์ ดังนั้นจึงต้องทำการป้อนสัญญาณเข้าไปให้มีความสอดคล้องกับตัวสายอากาศด้วย เนื่องจากว่าถ้าเราทำการใช้สายโคแอกเชียลเป็นตัวป้อนสัญญาณจะทำให้คุณสมบัติในช่วงความถี่แถบกว้างของสายอากาศถูกลดทอนไปเพราะสายโคแอกเชียลมีคุณสมบัติอันบาลานซ์ ดังนั้นเราจึงต้องใช้บาลันแบนกว้าง ทำหน้าที่แปลงอันบาลานซ์โคพลาเนอ์โวก์ไปเป็นบาลานซ์โคพลาเนอ์โวก์เพื่อที่จะใช้เป็นตัวป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศวงกันหอย ซึ่งจะสามารถพิจารณาคุณสมบัติของตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าของสายอากาศได้จากรูปที่ 4.1

แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าของสายอากาศ

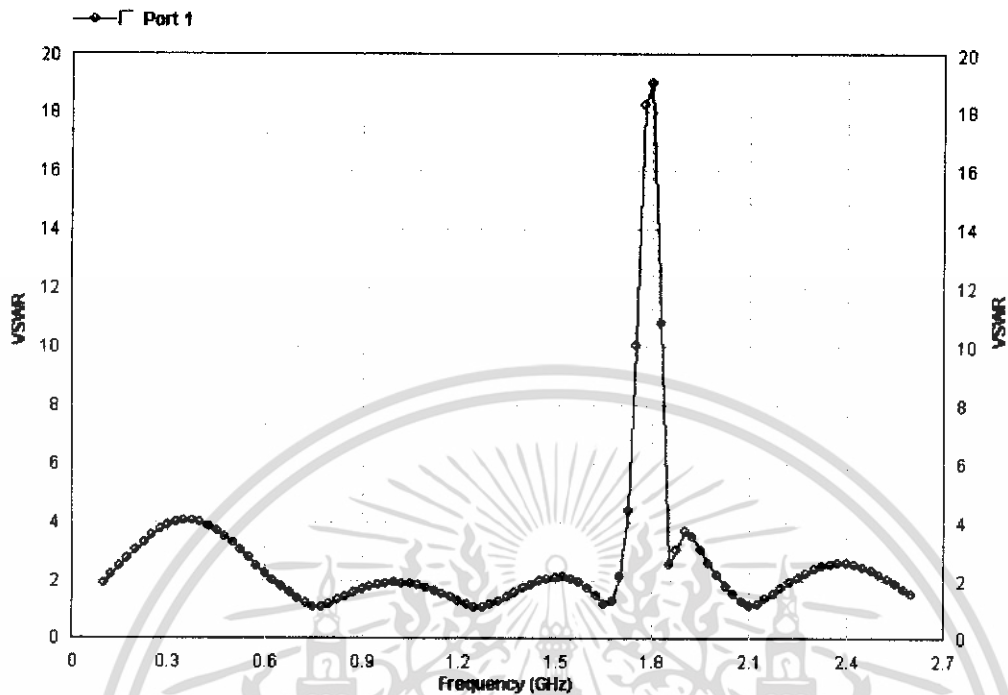


รูปที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าของสายอากาศ

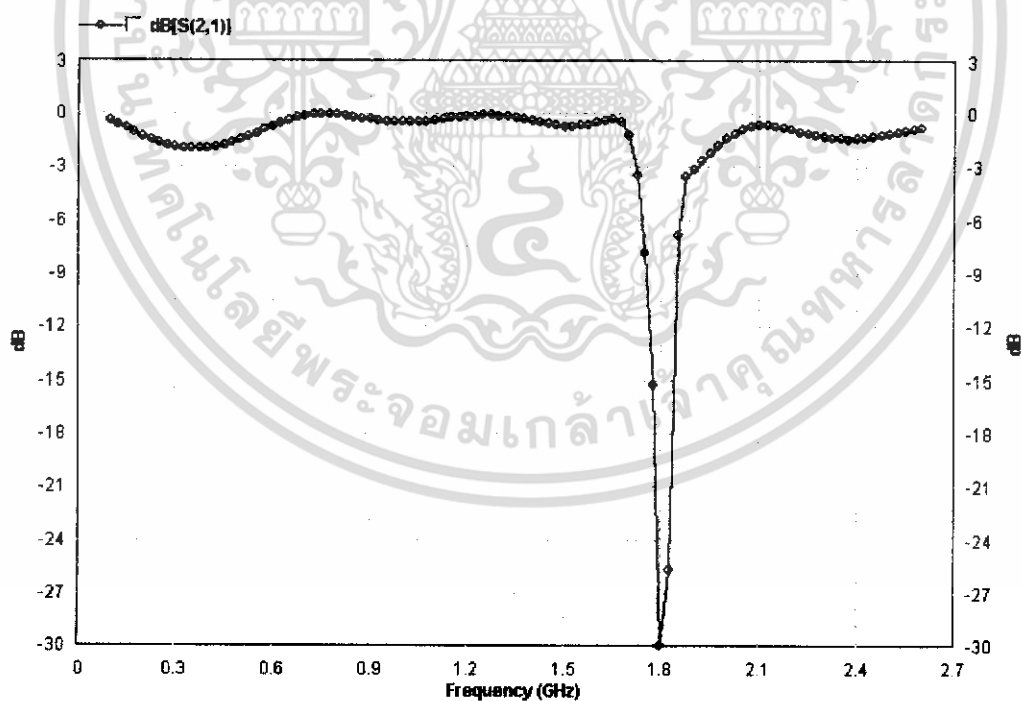
เนื่องจากจะทำการวิเคราะห์ว่าบาลันนั้นมีคุณสมบัติรองรับการป้อนสัญญาณไปสู่สายอากาศได้ถึงย่านความถี่ไหน จึงต้องนำตัวป้อนสัญญาณสองตัวมาต่อกัน หรือที่เรียกว่าการต่อ บาลัน หู บาลัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถพิจารณาคุณลักษณะของตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าของสายอากาศที่ต่อแบบบาลัน ทุ บาลัน ได้  
จากรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าที่ต่อแบบ บาลัน ทุ บาลัน

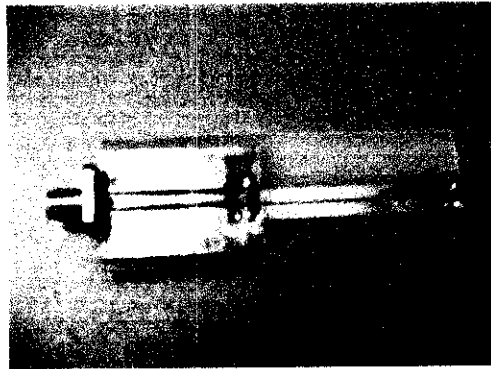


รูปที่ 4.3 แสดงอัตรการแทรกสอดของตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าที่ต่อแบบ บาลัน ทุ บาลัน

เมื่อดูจากผลการจำลองที่ได้ออกมาจึงทำให้สรุปได้ว่า ควรจะเลือกใช้บาลันที่มี วัสดุเป็นแผ่น เอฟอาร์ 4  
ซึ่งมีค่า  $\epsilon_r = 4.4$  ความหนา 1.6 มิลลิเมตร และ ยาว 7.2 เซนติเมตร กว้าง 2.5 เซนติเมตร

ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้า

#### 4.3 คุณลักษณะของสายอากาศ

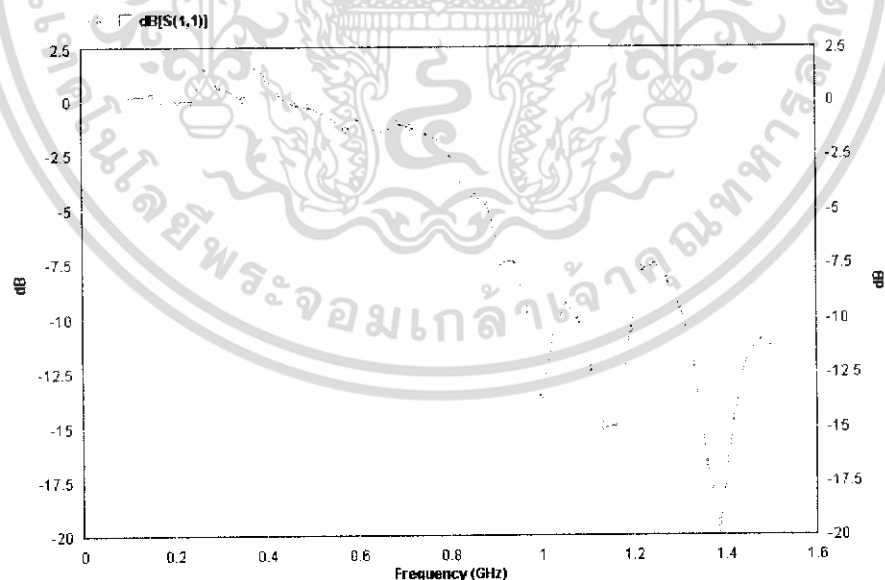
เมื่อเรานำเอาส่วนที่เป็นสายอากาศวางกันหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากและส่วนที่เป็นตัวป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าของสายอากาศมาประกอบกันจะทำให้เราได้ค่า

##### 4.3.1 คุณลักษณะอัตราสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss Ratio)

กำลังงานที่คลื่นแพร่กระจายออกไปนั้นจะมีค่าอัตราสูญเสียย้อนกลับคิดเป็น dB ในทางปฏิบัติจะต้องการอัตราสูญเสียย้อนกลับมีค่าน้อยหรือมีสัญญาณย้อนกลับต่ำนั่นเอง โดยที่จะพิจารณาในช่วงกว้างแถบความถี่ที่สายอากาศสามารถนำไปใช้งานได้

##### 4.3.1 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ทำการป้อนสัญญาณแบบบาลัน

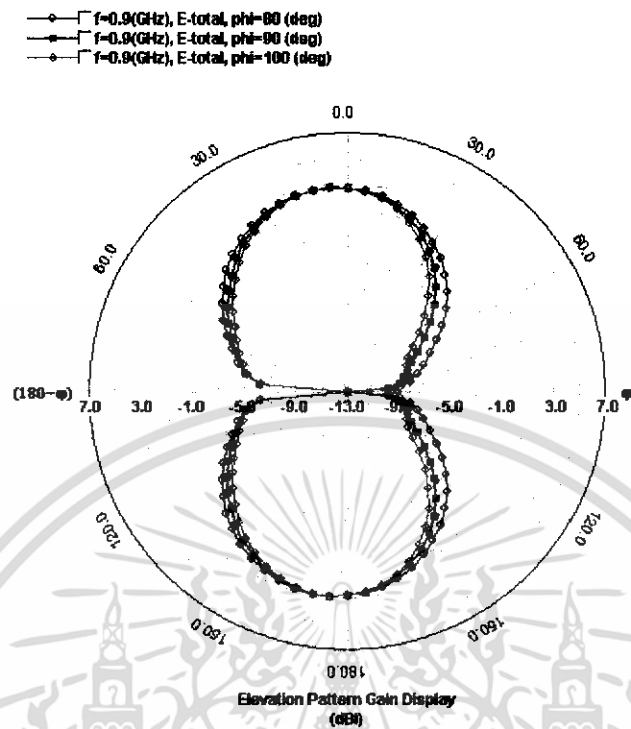
ในช่วงความถี่ 100 MHz – 1.5 GHz



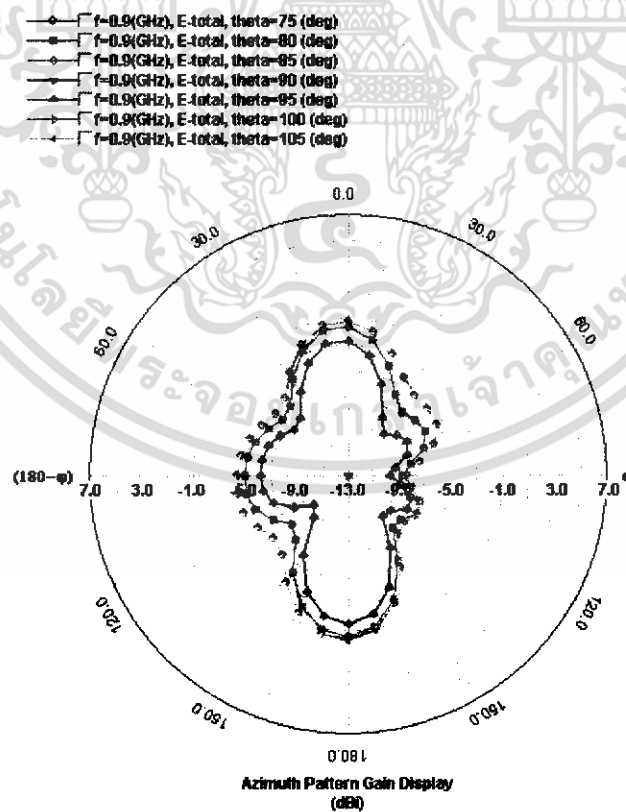
รูปที่ 4.5 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ทำการป้อนสัญญาณแบบบาลัน ในช่วงความถี่ 100 MHz – 1.5 GHz

จากนั้นเราได้ทำการจำลองผลการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวางกันหอยสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ความถี่ที่ 900 MHz และที่ความถี่ที่ 2.45 GHz ซึ่งจะแสดงผลดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

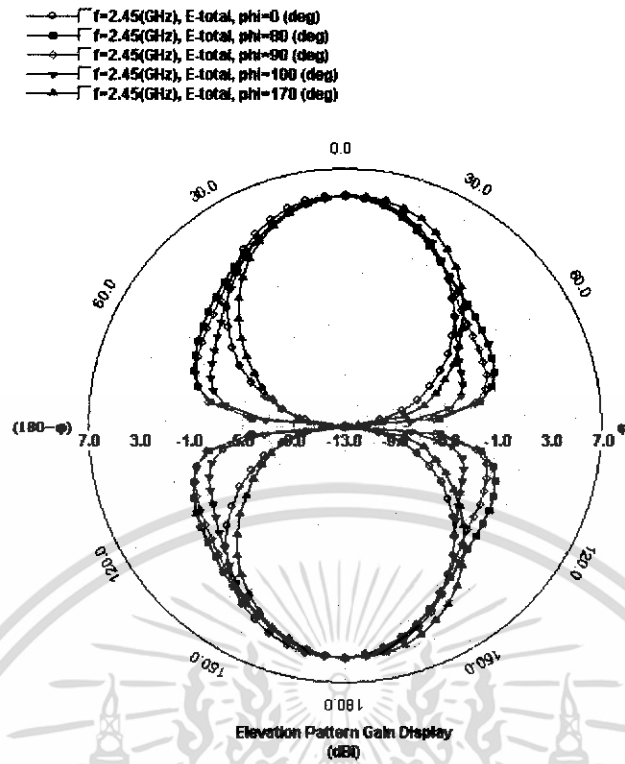


รูปที่ 4.6 แสดงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 900 MHz ในแนวมุมยก

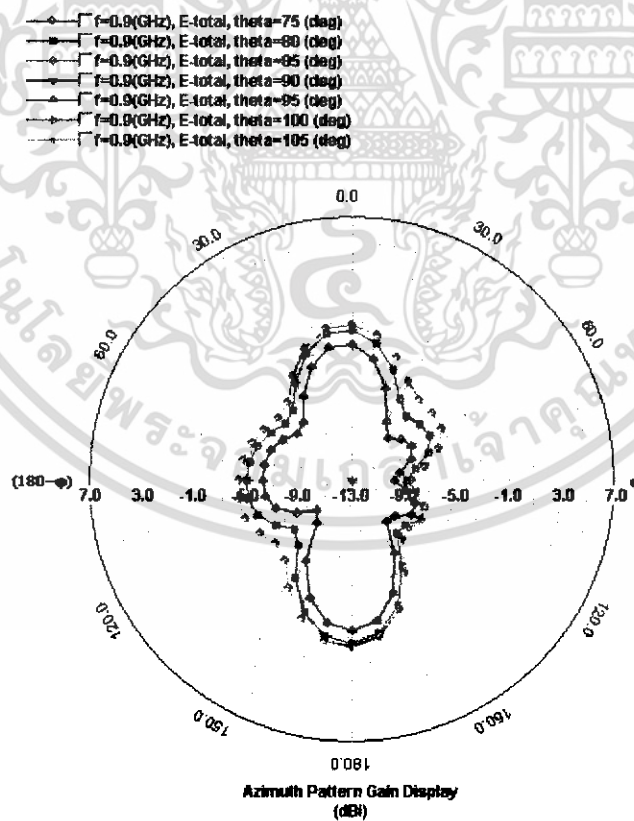


รูปที่ 4.7 แสดงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 900 MHz ในแนวมุมกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz ในแนวมุมยก



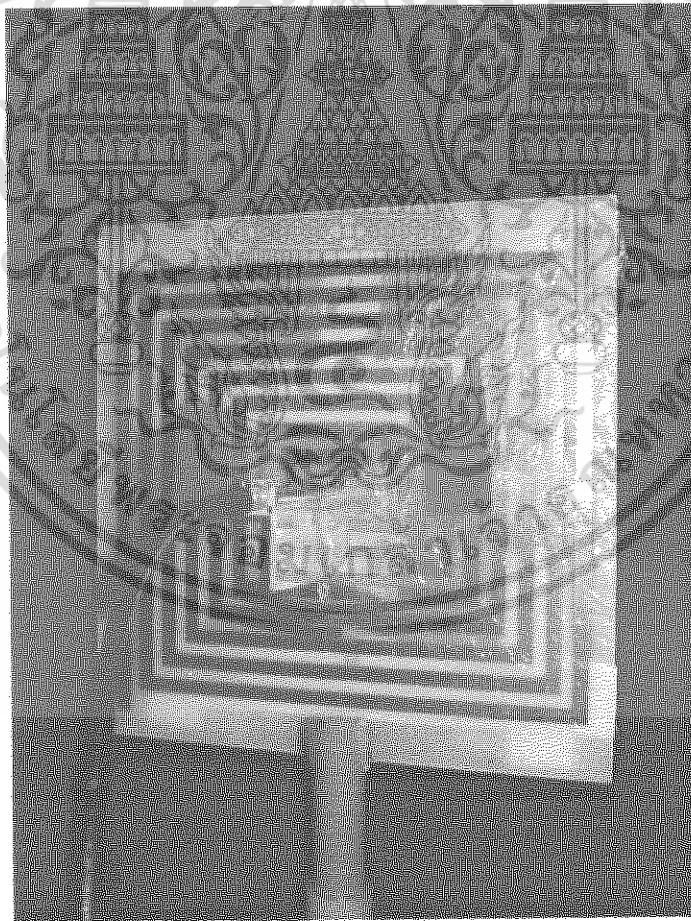
รูปที่ 4.9 แสดงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz ในแนวมุมกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศที่จะนำไปใช้ใน ช่วงความถี่แถบกว้าง ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 400 MHz -2.6 GHz จะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงที่ต้องการนำไปใช้งาน โดยจะวิเคราะห์ที่ความถี่ 900 MHz ซึ่งเป็นช่วงแถบความถี่ด้านต่ำ ที่ความถี่ 1.6 GHz เป็นช่วงแถบความถี่กลาง และสุดท้ายจะวิเคราะห์ที่ช่วงแถบความถี่ 2.13 GHz ซึ่งเป็นช่วงแถบความถี่ด้านสูงในการใช้งานของสายอากาศ

#### 4.4 โครงสร้างขั้นสุดท้ายที่ออกแบบก่อนนำไปทำการทดสอบ

คุณลักษณะของสายอากาศแบบวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ได้จากโครงสร้างขั้นสุดท้ายเมื่อผ่านการวิเคราะห์จากโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนที่จะนำโครงสร้างเหล่านี้ไปสร้างสายอากาศจริง จากรูปผลการจำลองค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถเห็นคุณลักษณะในช่วงความถี่แถบกว้างที่สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ช่วงซึ่งค่าที่จะนำไปใช้งานจริงจะอยู่ในช่วง 520MHz -2.6GHz ด้วยคุณลักษณะที่มีแถบความถี่กว้างทำให้เราสามารถขยายขอบเขตการใช้งานในช่วงความถี่ต่างๆ ได้มากขึ้น โดยที่เรานำค่าที่ได้จากการออกแบบครั้งแรกไปวาดอีกครั้งในโปรแกรม Illustrator CS ก่อนนำไปสร้างเป็นสายอากาศที่ใช้งานจริง โดยที่สายอากาศจะมีรูปร่างและขนาดดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 โครงสร้างสายอากาศวงก้นหอยสี่เหลี่ยมมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR)

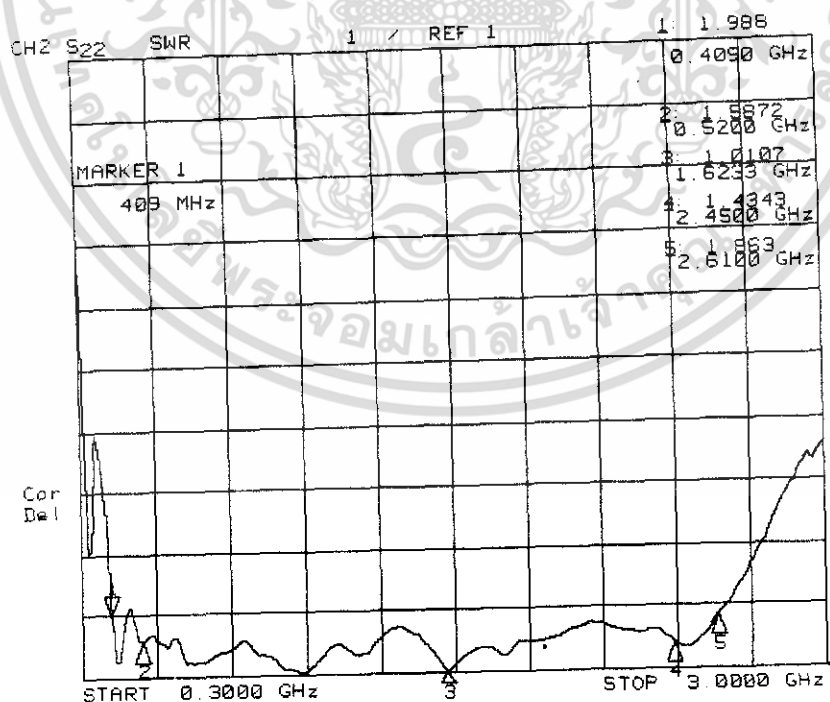
การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งสามารถทำได้โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เพื่อดูว่าคลื่นสามารถส่งผ่านกำลังไปได้มากน้อยเท่าไร ในทางอุดมคติแล้วต้องการ SWR 1:1 ซึ่งหมายถึงสายอากาศสามารถส่งผ่านกำลังไปได้ทั้งหมดสายอากาศที่นำไปใช้งานในช่วงกว้างแถบความถี่จำเป็นต้องพิจารณาว่าค่า SWR ในช่วงกว้างแถบความถี่ที่นำไปใช้งานจะต้องเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัติ คือจะต้องการค่า SWR ไม่ควรเกิน 2:1 โดยจะทำการพิจารณาตลอดทั้งช่วงกว้างแถบความถี่ที่นำไปใช้งาน การพิจารณาช่วงกว้างแถบความถี่ของสายอากาศที่สามารถใช้งานได้ดังที่กล่าวมาแล้วได้จากสมการที่ 4.1

$$\Delta f(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_C} \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่  $f_H$  คือค่าความถี่สูงสุดที่สามารถทำงานได้  
 $f_L$  คือค่าความถี่ต่ำสุดที่สามารถทำงานได้  
 $f_C$  คือค่าความถี่กลาง

##### 4.5.1 การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

สายอากาศในช่วงความถี่จะพิจารณาที่ช่วงความถี่ 520 MHz – 2.63 GHz ได้เป็นอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแสดงดังรูป 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่(GHz)	อัตราส่วนคลื่นนิ่ง
0.52	1.58 : 1
1.62	1.01 : 1
2.45	1.43 : 1
2.61	1.66 : 1

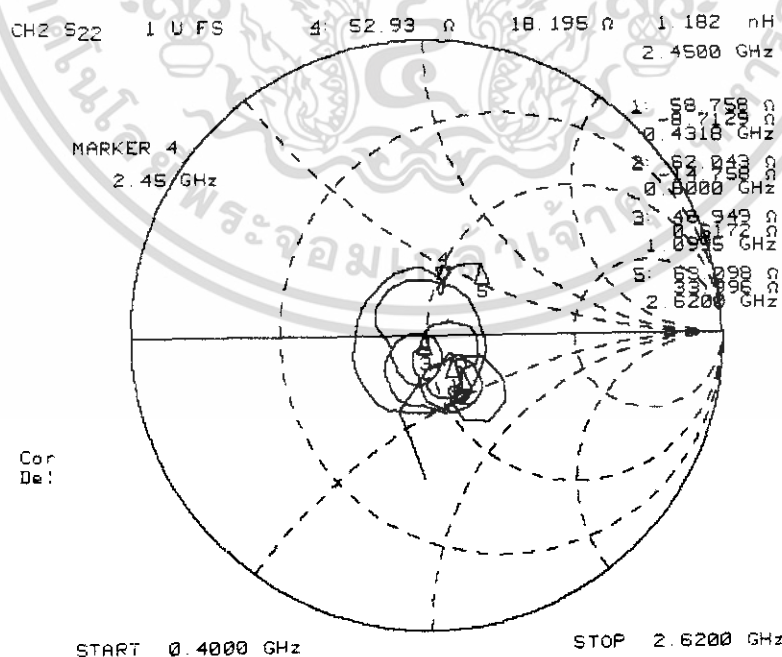
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

ผลจากการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงกว้างแถบความถี่ที่นำไปใช้งานพบว่าสายอากาศแบบวงกั้นหอยสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่สามารถยอมรับได้คือ SWR น้อยกว่า 2:1 ในช่วงความถี่ที่ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 520 MHz – 2.61 MHz จะเห็นได้ว่าสายอากาศมีประสิทธิภาพมากพอที่จะนำไปใช้งานกับระบบอากาศยานไร้คนขับ

#### 4.6 การทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็นคุณลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะใช้ระบบ 50 โอห์ม เมื่อสายอากาศและสายนำสัญญาณมีอิมพีแดนซ์เท่ากันจะทำให้การสะท้อนกลับของสัญญาณต่ำ ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในทั้งสองช่วงความถี่แสดงดังหัวข้อถัดไป

##### 4.6.1 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ



รูปที่ 4.12 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

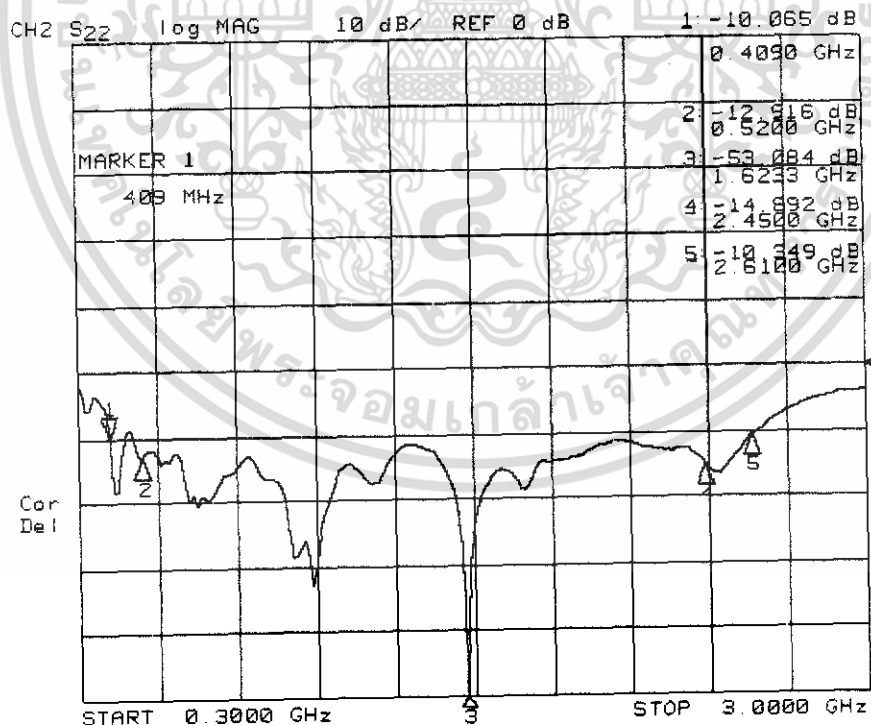
ความถี่ (GHz)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
0.431	58.78 - j8.712
0.800	62.043 - j14.758
1.09	49.949 + j0.617
2.62	69.098 + j33.996

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

#### 4.7 การทดสอบอัตราสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss Ratio)

กำลังงานที่คลื่นแพร่กระจายออกไปนั้นจะมีค่าอัตราสูญเสียย้อนกลับคิดเป็น dB ในทางปฏิบัติจะต้องการอัตราสูญเสียย้อนกลับมากๆ หรือมีสัญญาณย้อนกลับต่ำนั่นเอง โดยที่จะพิจารณาในช่วงกว้างแถบความถี่ที่สายอากาศสามารถนำไปใช้งานได้

##### 4.7.1 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ



รูปที่ 4.13 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

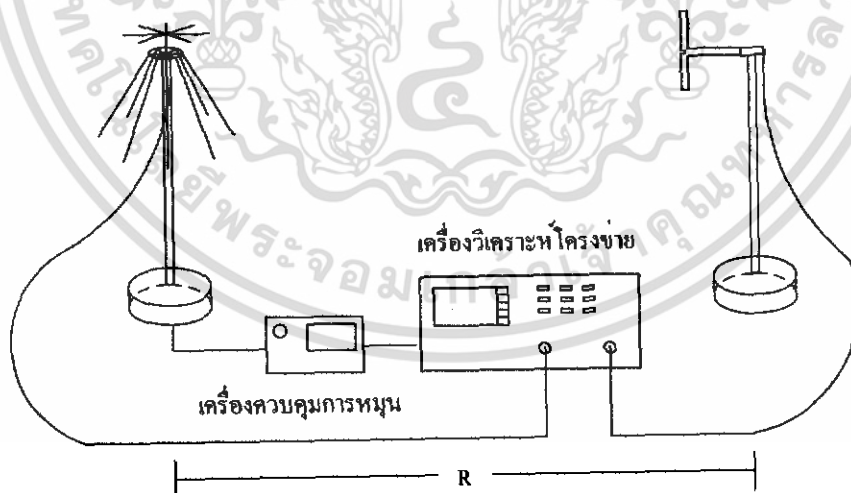
สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ความถี่ (GHz)	ค่าอัตราการสูญเสียย้อนกลับ (dB)
0.52	-12.916
1.62	-53.004
2.45	-14.982
2.61	-10.349

ตารางที่ 4.3 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

#### 4.8 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นคุณลักษณะของสายอากาศที่จะใช้พิจารณาว่าสายอากาศนั้นมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานหรือไม่ คือแบบรูปของสายอากาศจะต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ระบบอากาศยานไร้คนขับจะติดต่อกับสถานีภาคพื้นดินถ้าหากว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีลักษณะที่ไม่เหมาะสมอาจจะทำให้การส่งข้อมูลจากระบบอากาศยานไร้คนขับมายังสถานีภาคพื้นดินรวมถึงการควบคุมระบบอากาศยานจากสถานีภาคพื้นดินนั้นมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะใช้เครื่องมือในการทดสอบคือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยที่การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นต้องคำนวณระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับด้วยโดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R \geq \frac{2(D_1 + D_2)^2}{\lambda} \quad (4.2)$$

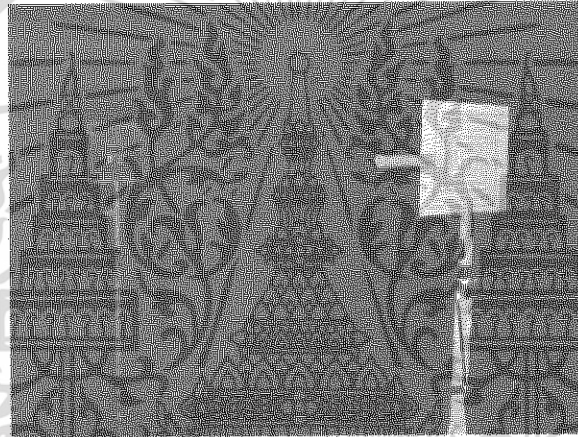
เมื่อ

$D_1$  และ  $D_2$  คือมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศส่งและรับตามลำดับ

$\lambda$  คือความยาวคลื่นที่ความถี่สูงสุดที่ใช้งาน

#### 4.8.1 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะทำการทดสอบที่ทั้งสามความถี่ในช่วงกว้างแถบความถี่ที่นำไปใช้งานที่ความถี่ดังนี้ โดยจะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบมุมยกและในระนาบมุมกวาด ในรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงการวัดแบบรูปการแพร่กระจายในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาดของสายอากาศในช่วงความถี่ 520MHz -2.61GHz ตามลำดับ



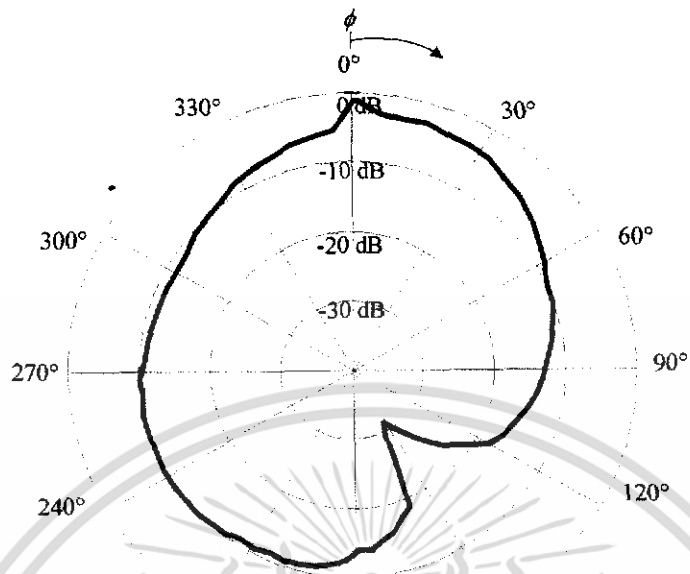
รูปที่ 4.15 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก



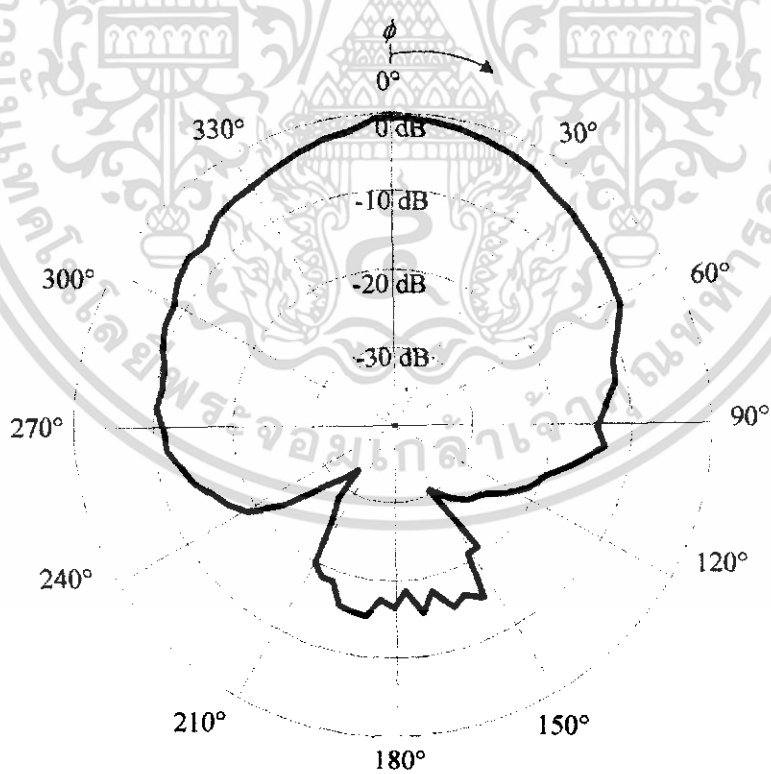
รูปที่ 4.16 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 900 MHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18

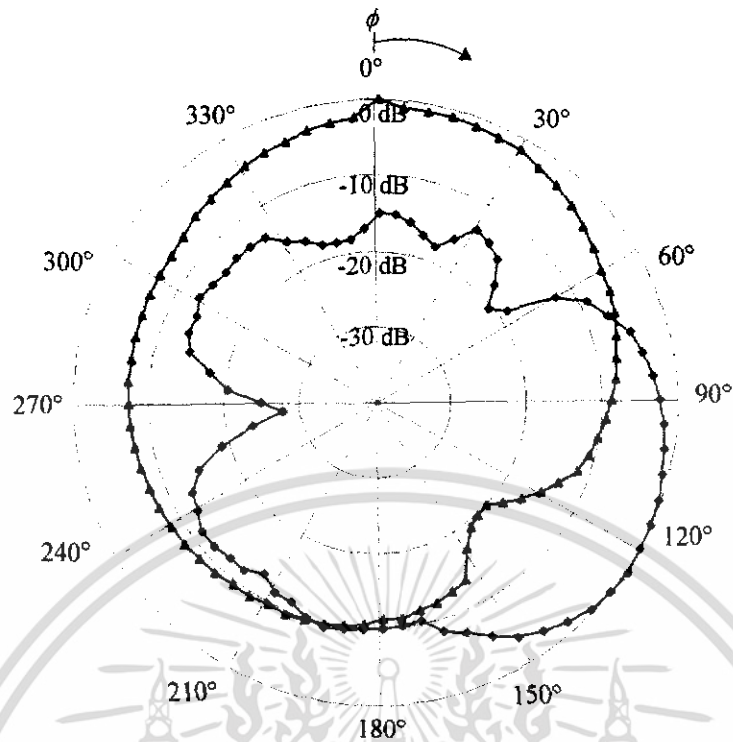


รูปที่ 4.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก

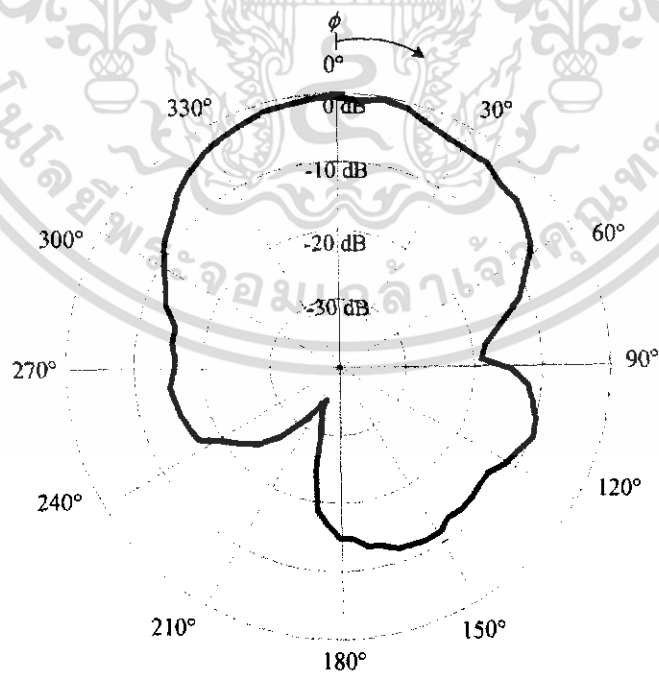


รูปที่ 4.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

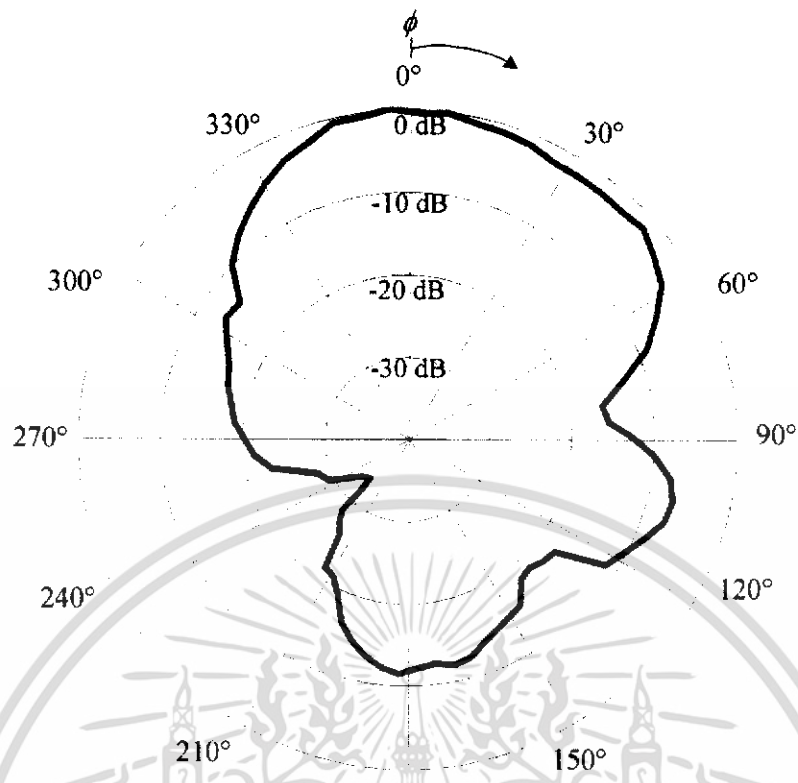


รูปที่ 4.19 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยกและมุมกวาด โดยที่ เส้นกราฟสีแดงจะแสดงรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก เส้นกราฟสีน้ำเงินจะแสดงรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ความถี่ 1.62 GHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21

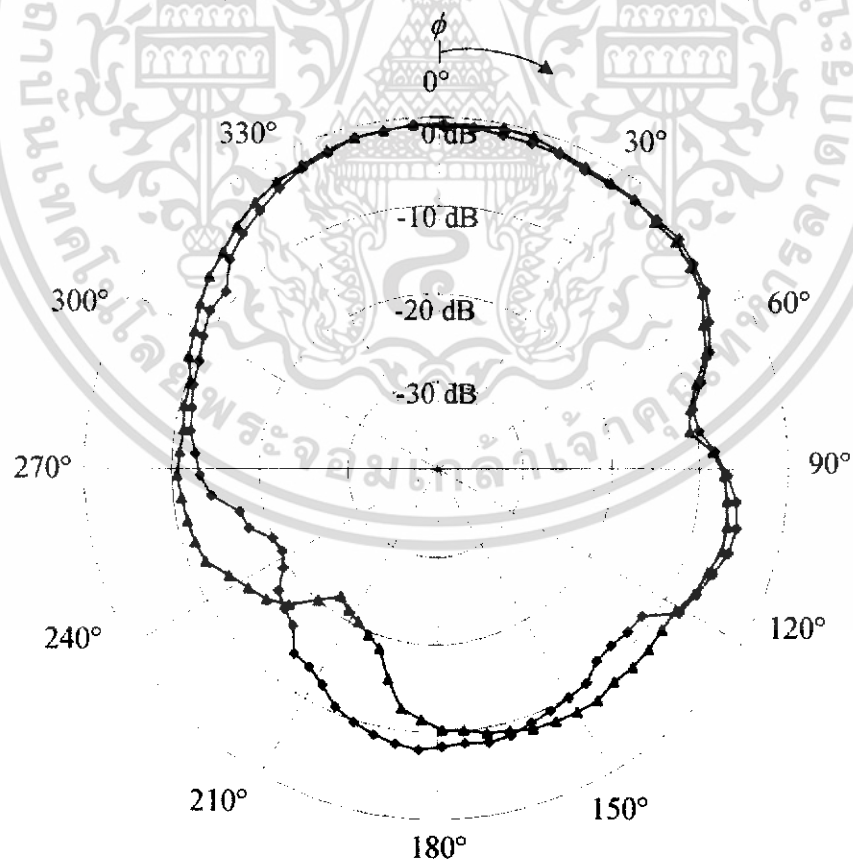


รูปที่ 4.20 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



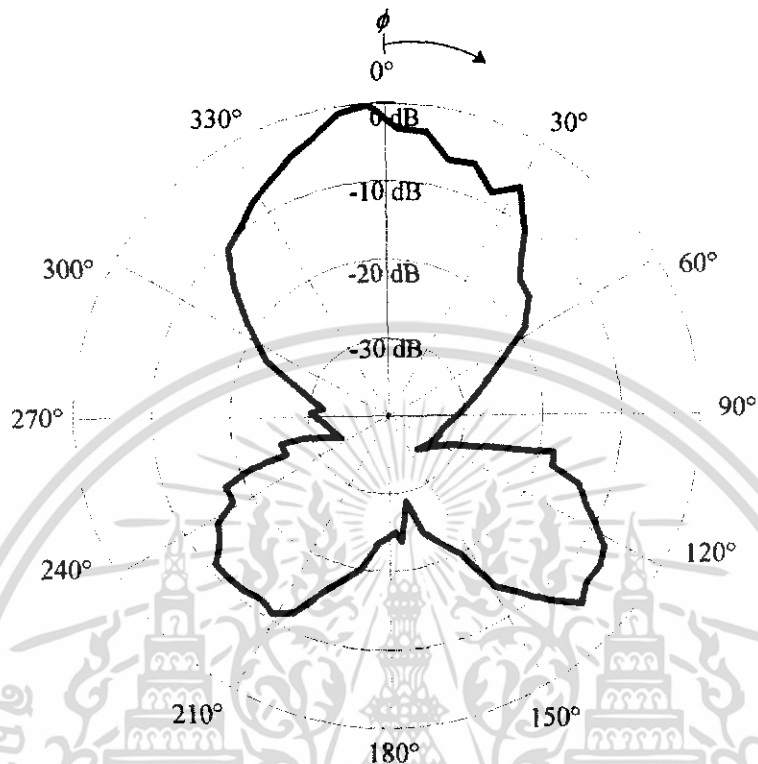
รูปที่ 4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก



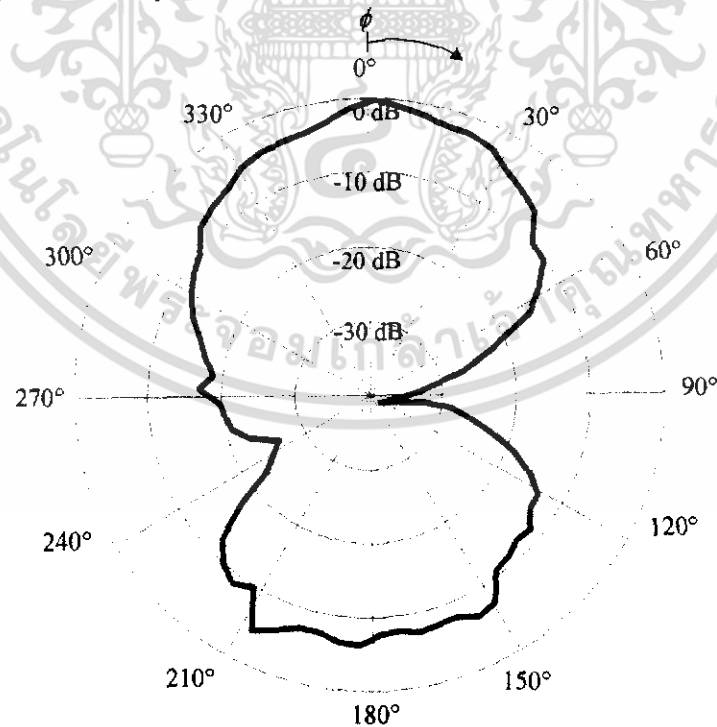
รูปที่ 4.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยกและมุมกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ เส้นกราฟสีแดงจะแสดงรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก  
 เส้นกราฟสีน้ำเงินจะแสดงรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด  
 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.13 GHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24



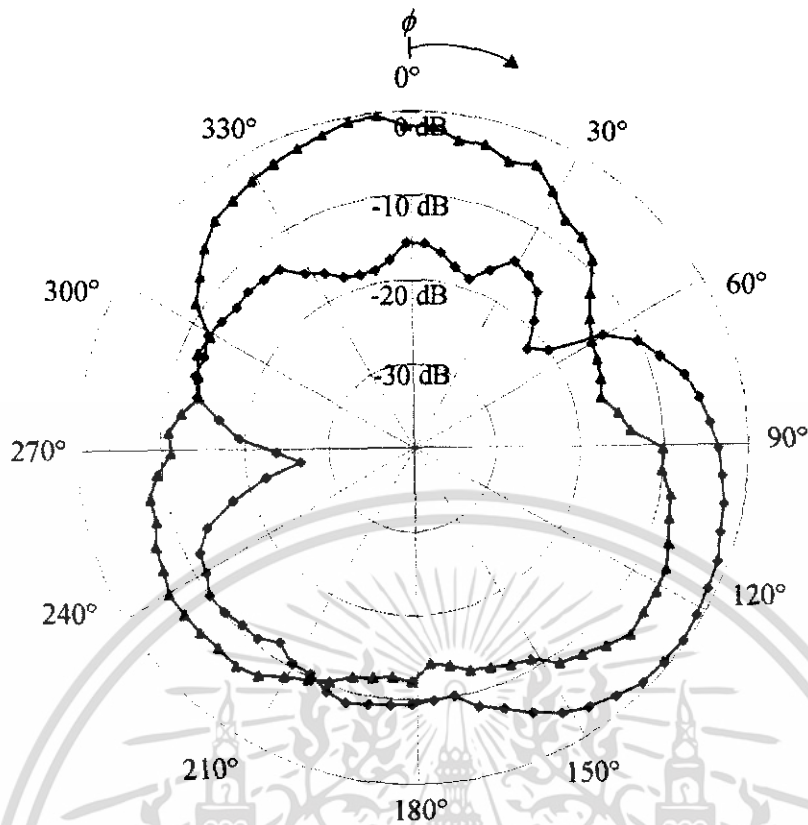
รูปที่ 4.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุม



ยก

รูปที่ 4.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยกและมุมกวาด โดยที่  
 เส้นกราฟสีแดงจะแสดงรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก  
 เส้นกราฟสีน้ำเงินจะแสดงรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด

#### 4.9 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศใช้อุปกรณ์ในการทดสอบดังนี้

##### 1) Spectrum Analyzer

การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศทำได้โดยใช้เครื่อง Spectrum Analyzer วัดค่ากำลังงานที่รับได้ของสายอากาศด้านรับ โดยสายอากาศที่นำมาทดสอบค่าอัตราขยายอ้างอิงนั้นในโครงการนี้จะใช้สายอากาศวงกั้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีความเหมือนกันทุกประการมาทำการวัดค่ากำลังงานส่งออกไปและกำลังงานที่รับได้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าอัตราขยายของสายอากาศโดยใช้สมการที่ 4.3 ดังนี้

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (4.3)$$

จากสมการที่ 4.3 จะได้เป็นสมการที่ 4.4

$$G_{t(db)} + G_{r(db)} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 G_{t,(dB)} &= \text{อัตราขยายของสายอากาศด้านส่ง (dB)} \\
 G_{r,(dB)} &= \text{อัตราขยายของสายอากาศด้านรับ (dB)} \\
 P_r &= \text{กำลังงานที่รับได้ (W)} \\
 P_t &= \text{กำลังงานที่ส่งออกทางด้านส่ง (W)} \\
 R &= \text{ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและรับ (m)} \\
 \lambda &= \text{ความยาวคลื่นที่ความถี่ใช้งาน (m)}
 \end{aligned}$$

เมื่ออัตราขยายของสายอากาศด้านส่งมีค่าเท่ากับอัตราขยายของสายอากาศด้านรับ เพราะเป็นสายอากาศชนิดเดียวกันดังนั้นจากสมการ 4.5

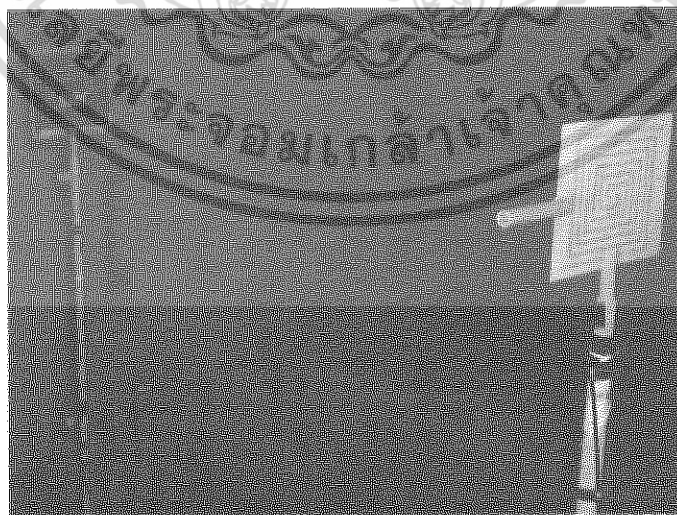
$$2G = L_s + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \quad (4.5)$$

โดยที่ค่า  $L_s$  มีค่าดังสมการที่

$$L_s = 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (4.6)$$

#### 4.9.1 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

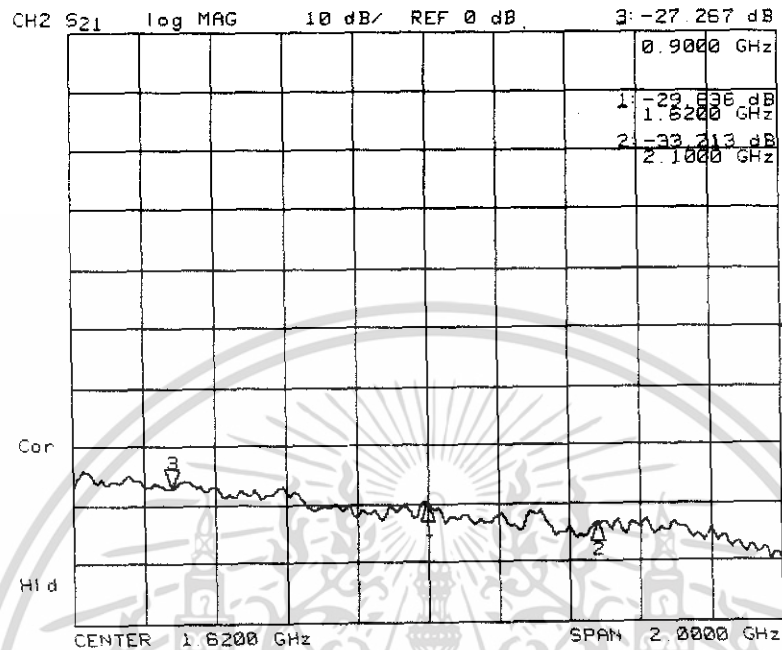
การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ อาจจะใช้วิธีการทดสอบแตกต่างไปจากการทดสอบสายอากาศในช่วงความถี่อยู่ข้างเนื่องจากขนาดของสายอากาศเอื้ออำนวยให้การทดสอบสายอากาศนั้นทำได้ง่ายยิ่งขึ้นลดความยุ่งยากลงไป โดยอุปกรณ์ในการทดสอบสายอากาศใช้เพียงแค่เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเท่านั้นการทดสอบจะใช้วิธีการสร้างสายอากาศแบบวงก้นหอยสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เหมือนกันทุกประการสองตัวมาทำการทดสอบหาอัตราขยายโดยอาศัยสมการที่ 4.3 4.4 และ 4.5 จากนั้นจึงสามารถทราบอัตราขยายของสายอากาศที่นำไปใช้เพียงตัวเดียวได้ ส่วนการจัดวางสายอากาศในการทดสอบเพื่อหาอัตราขยายนั้นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 การจัดเรียงสายอากาศในช่วงความถี่เพื่อทดสอบอัตราขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตรายายของสายอากาศในช่วงความถี่นี้จะได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตรายายของสายอากาศตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งานเพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าสายอากาศนั้นมีอัตรายายที่จะสามารถนำไปใช้กับระบบอากาศยานได้อย่างมีประสิทธิภาพแสดงไว้ในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 อัตรายายของสายอากาศ

อัตรายายของสายอากาศในช่วงความถี่ จะแสดงไว้ทั้งสามความถี่ที่ใช้งานดังนี้

900 MHz	2.13 dBi
1.62 GHz	3.49 dBi
2.13 GHz	2.88 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทวิจารณ์และสรุป

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์สายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งเป็นสายอากาศที่สามารถที่จะนำไปใช้ในช่วงความถี่แถบกว้างได้ดี ลักษณะการนำไปใช้สามารถประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ ได้กว้างมาก เช่น ใช้เป็นสายอากาศในหอควบคุมการบิน หรือเป็นสายอากาศตรวจตราการใช้ความถี่เป็นต้น และเมื่อนำสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก ไปประยุกต์ใช้กับระบบอากาศยานไร้คนขับจึงได้พิจารณาถึงคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศวงก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก เช่น คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต้องมีค่าที่ยอมรับได้คือไม่ควรเกิน 2 : 1 ในช่วงกว้างแถบความถี่นำไปใช้งาน คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นต้องออกเป็นแบบอกรอบตัว โครงสร้างโดยรวมของสายอากาศต้องมีขนาดเหมาะสมที่จะนำไปติดตั้งบริเวณลำตัวด้านล่างของอากาศยานไร้คนขับได้ ในการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศได้ใช้แท่งโลหะแทนกรวยทึบของสายอากาศทำให้น้ำหนักโดยรวมของสายอากาศน้อยลง ในการออกแบบได้ใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า IE3D วิเคราะห์หาโครงสร้างที่ทำให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศดังกล่าว

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจะพบว่าสายอากาศแบบวงก้นหอยสี่เหลี่ยมมุมฉากทั้งช่วงความถี่มีคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศสอดคล้องกันดังที่จะได้สรุปไว้ดังนี้

1) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศเป็นค่าที่ยอมรับได้คือ SWR 2 : 1 สายอากาศในช่วงความถี่นั้นอยู่ในช่วงกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ 520 MHz – 2.61 GHz ดังนั้นจะพบว่าสายอากาศในช่วงความถี่นั้นครอบคลุมช่วงกว้างแถบความถี่ที่ระบบอากาศยานไร้คนขับต้องการ

2) สายอากาศแบบวงก้นหอยสี่เหลี่ยมมุมฉากในช่วงความถี่นั้นมีอัตราการใช้สูญเสียย้อนกลับมากหรือมีสัญญาณย้อนกลับต่ำในช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งาน

3) มีอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในช่วงกว้างแถบความถี่ที่ใช้งานมีค่าดังนี้

สายอากาศในช่วงความถี่  
ที่ความถี่

800 MHz	$62.043 \Omega + j14.758 \Omega$
1.09 GHz	$488.949 \Omega + j0.617 \Omega$
2.62 GHz	$63.098 \Omega + j33.996 \Omega$

4) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งสองช่วงความถี่เป็นแบบอกรอบตัว มีลักษณะเหมือนกันตลอดช่วงกว้างแถบความถี่ที่ระบบอากาศยานไร้คนขับต้องการ

5) อัตราขยายของสายอากาศที่ทำการทดสอบมีค่าดังนี้

สายอากาศในช่วงความถี่

900 MHz	2.13 <i>dBi</i>
1.62 GHz	3.49 <i>dBi</i>
2.13 GHz	2.88 <i>dBi</i>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

-ปัญหาที่เกิดจากการที่ใช้วัสดุที่มีค่าเพอร์มิทิวตี้ที่น้อย ( $\epsilon_r = 4.4$ ) ในการมาทำบอลลูน จึงทำให้บอลลูนนั้นต้องออกแบบและสร้างให้มีขนาดใหญ่ยิ่งขึ้น เพราะฉะนั้นจึงทำให้การครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศนั้นมีย่านที่จำกัด

-ปัญหาค่าที่ได้จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการผิดพลาด ซึ่งมีค่าที่แตกต่างจากผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า IE3D เนื่องจากเกิดความผิดพลาดจากขนาดที่เป็นขนาดจริงในขั้นตอนการทำสายอากาศ และวัสดุที่นำมาใช้นั้นเป็นแผ่นปริน FR4 ที่มีค่าเพอร์มิทิวตี้ของตัวกลางที่ใช้ทำสายอากาศมีค่าสูงทำให้เกิดการลดทอนต่างๆในตัวสายอากาศ

-แนวทางการแก้ไขควรเลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพที่ดีและมีค่าเพอร์มิทิวตี้ที่มากมาทำการสร้าง บอลลูน จะทำให้สามารถลดขนาดของตัวบอลลูนและยังทำให้การครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานนั้นกว้างขึ้นอีกด้วย

-ควรเลือกใช้วัสดุที่ไม่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นนำมาครอบสายอากาศเพื่อลดการลดทอนและค่าการสูญเสียต่างๆในตัวสายอากาศจึงจะทำให้การปฏิบัติงานของระบบอากาศยานไร้คนขับนั้นจะดีขึ้น

## หนังสืออ้างอิง

- [ 1 ] C.A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design," John Wiley & Sons., 1988.
- [ 2 ] Koji Nagasawa, Isamu Matsuzuka, "Radiation Field Consideration of Biconical Horn Antenna With Different Flare Angles," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol .36., No.9, September 1988
- [ 3 ] บัณฑิต รัตนอารยานนท์ : "วิศวกรรมสายอากาศ ", สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- [ 4 ] J. Thaysen, et al, "A Wideband Balun --- How Does it work?" Applied Microwave and Wireless, Vol. 12, No. 10, October 2000: 40-50
- [ 5 ] J. Thaysen, K. B. Jakobsen, and J. Appel-Hansen, "A logarithmic spiral antenna for 0.4 to 3.8 GHz". Applied Microwave & Wireless, pp. 32-45, Feb. 2001.
- [ 6 ] J. Ely. C. Chiristodoulou, D. Shively, "Square Spiral Microstrip Antennas: Analysis For Different Sizes and Substrate Parameters Using a Personal Computer", Southcon Technical Session 17, Paper #1, Ft. Lauderdale, FL, 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้