



สายอากาศสำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับ

Antenna for Unmanned Aerial Vehicles

ได้ผ่านพิธีมอบแล้ว
0 ตทท.



โดย
นายจิรศักดิ์ ศรีบุญเรือง
นายรัตนะ มั่งมุด

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 61945
วัน,เดือน,ปี..... 25 ก.พ. 2549

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา
วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b.....
i.....

สายอากาศสำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับ

Antenna for Unmanned Aerial Vehicles



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศสำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับ

Antenna for Unmanned Aerial Vehicles

ผู้จัดทำ

1. นายจิรศักดิ์ ศรีบุญเรือง 45015047
2. นายรัตนะ มั่งมุด 45015068

๑ ว่าง

(ผศ.ดร.ทองทอด วานิชศรี)

(ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศสำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับ
Antenna for Unmanned Aerial Vehicles

โดย นายจิรศักดิ์ ศรีบุญเรือง 45015047

นายรัตนะ มั่งมุล 45015068

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ทองทศ วานิชศรี

ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการวิเคราะห์สายอากาศสำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับ โดยได้เน้นการวิเคราะห์สายอากาศบนตัวอากาศยาน ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอเป็นสายอากาศที่สามารถให้ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่ชี้ลงมายังสถานีภาคพื้นดินได้ โดยมีค่าสภาพเงาเชิงทิศทางที่สูงพอที่จะทำให้การสื่อสารประสบความสำเร็จ สำหรับการวิเคราะห์สายอากาศได้ทำการคำนวณหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น ค่าสภาพเงาเชิงทิศทาง การโพลาไรซ์และอัตราส่วนคลื่นนิ่ง จากนั้นทำการสร้างสายอากาศเพื่อทดสอบคุณลักษณะ สำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงในระบบอากาศยาน

ABSTRACT

This project investigates the antenna for Unmanned Aerial Vehicles (UAV). The analysis will be focused on the antenna on the aircraft. The proposed antenna will be directed the beam radiation to the ground station. The directivity of the antenna is high enough to achieve the communication system. For the antenna analysis, we find the radiation pattern, beamwidth, directivity, polarization and standing wave ratio. Moreover, we fabricate the antenna prototype to test. The measured results will be used to verify the calculated results. It is expected that the antenna can be used to install on the aircraft of the UAV system.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์	1
1.2 เนื้อหาของปริญญาโท	2
บทที่ 2 ทฤษฎีหรือหลักการ	3
2.1 ลักษณะการปฏิบัติงานของระบบอากาศยานไร้คนขับ	3
2.2 โครงสร้างของระบบอากาศยานไร้คนขับ	4
2.3 คุณลักษณะพื้นฐานที่สำคัญของสายอากาศ	5
2.3.1 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)	5
2.3.2 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น	5
2.3.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)	5
2.3.4 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio)	5
2.3.5 อัตราขยาย (Gain)	6
2.3.6 ค่าความกว้างลำคลื่นจุดศูนย์คู่แรก (First Null Beam width)	6
2.3.7 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half - power beam width)	6
2.3.8 โพลาริเซชัน (Polarization)	7
2.4 สายอากาศแบบกรวยคู่	7
2.4.1 ชนิดของสายอากาศแบบกรวยคู่	12
2.4.2 สนามหลักของสายอากาศแบบกรวยคู่ไม่สมมาตรที่มีความยาวอนันต์	12
2.4.3 สนามของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีขนาดจำกัด	14
2.5 สายอากาศแบบดิสโคน (discone antenna)	15
2.5.1 สนามการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบดิสโคน	16
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ คำนวณ และการออกแบบ	18
3.1 โครงสร้างที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า	18
3.1.1 โครงสร้างที่นำไปวิเคราะห์ของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	18
3.1.2 โครงสร้างที่นำไปวิเคราะห์ของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	19
3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่	19
3.1.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF เมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่	20
3.2.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่	24
3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบน	28
3.3.1 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF เมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบน	29
3.3.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบน	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่าง	37
3.4.1 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF เมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่าง	37
3.4.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่าง	41
3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะ	45
3.5.1 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF เมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะ	46
3.5.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะ	50
3.6 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผล	54
3.6.1 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF เมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผล	54
3.6.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผล	58
3.7 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะ	62
3.7.1 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะ	62
3.7.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะ	66
3.8 คุณลักษณะของสายอากาศจากโครงสร้างขั้นสุดท้ายที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ	70
3.8.1 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	71
3.8.2 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	74
3.9 สรุปผลการวิเคราะห์	77
บทที่ 4 การสร้างและผลการทดสอบ	78
4.1 การสร้างสายอากาศแบบดิสโคน	78
4.1.1 การสร้างสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	78
4.1.2 การสร้างสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	80
4.2 การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR)	81
4.2.1 การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	82
4.2.2 การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	83
4.3 การทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	84
4.3.1 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ใช้ประโยชน์ด้านการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.3.2 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	85
4.4 การทดสอบอัตราสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss Ratio)	86
4.4.1 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	86
4.4.2 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	87
4.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	88
4.5.1 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	89
4.5.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	92
4.6 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครั้งหนึ่งด้วยโปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดสอบ	95
4.6.1 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครั้งหนึ่งด้วยโปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดสอบในช่วงความถี่ UHF	95
4.6.2 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครั้งหนึ่งด้วยโปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดสอบในช่วงความถี่ C-BAND	98
4.7 การทดสอบอัตรายายของสายอากาศ	101
4.7.1 การทดสอบอัตรายายของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	101
4.7.2 การทดสอบอัตรายายของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	105
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	108
5.1 สรุปผลการทดลอง	108
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	109
ภาคผนวก	110
กิตติกรรมประกาศ	118
หนังสืออ้างอิง	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 การสื่อสารของระบบอากาศยานไร้คนขับ	1
2.1 ระเบียบปฏิบัติงานของระบบอากาศยานไร้คนขับ	3
2.2 โครงสร้างของระบบอากาศยานไร้คนขับ	4
2.3 สายอากาศแบบกรวยคู่	7
2.4 ความต้านทานคุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่และกรวยเดี่ยวเหนือระนาบสร้างเงา	12
2.5 สายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีมุมของกรวยไม่เท่ากัน	13
2.6 (ก) สายอากาศแบบดิสโคน	15
2.6 (ข) Wire-simulation	15
2.7 โครงสร้างสายอากาศแบบดิสโคนในการวิเคราะห์	16
3.1 สายอากาศที่นำไปวิเคราะห์หามีโครงสร้างเป็นสายอากาศแบบกรวยคู่	18
3.1 (ก) ขนาดของสายอากาศ	19
3.1 (ข) Wire-simulation	19
3.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ UHF	20
3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ที่ความถี่ 400 MHz	21
3.3 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz	21
3.3 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz	21
3.3 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 400 MHz	21
3.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ที่ความถี่ 400 MHz	22
3.4 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz	22
3.4 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz	22
3.4 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 460 MHz	22
3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ที่ความถี่ 520 MHz	23
3.5 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz	23
3.5 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz	23
3.5 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 520 MHz	23
3.6 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ C-BAND	24
3.7 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ที่ความถี่ 3.7 GHz	25
3.7 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	25
3.7 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	25
3.7 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ที่ความถี่ 4.75 GHz	26
3.8 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	26
3.8 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	26
3.8 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz	26
3.9 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ที่ความถี่ 5.8 GHz	27
3.9 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	27
3.9 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	27
3.9 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz	27
3.10 (ก) สายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีมุมของกรวยไม่เท่ากัน	28
3.10 (ข) Wire-simulation	28
3.11 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบน UHF	29
3.12 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยบนที่ความถี่ 400 MHz	30
3.12 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz	30
3.12 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz	30
3.12 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 400 MHz	30
3.13 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยบนที่ความถี่ 460 MHz	31
3.13 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz	31
3.13 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz	31
3.13 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 460 MHz	31
3.14 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยบนที่ความถี่ 520 MHz	32
3.14 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz	32
3.14 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz	32
3.14 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 520 MHz	32
3.15 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบน C-BAND	33
3.16 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยบนที่ความถี่ 3.7 GHz	34
3.16 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	34
3.16 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	34
3.16 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz	34
3.17 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยบนที่ความถี่ 4.75 GHz	35
3.17 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	35
3.17 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz	35
3.18 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยบนที่ความถี่ 5.8 GHz	36
3.18 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	36
3.18 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	36
3.18 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz	36
3.19 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่าง UHF	37
3.20 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 400 MHz	38
3.20 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz	38
3.20 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz	38
3.20 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 400 MHz	38
3.21 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 460 MHz	39
3.21 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz	39
3.21 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz	39
3.21 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 460 MHz	39
3.22 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 520 MHz	40
3.22 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz	40
3.22 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz	40
3.22 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 520 MHz	40
3.23 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่าง C-BAND	41
3.24 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 3.7 GHz	42
3.24 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	42
3.24 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	42
3.24 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz	42
3.25 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 4.75 GHz	43
3.25 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	43
3.25 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	43
3.25 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz	43
3.26 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 5.8 GHz	44
3.26 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.26 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	44
3.26 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz	44
3.27 Wire-simulation ของสายอากาศที่ตัดขอยกรวยออก	45
3.28 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะด้านบน UHF	46
3.29 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะด้านบนที่ความถี่ 400 MHz	47
3.29 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz	47
3.29 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz	47
3.29 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 400 MHz	47
3.30 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะด้านบนที่ความถี่ 460 MHz	48
3.30 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz	48
3.30 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz	48
3.30 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 460 MHz	48
3.31 แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะด้านบนที่ความถี่ 520 MHz	49
3.31 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz	49
3.31 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz	49
3.31 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 520 MHz	49
3.32 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะ C-BAND	50
3.33 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะที่ความถี่ 3.7 GHz	51
3.33 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	51
3.33 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	51
3.33 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz	51
3.34 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะที่ความถี่ 4.75 GHz	52
3.34 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	52
3.34 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	52
3.34 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz	52
3.35 แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะที่ความถี่ 5.8 GHz	53
3.35 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	53
3.35 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	53
3.35 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.36 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผล UHF	54
3.37 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 400 MHz	55
3.37 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz	55
3.37 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz	55
3.37 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 400 MHz	55
3.38 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 460 MHz	56
3.38 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz	56
3.38 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz	56
3.38 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 460 MHz	56
3.39 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 400 MHz	57
3.39 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz	57
3.39 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz	57
3.39 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 520 MHz	57
3.40 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผล	58
3.41 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 3.7 GHz	59
3.41 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	59
3.41 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	59
3.41 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz	59
3.42 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 4.75 GHz	60
3.42 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	60
3.42 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	60
3.42 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz	60
3.43 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 5.8 GHz	61
3.43 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	61
3.43 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	61
3.43 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz	61
3.44 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจาน โลหะ UHF	62
3.45 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจาน โลหะที่ความถี่ 400 MHz	63
3.45 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz	63
3.45 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz	63
3.45 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 400 MHz	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.46 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 460 MHz	64
3.46 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz	64
3.46 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz	64
3.46 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 460 MHz	64
3.47 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 520 MHz	65
3.47 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz	65
3.47 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz	65
3.47 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 520 MHz	65
3.48 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะ C-BAND	66
3.49 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 3.7 GHz	67
3.49 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	67
3.49 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7GHz	67
3.49 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7GHz	67
3.50 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 4.75 GHz	68
3.50 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	68
3.50 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	68
3.50 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz	68
3.51 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 5.8 GHz	69
3.51 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	69
3.51 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	69
3.51 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz	69
3.52 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 400 MHz	71
3.52 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz	71
3.52 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz	71
3.52 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 400 MHz	71
3.53 ผลวิเคราะห์ด้วย โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 460 MHz	72
3.53 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz	72
3.53 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz	72
3.53 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 460 MHz	72
3.54 ผลวิเคราะห์ด้วย โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 520 MHz	73
3.54 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.54 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz	73
3.54 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 520 MHz	73
3.55 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 3.7 GHz	74
3.55 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	74
3.55 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7GHz	74
3.55 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz	74
3.56 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 4.75 GHz	75
3.56 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz.	75
3.56 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	75
3.56 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz	75
3.57 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 5.8 GHz	76
3.57 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	76
3.57 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	76
3.57 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz	76
4.1 เส้นผ่าศูนย์กลางกรวยของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	79
4.2 ความสูงของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	79
4.3 เส้นผ่าศูนย์กลางกรวยของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	80
4.4 ความสูงของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	81
4.5 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	82
4.6 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	83
4.7 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	84
4.8 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	85
4.9 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	86
4.10 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	87
4.11 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	88
4.12 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก	89
4.13 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด	90
4.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก	90
4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด	91
4.16 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก	92
4.17 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก	93
4.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด	94
4.20 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง	95
4.20 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz	95
4.20 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz	95
4.20 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 400 MHz	95
4.21 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง	96
4.21 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz	96
4.21 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz	96
4.21 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 460 MHz	96
4.22 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง	97
4.22 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz	97
4.22 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz	97
4.22 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 520 MHz	97
4.23 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง	98
4.23 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	98
4.23 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz	98
4.23 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz	98
4.24 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง	99
4.24 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	99
4.24 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz	99
4.24 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz	99
4.25 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง	100
4.25 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	100
4.25 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz	100
4.25 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz	100
4.26 กำลังงานที่รับได้ในการทดสอบอัตรการสูญเสียในสายนำสัญญาณยาว 10 เมตร	102
4.27 กำลังงานที่รับได้ในการทดสอบอัตรการสูญเสียในสายนำสัญญาณยาว 5 เมตร	103
4.28 กำลังงานที่วัดได้ทางด้านรับเมื่อใช้สายอากาศแบบยาก็	104
4.29 กำลังงานที่วัดได้ทางด้านรับเมื่อเปลี่ยนสายอากาศส่งเป็นแบบคิสโคน	105

4.30 การจัดเรียงสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เพื่อทดสอบอัตรการขยาย
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่

4.31 อัตรายายของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

หน้า

106



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	82
4.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	83
4.3 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ UHF	85
4.4 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ C-BAND	86
4.5 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	87
4.6 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	88
4.7 ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF	91
4.8 ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND	94



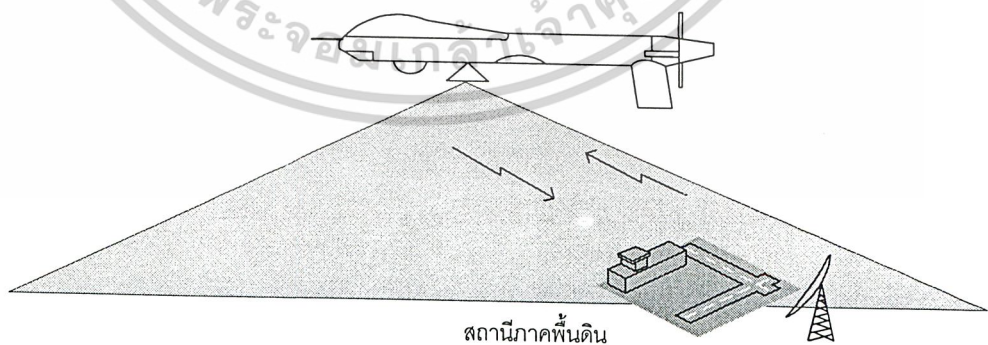
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์

ระบบอากาศยานไร้คนขับนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องใช้สายอากาศในการติดต่อสื่อสารรับหรือส่งข้อมูลกับสถานีภาคพื้นดิน ลักษณะของการทำงานของระบบอากาศยานไร้คนขับนี้จะต้องบินเพื่อเก็บข้อมูลต่างๆ ตัวอย่างเช่น รูปภาพทางอากาศแล้วส่งกลับมาทางสถานีภาคพื้นดิน โดยที่ระบบอากาศยานไร้คนขับนั้นสามารถบินระยะทางไกลที่สุด 200 กิโลเมตร และมีเพดานบิน 8 กิโลเมตร ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ถึงระยะทางและเพดานบินของระบบอากาศยานไร้คนขับแล้วจะพบว่า เมื่อระบบอากาศยานไร้คนขับบินอยู่ในระยะทางไกลๆ นั้นจะทำมุมกับสถานีภาคพื้นดินเป็นมุมน้อยมาก เป็นผลให้สายอากาศที่จะนำมาใช้กับระบบอากาศยานไร้คนขับนั้นต้องคำนึงถึงข้อมูลเบื้องต้นนี้และข้อจำกัดของ ระบบอากาศยานไร้คนขับในด้านอื่นอีกด้วย เช่นการนำสายอากาศไปติดตั้งบนระบบอากาศยานไร้คนขับจะต้องมีความแข็งแรงและทนทานต่อแรงลมในขณะที่บินได้ ขณะเดียวกัน สายอากาศนั้นต้องมีโครงสร้างที่ไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อการบิน เมื่อพิจารณาถึงการนำสายอากาศไปใช้กับระบบอากาศยานไร้คนขับ ที่ใช้ช่วงความถี่แถบกว้างในการสื่อสารข้อมูลโดยช่วงความถี่ที่ใช้งานคือ ความถี่ตั้งแต่ 400 MHz-520 MHz เป็นช่วงความถี่ UHF คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ช่วงแถบความถี่ 26.08 % และช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.7 GHz – 5.8 GHz เป็นช่วงความถี่ C-BAND คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ช่วงแถบความถี่ 44.21 % คุณลักษณะของสายอากาศที่นำไปใช้จึงต้องเป็นสายอากาศที่สามารถใช้ในช่วงความถี่แถบกว้างได้ เช่นสายอากาศแบบวงก้นหอยซึ่งมีมุมทั้งหมดเท่ากัน (Equiangular Spiral Antenna) สายอากาศแบบลูปเพอริโอดิกไดโพล (Log-periodic Dipole Antenna) สายอากาศ เอลิกซ์ (Helical Antenna) หรือสายอากาศแบบดิสโคน(Disccone) [1]



รูปที่ 1.1 การสื่อสารของระบบอากาศยานไร้คนขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศเหล่านี้มีคุณสมบัติที่ใช้งานได้ดีในช่วงแถบความถี่กว้างทั้งคลื่นสิ่งที่พิจารณาต่อไปก็คือ ลักษณะการทำงานของระบบอากาศยานนั้นต้องติดต่อกับสถานีภาคพื้นดินได้ในระยะทางไกลๆ ดังนั้นจึงต้องเลือกสายอากาศที่มีแบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นออกรอบตัว (Omnidirectional) เพื่อให้ลำคลื่นชี้มายังสถานีภาคพื้นดินเพื่อที่จะทำให้การสื่อสารประสบความสำเร็จ

โครงการนี้ จะทำการวิเคราะห์สายอากาศแบบดิสโคนซึ่งมีคุณลักษณะของสายอากาศที่สามารถใช้ได้ในช่วงความถี่และยังมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบออกรอบตัว ทั้งยังเป็นสายอากาศที่ส่งคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบตั้งฉากกับพื้นโลก โดยที่โครงสร้างของสายอากาศนั้นยังมีลักษณะไม่ดัดล้มอีกด้วยและ การนำไปติดตั้งบนตัวอากาศยานนั้นทำได้ไม่ยาก ในการวิเคราะห์ โครงสร้างของสายอากาศแบบดิสโคนนั้น จะพิจารณาถึงความสูงของสายอากาศ ระยะห่างระหว่างโลหะที่เป็นกรวยและโลหะที่เป็นจานวงกลมที่วางอยู่ด้านบนกรวย ขนาดของจานโลหะที่วางอยู่บนกรวย ตลอดจนโครงสร้างทั้งหมดของสายอากาศเพื่อที่จะทำให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุด โดยคุณลักษณะที่ได้พิจารณา คือ คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ คุณลักษณะเชิงโพลาไรเซชัน คุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จากนั้นได้สร้างสายอากาศต้นแบบ และทดสอบเพื่อเปรียบเทียบยืนยันผลที่ได้จากการวิเคราะห์ จะพบได้ว่าเมื่อพิจารณาสายอากาศแบบดิสโคนจากคุณสมบัติข้างต้นนี้แล้ว สายอากาศแบบดิสโคนนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับระบบอากาศยานไร้คนขับนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์

บทที่ 1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีและหลักการของสายอากาศ วิธีการหาสนามของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คุณลักษณะของสายอากาศ เช่น ความกว้างของลำคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทางการโพลาไรซ์ อัตราส่วนคลื่นนิ่งและรวมถึงโครงสร้างเบื้องต้นของระบบอากาศยานไร้คนขับด้วย

บทที่ 3 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ จำนวนออกแบบสายอากาศ ซึ่งอาศัยทฤษฎีที่ได้จากบทที่ 2 และผลของการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ โดยอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า (Numerical Electromagnetic Code) และเป็นการแสดงกระบวนการที่สำคัญในการวิเคราะห์ และออกแบบสายอากาศให้ได้ตามต้องการ

บทที่ 4 เป็นขั้นตอนการสร้าง การทดสอบ แสดงผลที่ได้จากการทดสอบและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์

บทที่ 5 สรุปผลคุณลักษณะทั้งหมดของสายอากาศตลอดจนวิจารณ์และเสนอแนวทางสำหรับการพัฒนาสายอากาศต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีหรือหลักการ

2.1 ลักษณะการปฏิบัติงานของระบบอากาศยานไร้คนขับ

ลักษณะการปฏิบัติงานของระบบอากาศยานไร้คนขับนั้น ระบบอากาศยานไร้คนขับสามารถทำการบินห่างออกไปจากสถานีฐานได้ไกลสุดถึง 200 กิโลเมตร ระดับเพดานบิน 8 กิโลเมตร โดยในขณะที่ทำการบินอยู่นั้นก็จะทำการเก็บข้อมูลต่างๆ ส่งกลับมายังสถานีฐานด้วยเช่นรูปภาพทางอากาศเป็นต้น ในขณะที่เดียวกันนั้นระบบอากาศยานไร้คนขับยังต้องได้รับการควบคุมจากสถานีฐานอีกด้วยการติดต่อสื่อสารรับส่งข้อมูลกับสถานีฐานนั้นจะใช้ช่วงความถี่แถบกว้างในการสื่อสารข้อมูล ช่วงความถี่ที่ใช้นั้นแบ่งออกเป็นสองช่วงได้แก่ ช่วงความถี่แถบกว้างความถี่ตั้งแต่ 400 MHz – 520 MHz เป็นช่วงความถี่ UHF และ ช่วงความถี่แถบกว้างความถี่ตั้งแต่ 3.7 GHz – 5.8 GHz เป็นช่วงความถี่ C-BAND จะพบว่าเมื่อระบบอากาศยานไร้คนขับบินปฏิบัติงานในระยะทางไกลๆ ระบบอากาศยานจะทำมุมกับสถานีภาคพื้นดินเป็นมุมน้อยมาก โดยที่ระบบอากาศยานไร้คนขับมีระบบการทำงานดังรูปที่ 2.1

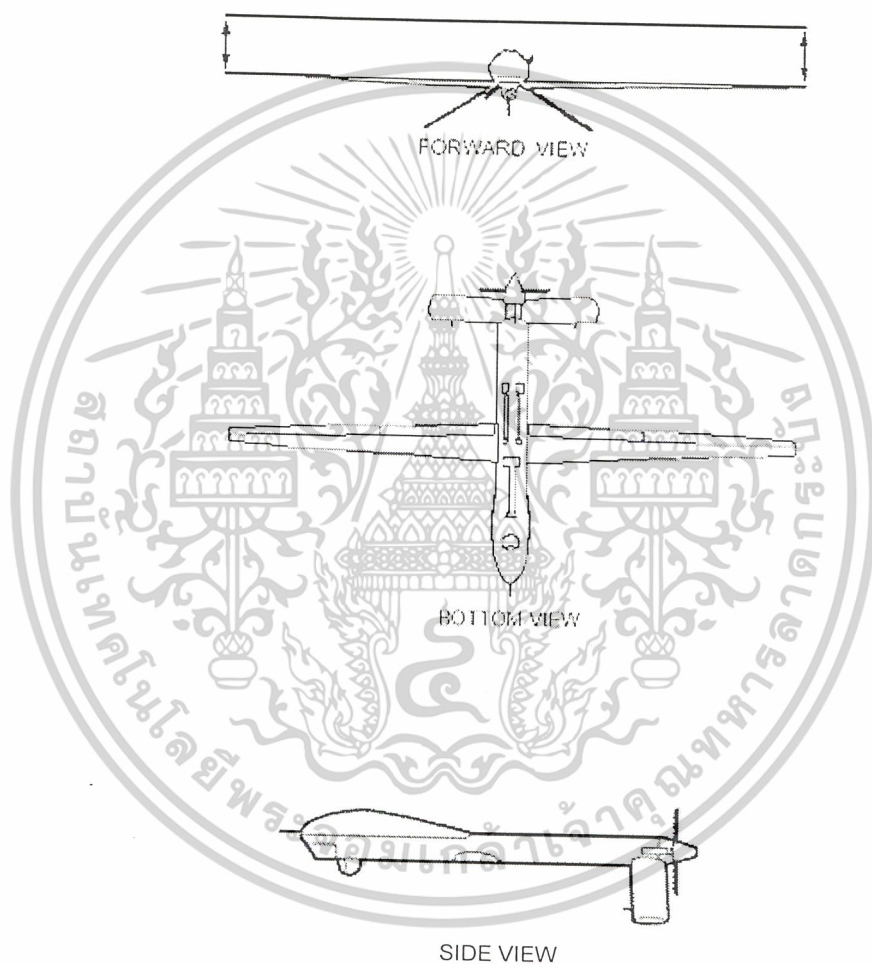


รูปที่ 2.1 ระยะปฏิบัติงานของระบบอากาศยานไร้คนขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างของระบบอากาศยานไร้คนขับ

เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของระบบอากาศยานไร้คนขับดังรูปที่ 2.2 จะพบว่าบริเวณที่จะนำสายอากาศไปติดตั้งบนตัวอากาศยานนั้น จะอยู่บริเวณด้านล่างของลำตัวอากาศยาน โดยจะต้องเป็นจุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการบินของระบบอากาศยาน และเนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ทำลำตัวของระบบอากาศยานไร้คนขับเป็นไฟเบอร์ (Fiber) จึงไม่มีผลกระทบกับการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ข้อมูลเบื้องต้นเหล่านี้จะนำไปสู่การวิเคราะห์สายอากาศเพื่อนำไปใช้กับระบบอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของระบบอากาศยานไร้คนขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คุณลักษณะพื้นฐานที่สำคัญของสายอากาศ

2.3.1 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อเป็นตัวบอกว่าทิศทางต่างๆ รอบตัวสายอากาศ สายอากาศมีการแผ่กระจายคลื่นเป็นอย่างไรมีอยู่ 2 รูปแบบ คือแบบพิกัดฉาก (Rectangular) กับแบบเชิงขั้ว (Polar) ซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด (Amplitude) ของสนาม (Field) หรือกำลังงาน (Power) กับทิศทาง (Direction) ของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งแสดงในรูปของมุม (Angle) ในหน่วยองศา (Degree) หรือเรเดียน (Radian)

2.3.2 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น คือ กำลังงานที่แผ่กระจายออกจากเสาอากาศต่อหน่วยมุมตัน (ตลอดพื้นผิวทรงกลม) แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นกับ สนามไฟฟ้าสายอากาศในระยะไกล สายอากาศบางชนิดเช่นสายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) สายอากาศแบบลูป (Loop Antenna) จะมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบออกรอบตัว โดยที่ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นจะเป็นดังสมการ 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

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

เมื่อ P_{rad} คือกำลังงานที่แผ่กระจายคลื่นทั้งหมด

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

2.3.4 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio)

โดยเงื่อนไขในทางอุดมคติ กำลังงานที่เกิดจากแหล่งกำเนิดควรที่จะส่งผ่านออกไปเป็นความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นทั้งหมด (Radiation Resistance : R_r) แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียของความต้านทานและฉนวนจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติของสายส่งและสายอากาศซึ่งก็เช่นเดียวกับการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนของคลื่นที่ช่วงรอยต่อระหว่าง สายส่งและสายอากาศ ซึ่งคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนจะไปแทรกสอดทำให้เกิดการเสริมและหักล้างกันของคลื่นกับคลื่นที่เดินทางจากแหล่งกำเนิดไปยังสายอากาศนั้นหมายถึงการเกิดคลื่นนิ่งโดยที่สัมประสิทธิ์การสะท้อนหาได้จากสมการที่ (2.4)

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (2.4)$$

Z_L = ความต้านทานเชิงซ้อนของสายอากาศ

Z_o = ความต้านทานเชิงซ้อนคุณลักษณะของสายส่ง

ดังนั้นอัตราส่วนคลื่นนิ่งหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.5)$$

2.3.5 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยาย คือ ความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าการชี้ทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามามีด้วย ประสิทธิภาพของสายอากาศ จะประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับประสิทธิภาพของตัวนำ และประสิทธิภาพของฉนวน

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

2.3.6 ค่าความกว้างลำคลื่นจุดศูนย์คู่แรก (First Null Beam width)

ค่าความกว้างลำคลื่นจุดศูนย์คู่แรก คือ มุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าลดลงเป็นศูนย์ โดยจะวัดในหน่วยขององศา (Degree)

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

2.3.7 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half - power beam width)

ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเป็นคุณลักษณะหนึ่งที่สำคัญของสายอากาศ ทั้งนี้เพราะค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเป็นสิ่งที่ใช้บ่งชี้ว่า คุณสมบัติของสายอากาศ โดยค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมีความต้องการให้ขนาดความกว้างน้อยๆ ทั้งนี้ เพื่อให้สายอากาศแพร่กระจายคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการมากขึ้น และมีการสูญเสียกำลังงานในส่วนที่ไม่ต้องการน้อยลง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.8 โพลาริเซชัน (Polarization)

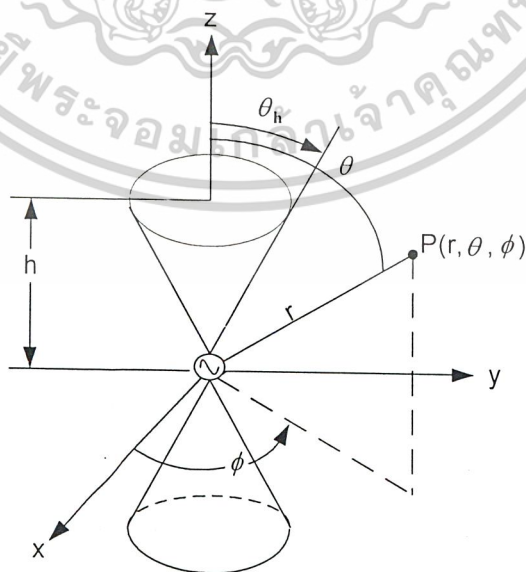
โพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายอากาศส่ง) หรือเป็นโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้น จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีอัตราการขยายมากที่สุด ดังนั้น โพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกันจะแตกต่างกัน

ตัวนำสายอากาศสามารถติดตั้งในแนวตั้งหรือในแนวนอนก็ได้ ไม่ว่าจะเป็นอย่างใด สนามไฟฟ้าก็จะมีทิศทางเดียวกับแนวการตั้งสายอากาศ ต่อมาได้มีการพัฒนาสายอากาศที่มีทั้งโพลาริเซชันในแนวตั้งและแนวนอนอยู่ในคันเดียวกัน เรียกว่าโพลาริเซชันเชิงวงกลม (Circular polarization) ข้อดีของแบบนี้คือสามารถรับสัญญาณได้ทั้งสองทิศทาง

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

2.4 สายอากาศแบบกรวยคู่

สายอากาศแบบกรวยคู่ (biconical Antenna) นั้นมีคุณสมบัติเป็นสายอากาศแบบแถบกว้างและมีโครงสร้างประกอบด้วยกรวยสองอันจัดวางในแกนสามัญ (Common Axis) โดยจุดยอดของกรวยทั้งสองจะเป็นจุดป้อนดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สายอากาศแบบกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (TEM Wave) ของสายอากาศแบบกรวยคู่ขนานคั่นที่แสดงในรูปที่ 2.3 นั้นจะเป็นคลื่นทรงกลมโดยมีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าระหว่างกรวยทั้งสองจะอยู่ในทิศทาง θ และเวกเตอร์สนามแม่เหล็กจะอยู่ในทิศทาง ϕ ดังนั้นด้วยสมการของแมกซ์เวลล์จะได้

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \begin{vmatrix} \hat{a}_r & r\hat{a}_\theta & r \sin \theta \hat{a}_\phi \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 & r \sin \theta H_\phi \end{vmatrix}$$

$$= \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{d}{d\theta} (r \sin \theta H_\phi) \hat{a}_r - \frac{1}{r \sin \theta} \frac{d}{dr} (r \sin \theta H_\phi) \hat{a}_\theta \quad (2.9)$$

และ

$$\nabla \times \bar{E} = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \begin{vmatrix} \hat{a}_r & r\hat{a}_\theta & r \sin \theta \hat{a}_\phi \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & rE_\theta & 0 \end{vmatrix} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE_\theta) \hat{a}_\phi \quad (2.10)$$

นั่นคือ

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rH_\phi) = -j\omega \epsilon E_\theta \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE_\theta) = -j\omega \mu H_\phi \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (r \sin \theta H_\phi) = 0 \quad (2.13)$$

สำหรับคำตอบของสมการ (2.13) จะเป็น

$$r \sin \theta H_\phi(r, \theta) = H_1(r) \quad (2.14)$$

เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (TEM) นั้นเป็นคลื่นทรงกลมดังนั้น

$$H_1(r) = \frac{H_0 e^{-jkr}}{r \sin \theta} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนสมการ (2.15) ใน (2.14) จะได้

$$H_\phi = \frac{H_o e^{-jkr}}{r \sin \theta} \quad (2.16)$$

เมื่อแทนสมการ (2.16) ในสมการ (2.11) จะได้

$$\frac{-jkH_o e^{jkr}}{r \sin \theta} = -j\omega \epsilon E_\theta \quad (2.17)$$

หรือ
$$E_\theta = \frac{\eta}{r \sin \theta} H_o e^{-jkr} = \eta H_\phi \quad (2.18)$$

ถ้าหับแรงดันระหว่างจุดสองจุดที่ระยะทาง r บนกรวยทั้งสองจากจุดกำเนิดจะได้เป็น

$$V_r = \int_{\theta_h}^{\pi-\theta_h} E_\theta r d\theta = \eta H_o e^{-jkr} \int_{\theta_h}^{\pi-\theta_h} \frac{d\theta}{\sin \theta} \quad (2.19)$$

และ
$$V_r = 2\eta H_o e^{-jkr} \ln \left(\cot \frac{\theta_h}{2} \right) \quad (2.20)$$

เนื่องจากกระแสบนกรวยที่ระยะทาง r จากจุดกำเนิดจะได้เป็น

$$I(r) = \int_0^{2\pi} H_\phi r \sin \theta d\theta = 2\pi r H_\phi \sin \theta \quad (2.21)$$

เมื่อแทนสมการ (2.16) ลงในสมการ (2.21)

$$I(r) = 2\pi H_o e^{-jkr} \quad (2.22)$$

เนื่องจากอิมพีแดนซ์ลักษณะ (Characteristic Impedance) ของสายอากาศแบบกรวยคู่จะเป็นอัตราส่วนของ $V(r)$ ในสมการ (2.19) และ $I(r)$ ในสมการ (2.22) นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_k = \frac{V(r)}{I(r)} = \frac{\eta}{\pi} \ln \left(\cot \frac{\theta_h}{2} \right) \quad (2.23)$$

เมื่อตัวกลางระหว่างกรวยคู่เป็นอวกาศว่าง $\eta = 120\pi \Omega$ ดังนั้นสมการ (2.23) จะได้เป็น

$$Z_k = 120 \ln \left(\cot \frac{\theta_h}{2} \right) \quad (2.24)$$

ในกรณีที่มุม θ_h นี้แคบ ($\theta_h < 20^\circ$) ค่าของ $\cot \left(\frac{\theta_h}{2} \right) \cong \frac{2}{\theta_h}$ ดังนั้นสมการ (2.24) จะกลายเป็น

$$Z_k = 120 \ln \frac{2}{\theta_h} \quad (2.25)$$

สมการ (2.24) และ (2.25) นั้นเป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่ โดยสมการเหล่านี้จะไม่ขึ้นกับระยะทาง r ดังนั้นสายอากาศแบบกรวยคู่จะมีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสม่ำเสมอ เนื่องจากความหนาแน่นกำลังคลื่นแผ่ออกของสายอากาศแบบกรวยคู่ขนาดอนันต์นั้น จะสามารถหาได้จาก

$$W_r = \frac{1}{2} |E_\theta| |H_\phi| = \frac{\eta H_o^2}{2r^2 \sin^2 \theta} \quad (2.26)$$

และกำลังคลื่นแผ่ออกทั้งหมดจะได้

$$P_t = \int W \cdot ds = \pi \eta H_o^2 \int_{\theta_h}^{\pi - \theta_h} \frac{d\theta}{\sin \theta} = 2\pi \eta H_o^2 \ln \cot \frac{\theta_h}{2} \quad (2.27)$$

ดังนั้นความต้านทานการแผ่พลังงานจะได้เป็น

$$R_r = \frac{2P_t}{I^2(0)} = \frac{\eta}{\pi} \ln \left(\cot \frac{\theta_h}{2} \right) \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสภาพจะจงทิศทางของสายอากาศแบบกรวยคู่จะได้เป็น

$$D = \frac{W_{\max}}{W_{av}} = \frac{\eta H_o^2 / 2r^2}{P_t / 4\pi} = \frac{1}{\ln\left(\cot \frac{\theta_h}{2}\right)} \quad (2.29)$$

สำหรับพื้นที่ประสิทธิภาพของสายอากาศแบบกรวยคู่ขนาดนั้นค้จะได้

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} D = \frac{\lambda^2}{4\pi \ln\left(\cot \frac{\theta_h}{2}\right)} \quad (2.30)$$

และความสูงประสิทธิภาพจะได้เป็น

$$h = \left[\frac{4R_r A_e}{\eta} \right]^{1/2} = \frac{\lambda}{\pi} \quad (2.31)$$

เนื่องจากอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบกรวยคู่เป็นอัตราส่วนของ $V(r)$ กับ $I(r)$ เมื่อ r เข้าใกล้ศูนย์ ในกรณีของสายอากาศแบบกรวยคู่นั้น อัตราส่วนนี้จะไม่ขึ้นกับระยะทาง r ดังนั้นอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบกรวยคู่นั้นค้เท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ นั่นคือ

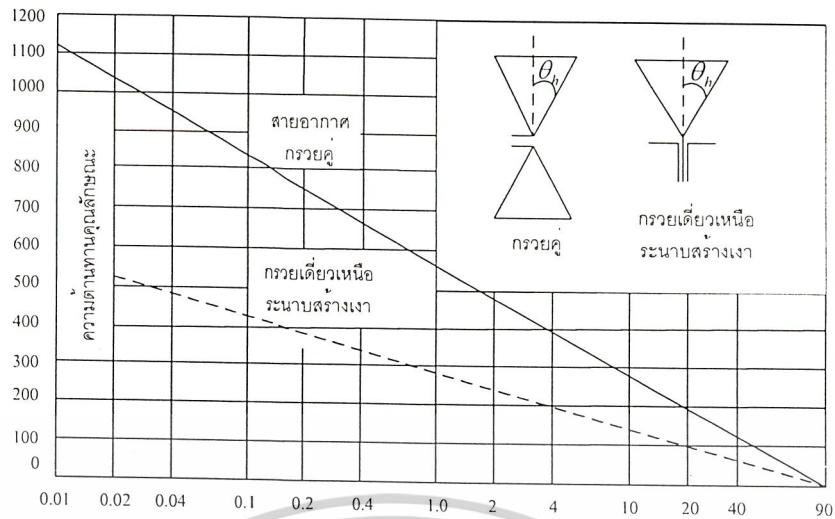
$$Z_i = Z_k \quad (2.32)$$

เมื่อ Z_i เป็นอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบกรวยคู่จากสมการและจะพบว่า อิมพีแดนซ์คุณลักษณะและอินพุตอิมพีแดนซ์นั้นจะเป็นความต้านทานอย่างเดียว (Pure Resistance) ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ความต้านทานทั้งสองมีสัญลักษณ์เป็น R_k และ R_i ตามลำดับ จากสมการ(2.24) และ (2.32)จะได้เป็น

$$R_k = R_i = 120 \ln\left(\cot \frac{\theta_h}{2}\right) \quad (2.33)$$

การเปลี่ยนแปลงความต้านทานในสมการนี้จะเป็นฟังก์ชันของมุม θ_h ซึ่งจะสามารถพล็อตได้และแสดงดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ความต้านทานคุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่ และกรวยเดี่ยวเหนือระนาบสร้างเงา

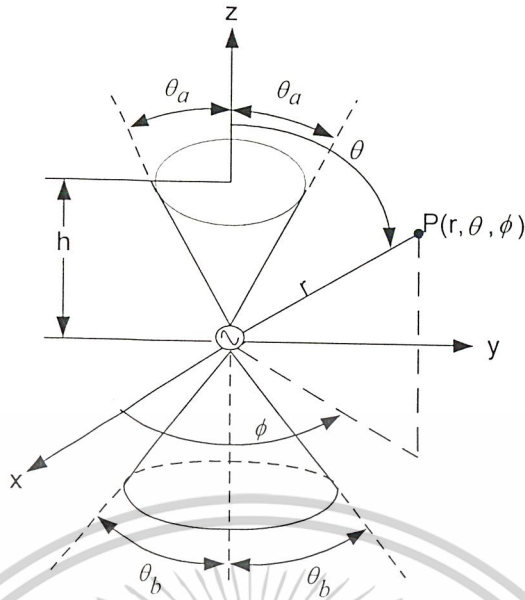
จากรูปที่ 2.4 นั้นสายอากาศแบบกรวยคู่ขนาดคอนันต์ที่มุม $\theta_h = 1^\circ$ จะมีความต้านทานประมาณ 568Ω และเมื่อมุม θ_h เปลี่ยนไป เป็นมุม $\theta_h = 50^\circ$ จะมีความต้านทานประมาณ 91Ω แต่เมื่อใช้ระนาบสร้างเงาขนาดใหญ่แทนกรวยอื่นที่อยู่ด้านล่างและความต้านทานจะเป็นครึ่งหนึ่งของค่าที่ได้จากสมการ (2.33) ซึ่งแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 2.4

2.4.1 ชนิดของสายอากาศแบบกรวยคู่

สายอากาศแบบกรวยคู่นั้นอาจจะแบ่งออกได้เป็นสองชนิด ชนิดแรกคือสายอากาศแบบไบโคนิคอลไดโพล (Biconical Dipole) ซึ่งมีมุมของกรวยเล็กมากๆ และอีกชนิดหนึ่งคือ สายอากาศแบบไบโคนิคอลฮอร์น (Biconical Horn) [2] ซึ่งมีมุมของกรวยคู่ใหญ่กว่าสายอากาศแบบไบโคนิคอลไดโพลจนพิจารณาได้ว่าเป็นกรวยคู่ สนามของการแพร่กระจายคลื่นของไบโคนิคอลไดโพลนั้นหาได้จาก กระแสที่กระจายอยู่บนพื้นผิวของสายอากาศในขณะที่สายอากาศแบบไบโคนิคอลฮอร์น นั้นโดยปกติสนามของการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะหาได้จาก สนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนปากกรวย

2.4.2 สนามหลักของสายอากาศแบบกรวยคู่ไม่สมมาตรที่มีความยาวอนันต์

สายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีความยาวไม่จำกัดและมีมุมของกรวยทั้งสองเป็น $2\theta_a$ และ $2\theta_b$ ตามลำดับ นั้นแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.5 สายอากาศแบบนี้ถูกนิยามไว้ในระบบพิกัดทรงกลม (r, θ, ϕ) สนามของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทาง r



รูปที่ 2.5 สายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีมุมของกรวยไม่เท่ากัน

โดยสนามไฟฟ้า E_θ และสนามแม่เหล็ก H_ϕ ของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีความยาวไม่จำกัดคือ

$$E_\theta = \frac{V_o e^{-jkr}}{r \sin \theta \cdot \ln \left\{ \cot \frac{\theta_a}{2} \left(\cot \frac{\theta_b}{2} \right) \right\}} \tag{2.34}$$

$$H_\phi = \frac{V_o e^{-jkr}}{\eta \cdot r \cdot \sin \theta \cdot \ln \left\{ \cot \frac{\theta_a}{2} \left(\cot \frac{\theta_b}{2} \right) \right\}} \tag{2.35}$$

$$H_\phi = \frac{E_\theta}{\eta} \tag{2.36}$$

เมื่อ V_o คือแรงดันที่จุดป้อนของสายอากาศ (Feed Point) จากกระแสทั้งหมดบนพื้นผิวของกรวยอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Z_o) ของสายอากาศแบบกรวยคู่ความยาวอนันต์นั้นหาได้จาก

$$Z_o = \frac{\eta}{2\pi} \ln \left\{ \cot \frac{\theta_a}{2} \left(\cot \frac{\theta_b}{2} \right) \right\} \tag{2.37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 สนามของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีขนาดจำกัด

สนามของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีขนาดจำกัดนี้หาได้จากแหล่งกำเนิดสมมูลของฮอยเกนส์ (Equivalent Huygens Source) และสนามที่หาได้จาก คลื่นทรงกลม (Spherical TEM Wave) ของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีขนาดอนันต์ สนามของการแพร่กระจายคลื่น dE_θ ของจุดเล็กๆ ที่จุด $Q(r_2, \theta_2, \phi_2)$ คือ

$$dE_\theta = \frac{-jkr_2^2 e^{-jkr}}{4\pi r} \cdot \exp\{-jkr_2[\sin\theta \sin\theta_2 \cos(\phi - \phi_2) + \cos\theta \cos\theta_2]\} \\ \cdot E_\theta^a \{\sin\theta \sin^2\theta_2 + \cos\theta \cos\theta_2 \sin\theta_2 \cos(\phi - \phi_2) + \sin\theta_2 \cos(\phi - \phi_2)\} d\theta_2 d\phi_2 \quad (2.38)$$

เมื่อ E_θ^a นั้นเหมือนกับสนามของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีความยาวอนันต์และ E_θ^a ได้จาก

$$E_\theta^a = \frac{V_o e^{-jkr_2}}{r_2 \cdot \sin\theta \ln\left\{\left(\cot\frac{\theta_a}{2}\right)\left(\cot\frac{\theta_b}{2}\right)\right\}} \quad (2.39)$$

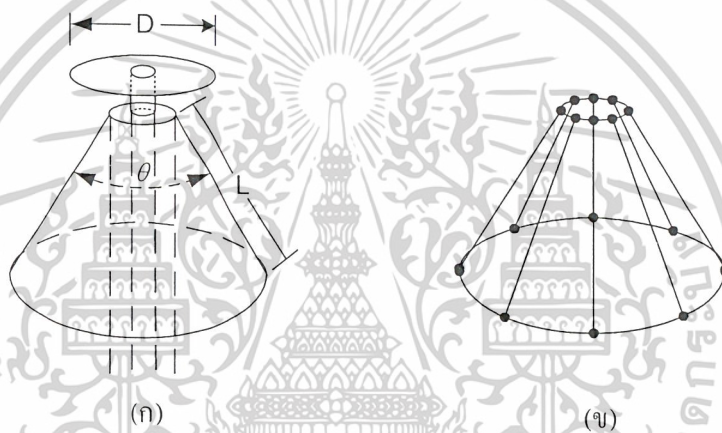
ดังนั้น สนามของการแพร่กระจายคลื่น E_θ ของสายอากาศแบบกรวยคู่ จากสมการ (2.38) และ (2.39) นั้นจะลดรูปลงเป็น

$$E_\theta = \int_0^{2\pi} d\phi_2 \int_{\theta_a}^{\pi-\theta_b} dE_\theta d\theta_2 \quad (2.40) \\ = \frac{jkr_2 V_o e^{jk(r+r_2)}}{2 \cdot r \cdot \ln\left\{\left(\cot\frac{\theta_a}{2}\right)\left(\cot\frac{\theta_b}{2}\right)\right\}} \left[\int_{\theta_a}^{\pi-\theta_b} e^{jkr_2 \cos\theta \cos\theta_2} \cdot \{\sin\theta \sin\theta_2 J_0(kr_2 \sin\theta \sin\theta_2) \right. \\ \left. + j(1 + \cos\theta \cos\theta) J_1(kr_2 \sin\theta \sin\theta_2) \} d\theta_2 \right] \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สายอากาศแบบดิสก์โคน (disccone antenna)

สายอากาศแบบนี้มีโครงสร้างดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6(ก) [3] ส่วนบนจะเป็นจานโลหะ และ ส่วนล่างจะเป็นโลหะรูปกรวยกลม การป้อนสายอากาศจะป้อนจากโคแอกเซียลทางด้านล่างของกรวยโดย โลหะนอกต่อกับรูปกรวยกลม สายอากาศแบบนี้จะให้คลื่นที่มีการโพลาไรเซชันแบบตั้งฉากกับพื้นโลก โดยมีแพทเทินของการกระจายคลื่นในระนาบขนานกับพื้นโลกเป็นรูปวงกลม ส่วนแบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นในระนาบตั้งฉากกับพื้นโลกนั้นจะตั้งฉากกับพื้นโลกนั้นจะมีเมเนบีมชี้ขึ้นฟ้าเป็นมุมอยู่ในช่วง 50° ถึง 40° ขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งาน โดยที่ความถี่ต่ำจะทำให้เกิดมุมสูง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเป็นสายอากาศที่ส่งคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบตั้งฉากกับพื้นโลก ดังนั้นสนามบนพื้นโลกจึงจึงไม่เป็นศูนย์ และมีค่าสูงในระดับที่ใช้งานได้



รูปที่ 2.6 (ก) สายอากาศแบบดิสก์โคน (ข) Wire-simulation

สายอากาศแบบดิสก์โคนนี้มีลักษณะพิเศษคือ ถ้าออกแบบให้เหมาะสมแล้วจะมีอินพุตอิมพีแดนซ์ ประมาณ 50Ω และจะมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่กว้างมาก จากผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการ ทดลองพบว่าสายอากาศนี้จะมีค่าความถี่คutoff ตรง L มีค่าประมาณ $\lambda/4$ ถ้าให้ f_L เป็นความถี่ต่ำสุดที่ ต้องการใช้งานและ f_H เป็นความถี่ด้านสูงที่ต้องการ จะพบว่าถ้าออกแบบสายอากาศตามค่าในสมการ จะได้ช่วงกว้างแถบความถี่ f_H / f_L กว้างถึงประมาณ 8 เท่า โดยที่มีค่า VSWR ต่ำกว่า 2 : 1 ตลอดช่วง ความถี่ขนาดของส่วนต่าง ๆ ที่เหมาะสมเป็นดังนี้คือ

$$\theta = 60^\circ$$

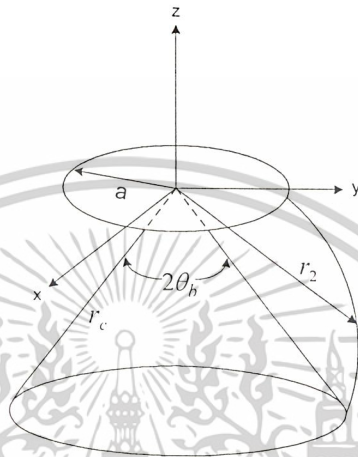
$$D = 0.14\lambda_L$$

$$L = 0.23\lambda_L$$

โดยที่ λ_L เป็นความยาวคลื่นของความถี่ f_L
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 สนามการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบดิสโคน

สนามของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบดิสโคนที่มีขนาดจำกัดดังรูปที่ 2.7 นี้หาได้จาก แหล่งกำเนิดสมมูลของฮอยเกนส์ (Equivalent Huygens Source) และสนามที่หาได้จาก คลื่นทรงกลม (Spherical TEM Wave) ของสายอากาศแบบดิสโคนที่มีขนาดอนันต์ สนามของการแพร่กระจายคลื่น dE_θ ของจุดเล็กๆ ที่จุด $Q(r_2, \theta_2, \phi_2)$ คือ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างสายอากาศแบบดิสโคนในการวิเคราะห์

$$dE_\theta = \frac{-jkr_2^2 e^{-jkr}}{4\pi r} \cdot \exp\{-jkr_2 [1 - \sin\theta \sin\theta_2 \cos(\phi - \phi_2) + \cos\theta \cos\theta_2]\} \cdot E_\theta^a \{\sin\theta \sin\theta_2 + \cos\theta \cos\theta_2 \cos(\phi - \phi_2) + \cos(\phi - \phi_2)\} d\theta_2 d\phi_2 \quad (2.42)$$

เมื่อ E_θ^a นั้นเหมือนกับสนามของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีความยาวอนันต์และ E_θ^a ได้จาก

$$E_\theta^a = \frac{V_0 e^{-jkr_2}}{r_2 \cdot \sin\theta_2 \ln\left(\cot\frac{\theta_b}{2}\right)} \quad (2.43)$$

โดยที่ r_2 เป็นระยะจากจุดกำเนิดถึงพื้นที่ผิวเปิด r_c เป็นระยะห่างจากจุดกำเนิดถึงขอบกรวยและ a เป็นรัศมีแผ่นวงกลมด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_2 = \left(\frac{a - r_c}{\frac{\pi}{2} - \theta_b} \right) \theta_2 + \left(\frac{\frac{\pi}{2} r_c - a \theta_b}{\frac{\pi}{2} - \theta_b} \right) \quad (2.44)$$

ดังนั้น สนามของการแพร่กระจายคลื่น E_θ ของสายอากาศแบบกรวยคู่ จากสมการ (2.42) และ (2.43) นั้นจะลดรูปลงเป็น

$$\begin{aligned} E_\theta &= \int_0^{2\pi} d\phi_2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi - \theta_b} dE_\theta d\theta_2 \\ &= \frac{jkV_o e^{jkr}}{4 \cdot r \cdot \ln \left(\cot \frac{\theta_b}{2} \right)} \left[\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi - \theta_b} r_2 e^{jkr_2} (\cos\theta \cos\theta_2 - 1) \cdot \{ \sin\theta \sin\theta_2 J_o(kr_2 \sin\theta \sin\theta_2) \right. \\ &\quad \left. + j(1 + \cos\theta \cos\theta) J_1(kr_2 \sin\theta \sin\theta_2) \} d\theta_2 \right] \quad (2.45) \end{aligned}$$

สายอากาศที่มีโครงสร้างเป็นก้านโลหะที่ประกอบกันขึ้นเป็นกรวยนั้นเหมาะที่จะนำไปใช้กับระบบอากาศยานไร้คนขับในช่วงความถี่ย่าน UHF เพราะเนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศในย่านความถี่นี้จะมีขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ก้านโลหะมาประกอบกันเป็นกรวยแทนการใช้กรวยตันจะทำให้ขนาดและน้ำหนักของสายอากาศลดลงอย่างมากจำนวนก้านโลหะควรจะเป็น 8 ก้าน หรือมากกว่าและก้านโลหะทางด้านจانبกับทางด้านกรวยต้องอยู่เป็นแนวเดียวกันเป็นคู่ๆ ส่วนในกรณีของย่านความถี่ C-BAND เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศในย่านความถี่นี้เล็กมากอยู่แล้ว ดังนั้นจึงสามารถใช้สายอากาศที่มีโครงสร้างเป็นแบบกรวยทึบได้โดยไม่ทำให้น้ำหนักของสายอากาศนั้นมากจนเกินไปจนทำให้ระบบอากาศยานไร้คนขับนั้นมีปัญหาในเรื่องของการรับน้ำหนักของสายอากาศ

สายอากาศแบบนี้มีคุณสมบัติที่มีช่วงกว้างแถบความถี่ ทำให้สายอากาศแบบนี้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างการใช้งานได้แก่ สายอากาศในหอดูดาววิทยุ และสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศการใช้ความถี่เป็นเส้น

บทที่ 3

ผลการวิเคราะห์ คำนวณ และการออกแบบ

3.1 โครงสร้างที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศแบบดิสโคนจะอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code) หรือ NEC2 ช่วยในการวิเคราะห์ หาโครงสร้างของสายอากาศที่ทำให้คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่ดีที่สุด เช่น คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง โดยใช้วิธีวิเคราะห์หาโครงสร้างที่ดีที่สุด ของสายอากาศที่ได้ทำการเปลี่ยนค่าไป เช่น ความสูงประสิทธิผล มุมของกรวย ขนาดของจานโลหะที่วางอยู่บนกรวย และช่องว่างระหว่างกรวยกับจานโลหะที่วางอยู่ด้านบน

เนื่องจากระบบอากาศยานไร้คนขับใช้ช่วงความถี่ในการสื่อสารกับสถานีภาคพื้นดินแบ่งออกเป็นช่วงความถี่ UHF ความถี่ตั้งแต่ 400 MHz – 520 MHz และช่วงความถี่ C-BAND ความถี่ตั้งแต่ 3.7 GHz – 5.8 GHz ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบสายอากาศเพื่อนำมาใช้กับทั้งสองช่วงความถี่นี้ โดยในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศจะทำการวิเคราะห์เป็นลำดับขั้นตอนในแบบเดียวกันทั้งสองช่วงความถี่ โดยที่จะแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของสายอากาศที่เปลี่ยนไป เมื่อได้ทำการเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศไปตามลำดับขั้นตอนดังนี้

สร้างสายอากาศที่จะนำไปวิเคราะห์โดยใช้โครงสร้างของสายอากาศแบบกรวยคู่ซึ่งมีมุมกรวยทั้งสองเท่ากัน $\theta_a = \theta_b = \theta_o$ และจากสมการของสายอากาศแบบกรวยคู่ ความสูงประสิทธิผลจะได้เป็น

$$h = \frac{\lambda}{\pi} \quad (3.1)$$

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ เมื่อตัวกลางระหว่างกรวยคู่เป็นอากาศว่างคือ

$$Z_k = 120 \ln \left(\cot \frac{\theta_o}{2} \right) \quad (3.2)$$

3.1.1 โครงสร้างที่นำไปวิเคราะห์ของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF

เมื่อออกแบบให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศแบบกรวยคู่เป็น 50 โอห์ม โดยออกแบบที่ความถี่ 300 MHz ความยาวคลื่น $\lambda = 1$ เมตร ดังนั้น

$$h = \frac{1}{\pi} \quad \theta_o = 67^\circ$$

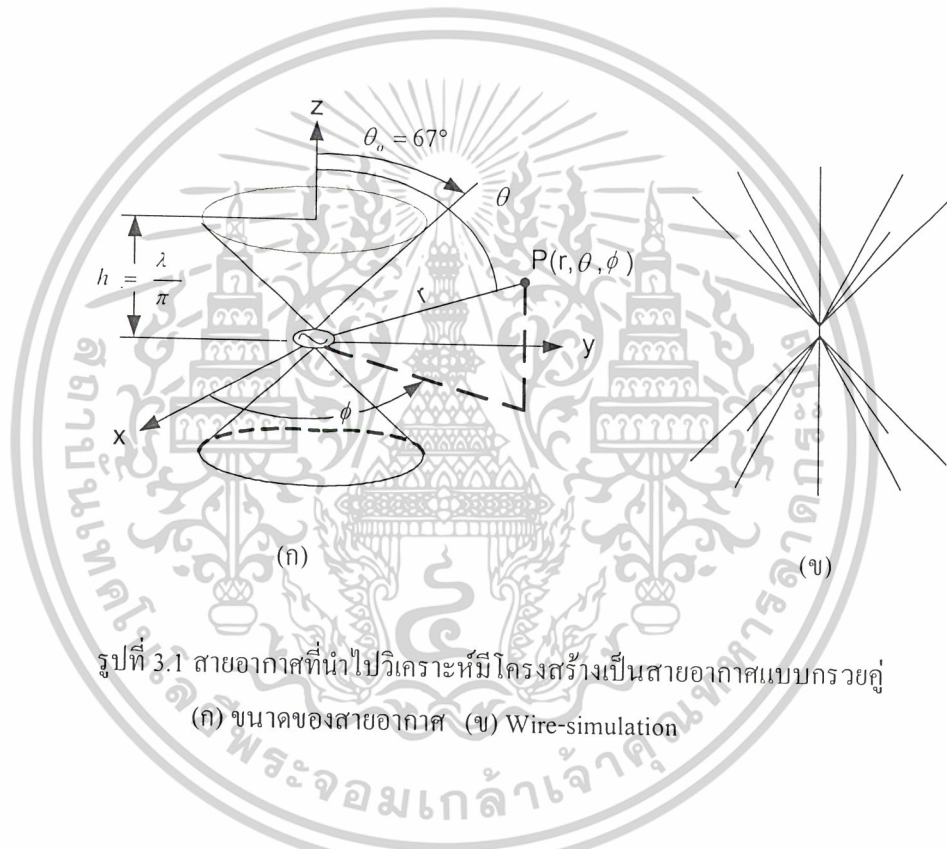
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 โครงสร้างที่นำไปวิเคราะห์ของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

ในกรณีของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND ก็เช่นกันเมื่อออกแบบให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศเป็น 50 โอห์ม โดยออกแบบที่ความถี่ 2.75 GHz ความยาวคลื่น $\lambda = 0.11$ เมตร ดังนั้น

$$h = \frac{0.11}{\pi} \quad \theta_o = 67^\circ$$

นำค่าความสูงประสิทธิภาพและมุมของกรวยที่ได้ไปสร้างสายอากาศแบบกรวยคู่ในแต่ละช่วงความถี่เพื่อทดลองเปลี่ยนโครงสร้างต่างๆในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.1 (ข)



รูปที่ 3.1 สายอากาศที่นำไปวิเคราะห์หามีโครงสร้างเป็นสายอากาศแบบกรวยคู่
(ก) ขนาดของสายอากาศ (ข) Wire-simulation

3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่

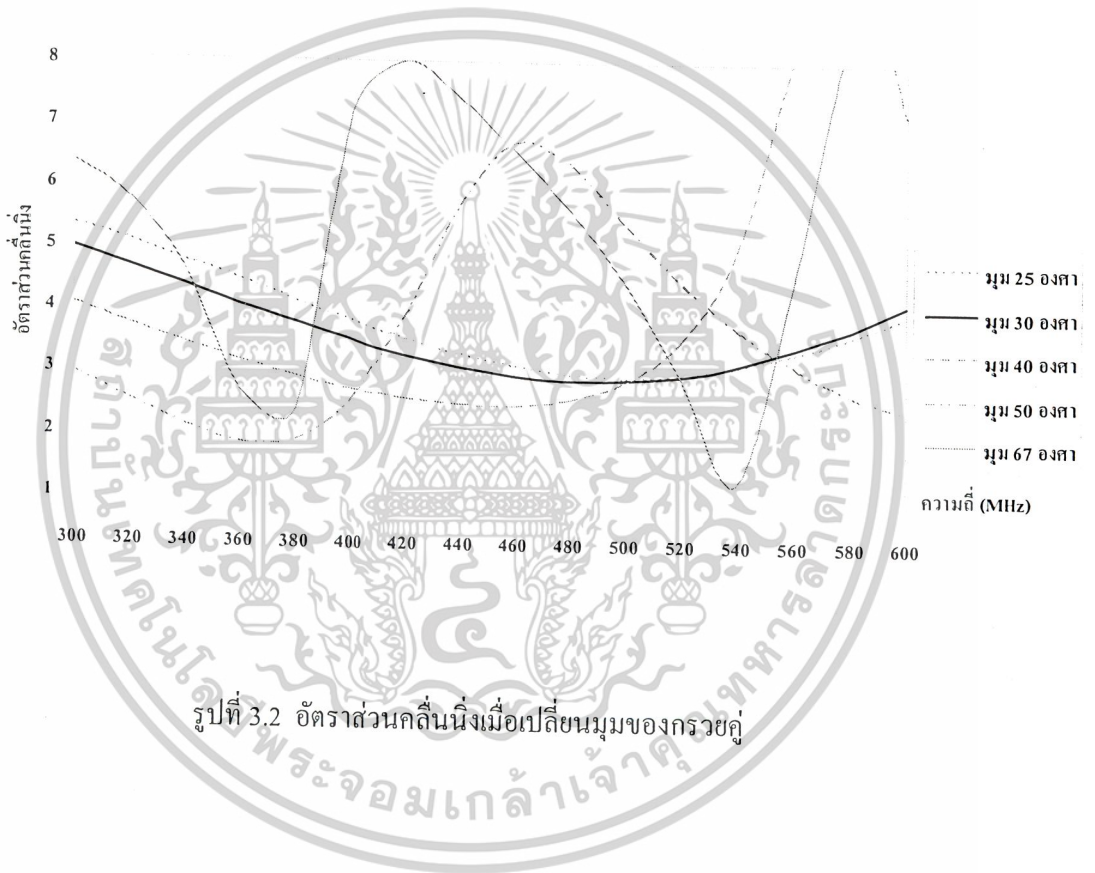
เมื่อสร้างสายอากาศที่มีโครงสร้างจากสายอากาศแบบกรวยคู่แล้ว จึงทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเป็นลำดับโดยเริ่มจาก มุมของกรวยคู่ มุมของกรวยด้านบน มุมของกรวยด้านล่าง ขนาดของงานโลหะที่วางอยู่ด้านบนความสูงของกรวยด้านล่าง และสุดท้ายเป็นระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะด้านบน

ทำการทดลองเปลี่ยนค่ามุม θ_o เพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุดโดยกำหนดให้ความสูงของกรวยคงที่

3.2.1 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF เมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศที่จะนำไปใช้ใน ช่วงความถี่แถบกว้างในช่วงความถี่ตั้งแต่ 400 MHz -520MHz จะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงที่ต้องการนำไปใช้งาน โดยจะวิเคราะห์ที่ความถี่ 400 MHz ซึ่งเป็นช่วงแถบความถี่ด้านต่ำ ที่ความถี่ 460MHz เป็นช่วงแถบความถี่กลาง และสุดท้ายจะวิเคราะห์ที่ช่วงแถบความถี่ 520 MHz ซึ่งเป็นช่วงแถบความถี่ด้านสูงในการใช้งานของสายอากาศ

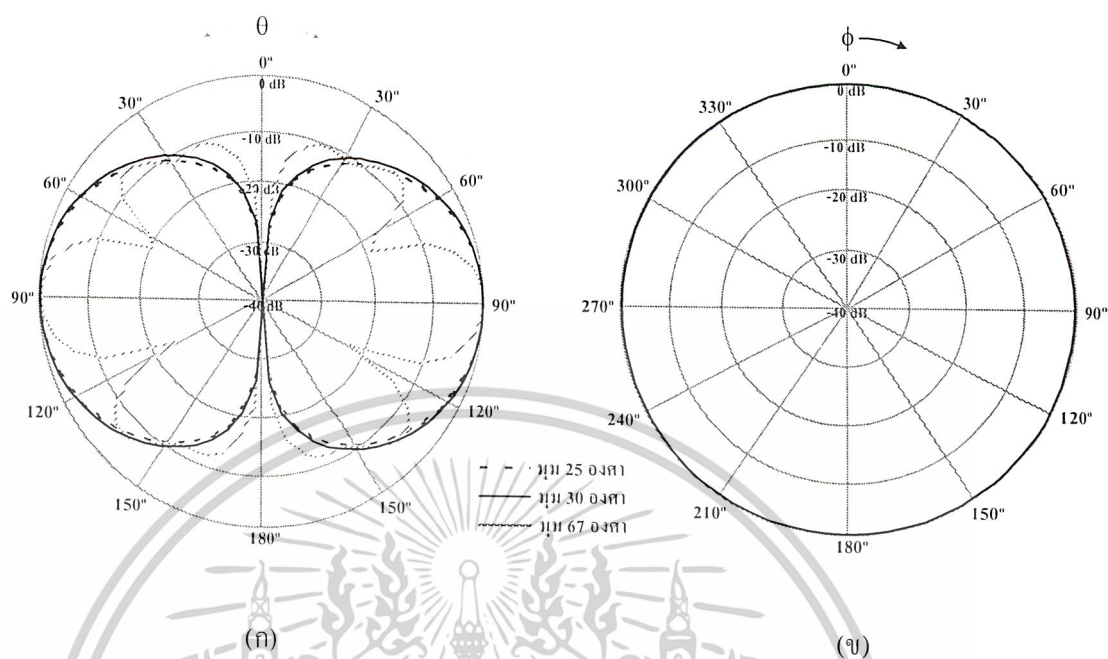
แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยคู่ของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF



รูปที่ 3.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ที่ความถี่ 400 MHz



มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
25°	90°	59.57°	120.38°	60.81°
30°	90°	56.92°	123.07°	66.15°
67°	90°	76.60°	102.24°	25.64°

(ก)

รูปที่ 3.3 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ที่ความถี่ 400 MHz

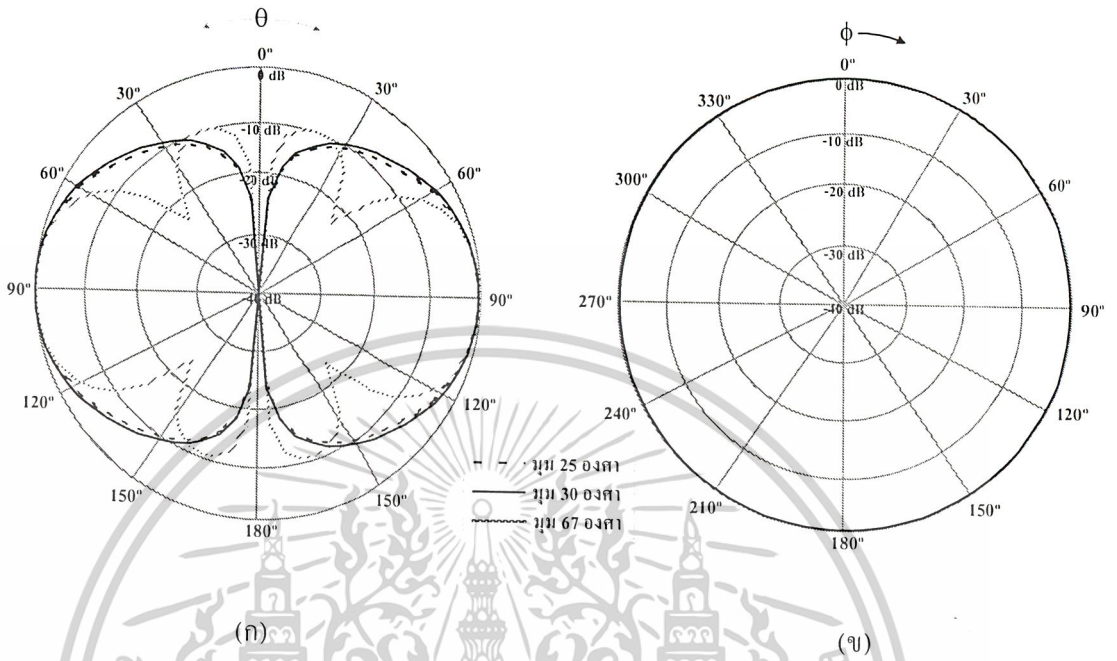
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 400 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยลำที่ความถี่ 460 MHz



มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
25°	90°	61.34°	118.60°	57.26°
30°	90°	58.02°	121.97°	63.95°
67°	90°	65.34°	114.39°	49.04°

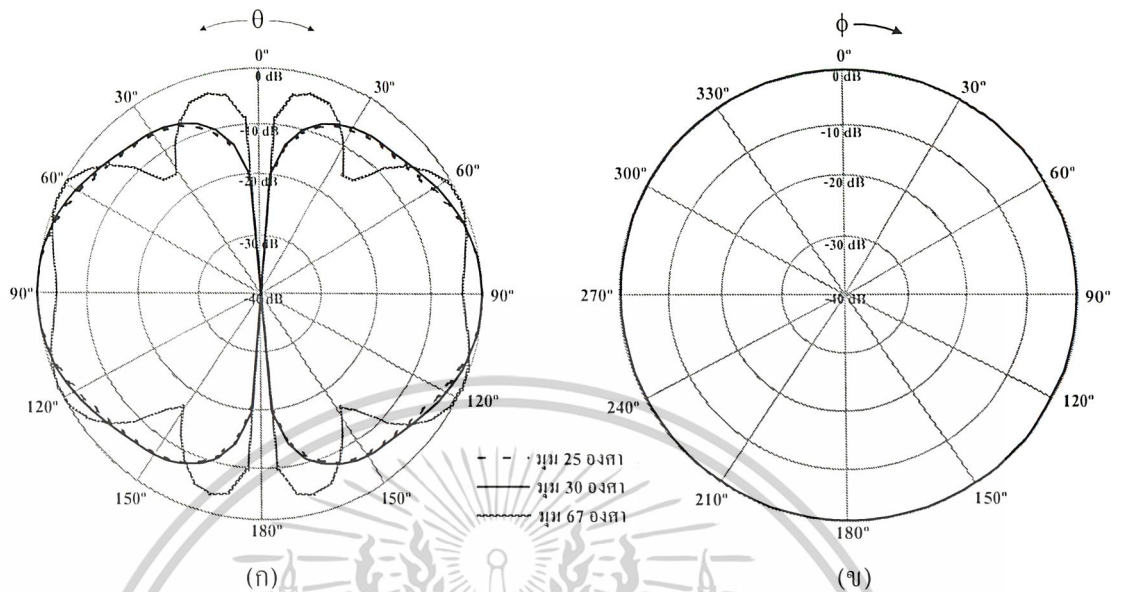
(ค)

รูปที่ 3.4 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยลำที่ความถี่ 460 MHz

- (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz
- (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz
- (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 460 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ที่ความถี่ 520 MHz



มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ				HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)				
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)		
25°	90°	61.64°	118.31°	56.66°	
30°	90°	57.77°	122.22°	64.45°	
67°	115°	95.40°	127.51°	32.10°	

(ค)

รูปที่ 3.5 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ที่ความถี่ 520 MHz

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz

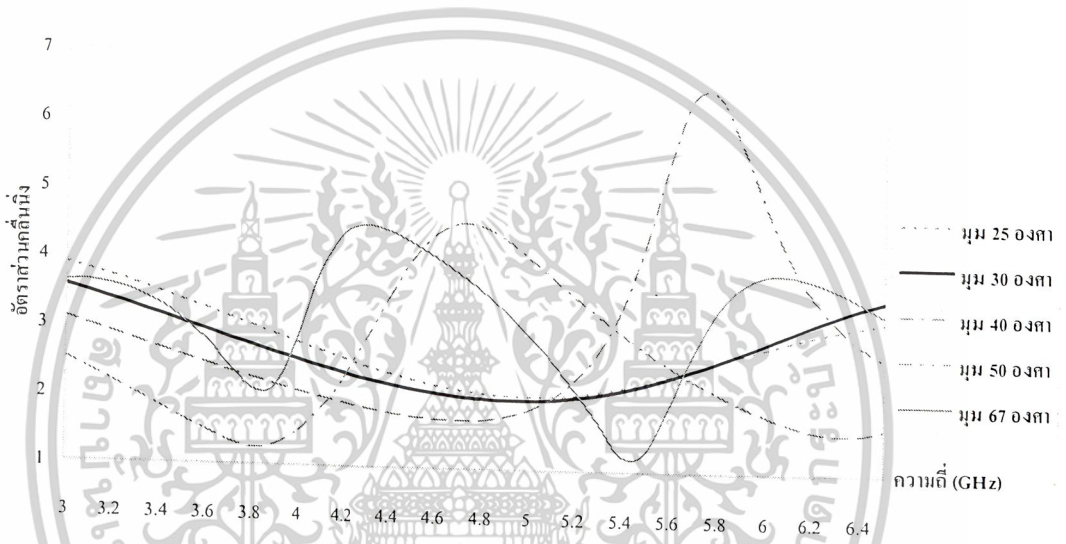
(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 520 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศที่จะนำไปใช้ใน ช่วงความถี่แถบกว้าง ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.7 GHz -5.8 GHz จะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงที่ต้องการนำไปใช้งาน โดยจะวิเคราะห์ที่ความถี่ 3.7 GHz ซึ่งเป็นช่วงแถบความถี่ด้านต่ำ ที่ความถี่ 4.75 GHz เป็นช่วงแถบความถี่กลาง และสุดท้ายจะวิเคราะห์ที่ช่วงแถบความถี่ 5.8 GHz ซึ่งเป็นช่วงแถบความถี่ด้านสูงในการใช้งานของสายอากาศ

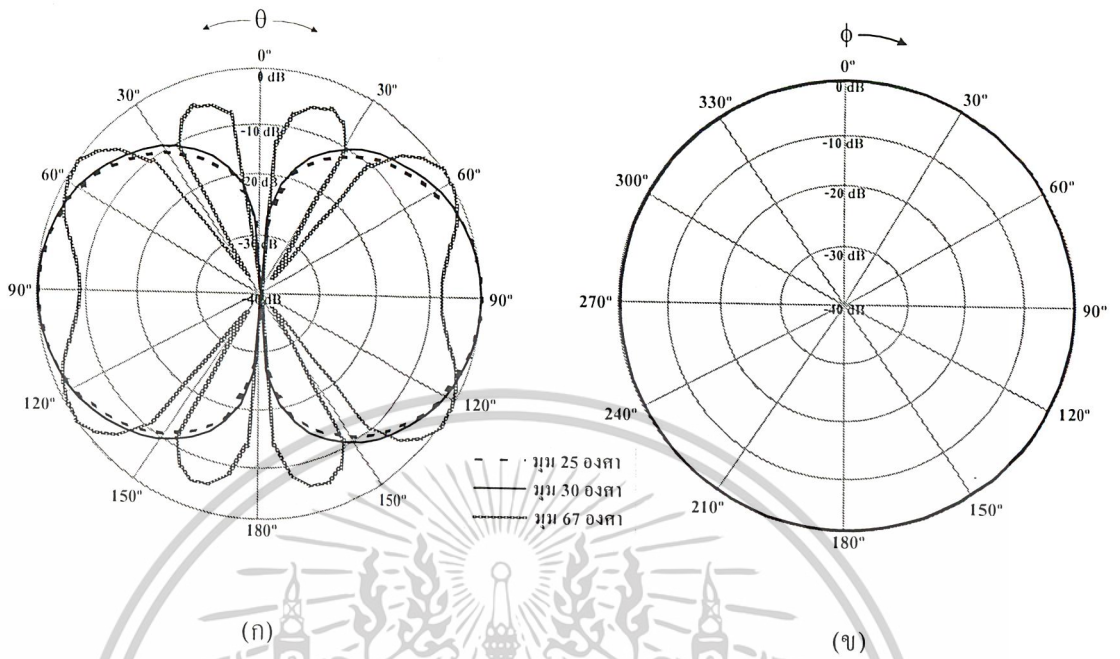
แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยคู่ของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND



รูปที่ 3.6 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่อัตราความถี่ 3.7 GHz



มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
25°	90°	59.71°	120.33°	60.62°
30°	90°	56.46°	123.58°	67.12°
67°	120°	108.31°	133.46°	25.14°

(ค)

รูปที่ 3.7 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่อัตราความถี่ 3.7 GHz

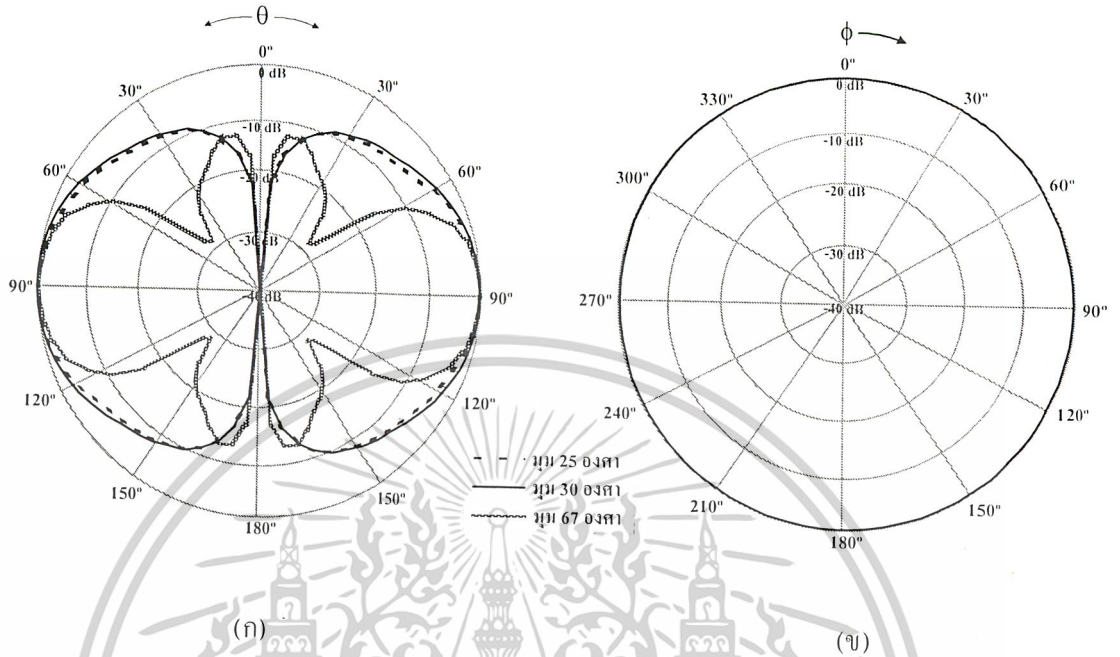
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ที่มีความถี่ 4.75 GHz



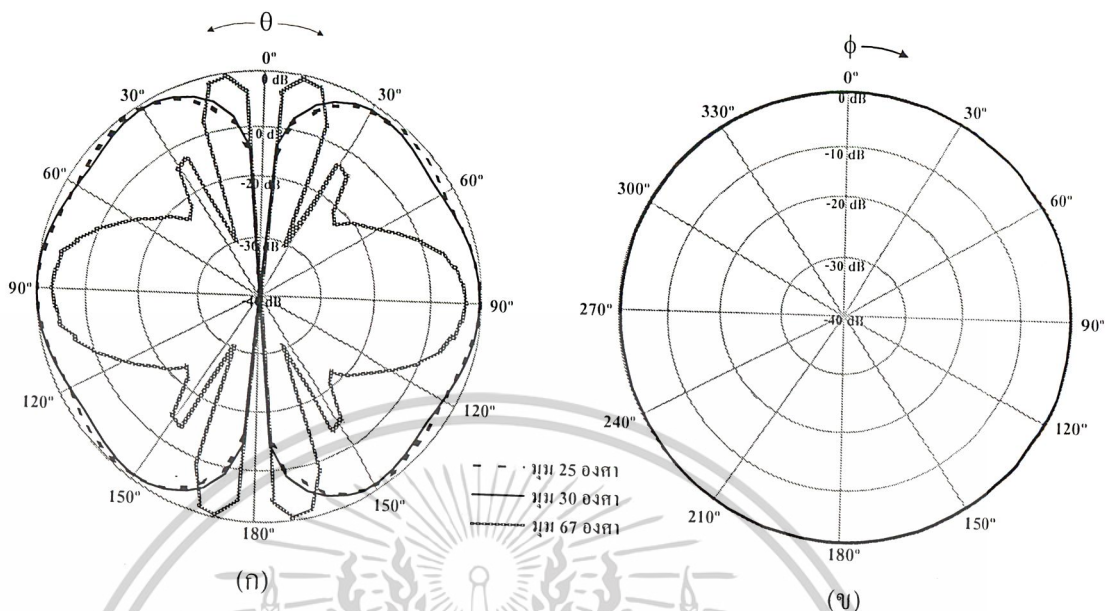
มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
25°	90°	62.75°	117.27°	54.52°
30°	90°	58.32°	121.68°	63.37°
67°	90°	70.52°	109.48°	38.96°

(ค)

รูปที่ 3.8 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคู่ที่มีความถี่ 4.75 GHz
 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz
 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz
 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคูที่ความถี่ 5.8 GHz



มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
25°	90°	21.21°	158.78°	137.57°
30°	90°	18.80°	161.19°	142.38°
67°	90°	74.84°	104.83°	30°

(ค)

รูปที่ 3.9 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยคูที่ความถี่ 5.8 GHz

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

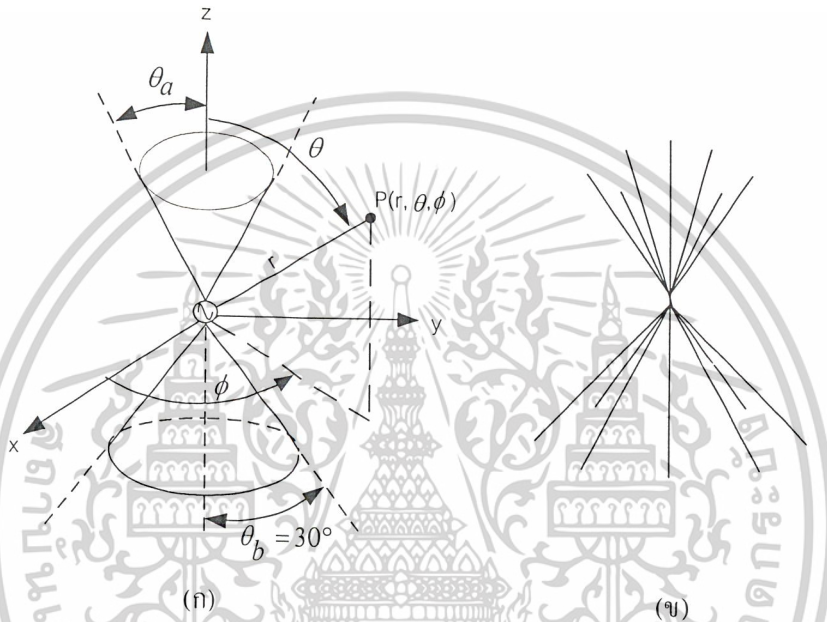
(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบน

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแบบกรวยคู่ซึ่งมีมุมเท่ากัน ในกรณีนี้ $\theta_o = 30^\circ$ จะเห็นว่ามีความคุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุด และเนื่องจากโครงการนี้ทำการศึกษาวิเคราะห์สายอากาศแบบดิสโคนซึ่งมีโครงสร้างมาจากสายอากาศแบบกรวยคู่โดยกำหนดให้มุมของกรวยที่อยู่ด้านล่างคงที่ (θ_b) และเปลี่ยนค่ามุมของกรวยด้านบน (θ_a) ดังรูปที่ 3.10

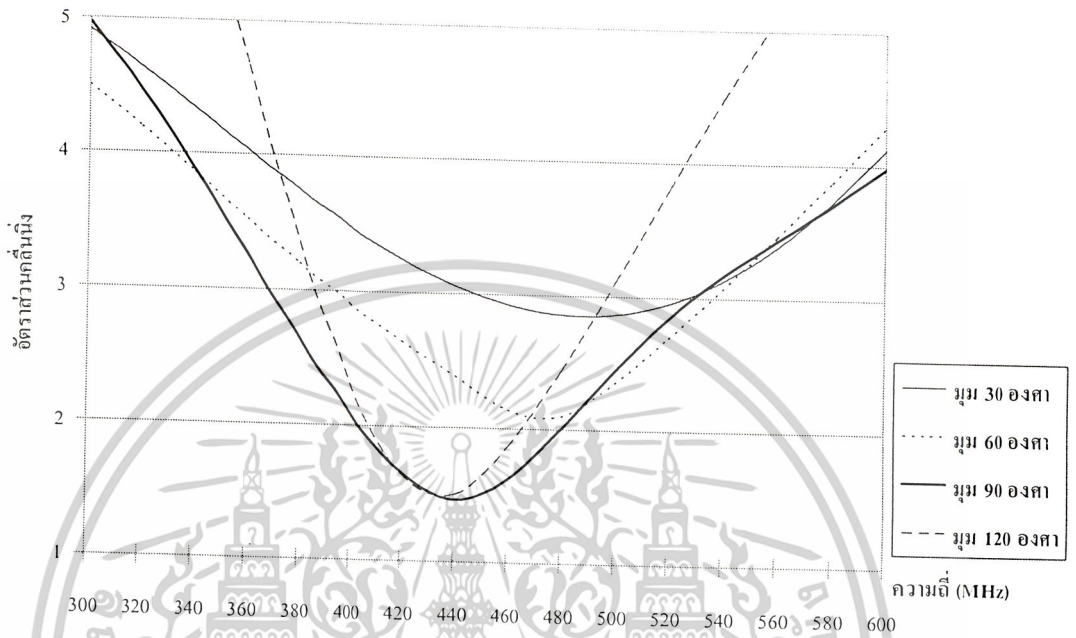


รูปที่ 3.10 (ก) สายอากาศแบบกรวยคู่ที่มีมุมของกรวยไม่เท่ากัน (ข) Wire-simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF เมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบน

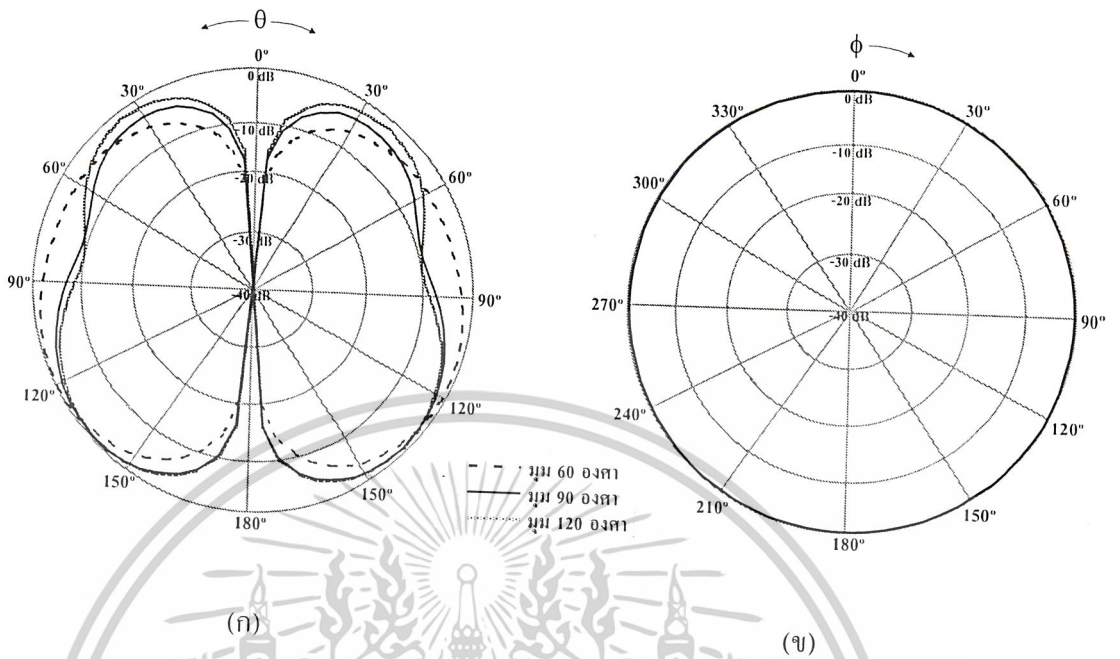
แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวย [๐] ของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF



รูปที่ 3.11 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบนที่ความถี่ 400 MHz



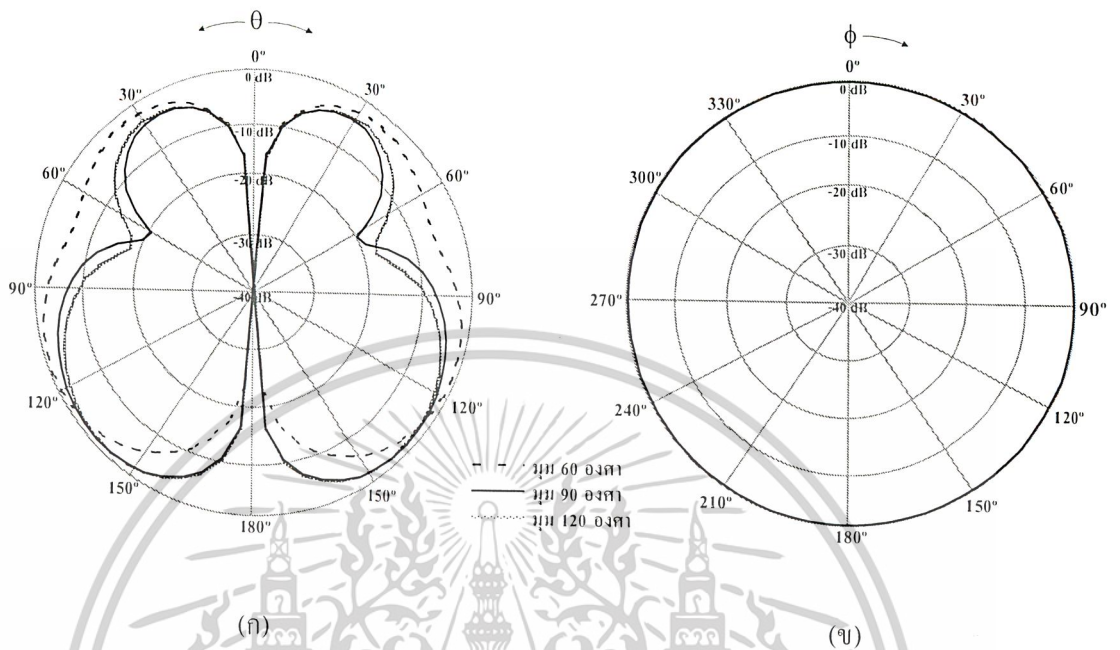
มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
60°	120°	80.60°	148.91°	68.30°
90°	135°	107.36°	159.28°	51.91°
120°	140°	111.02°	160.14°	49.12°

(ค)

- รูปที่ 3.12 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยบนที่ความถี่ 400 MHz
- (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz
 - (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz
 - (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 400 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบนที่ความถี่ 460 MHz



มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
60°	120°	90.36°	143.53°	53.16°
90°	135°	107.05°	160.04°	52.99°
120°	140°	112.20°	160.77°	48.57°

(ค)

รูปที่ 3.13 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยบนที่ความถี่ 460 MHz

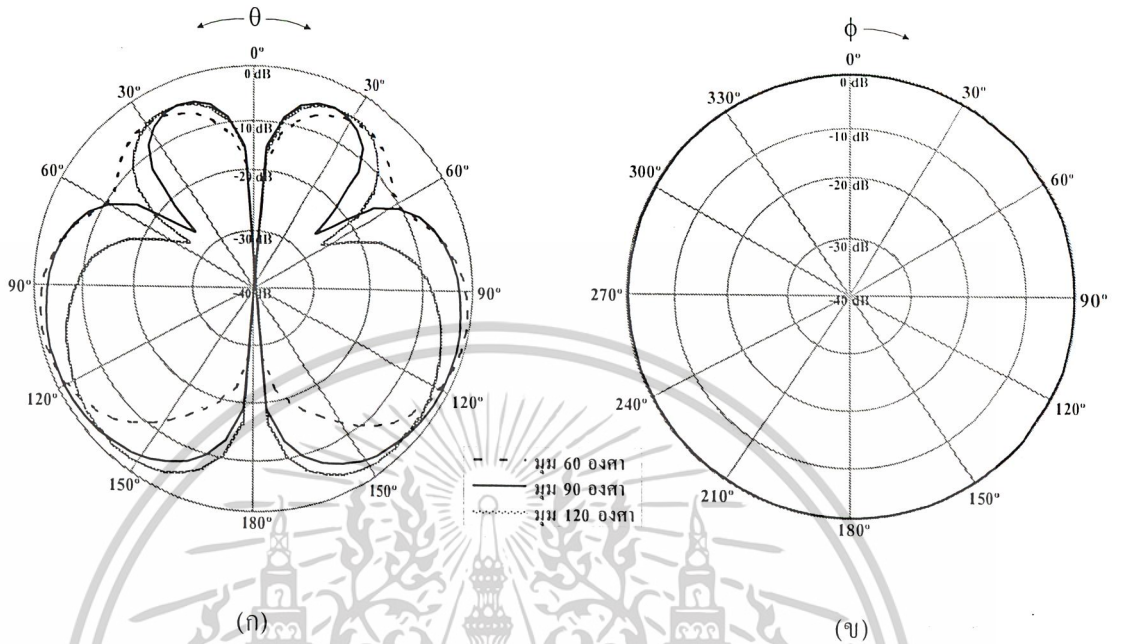
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 460 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบนที่ความถี่ 520 MHz



มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
60°	110°	86.14°	133.23°	47.09°
90°	127.5°	89.63°	155.06°	65.42°
120°	140°	114.05°	161.82°	47.77°

(ค)

รูปที่ 3.14 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยบนที่ความถี่ 520 MHz

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz

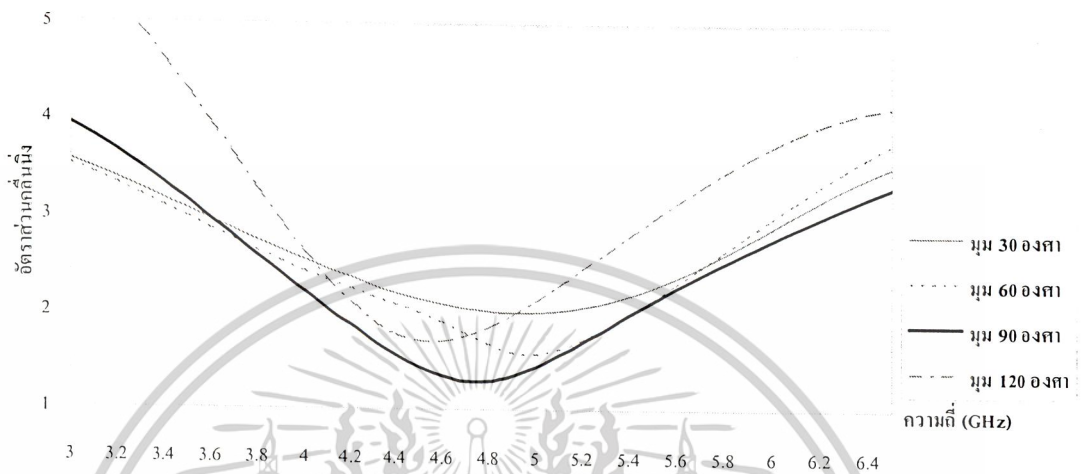
(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 520 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบน

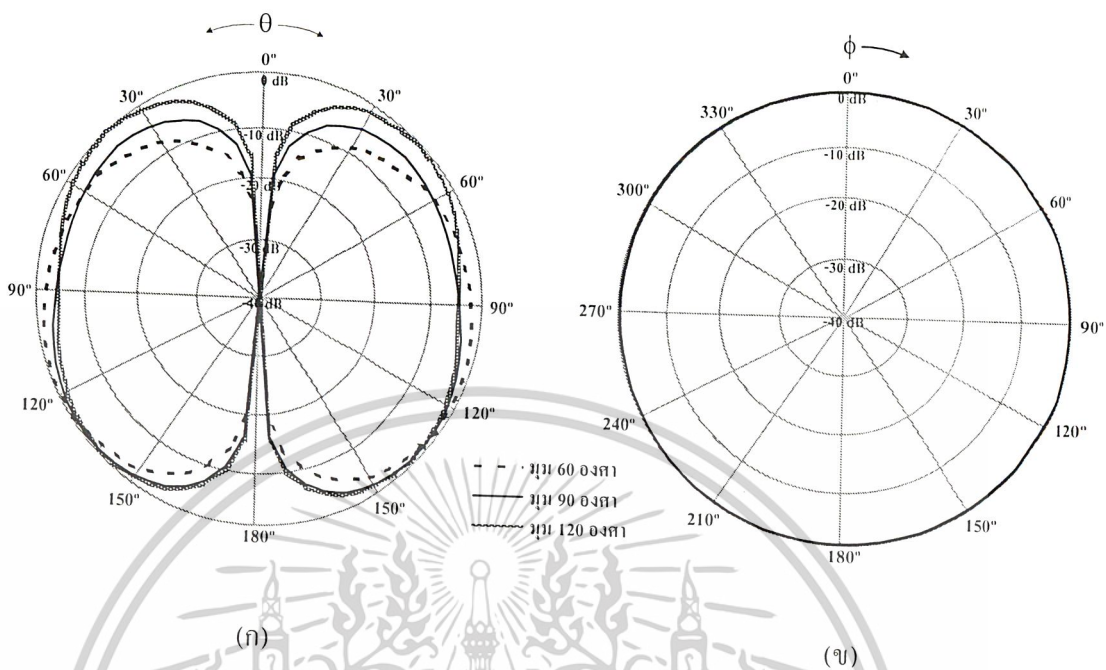
แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบนของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND



รูปที่ 3.15 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบนที่ความถี่ 3.7 GHz



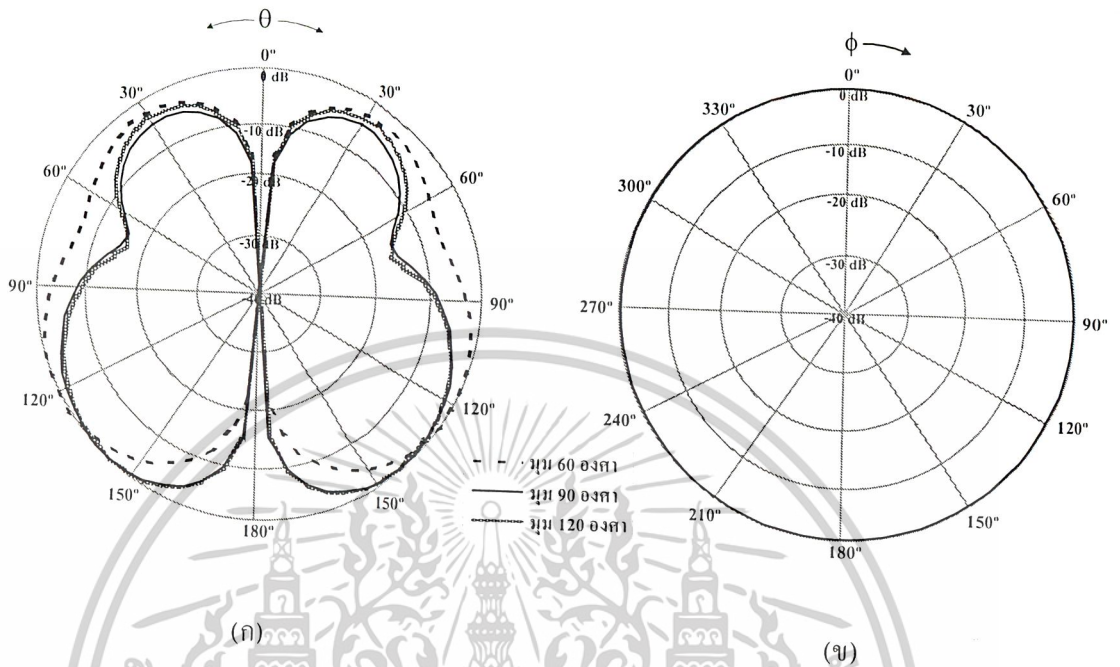
มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
60°	120°	68.78°	148.61°	79.83°
90°	135°	95°	157.53°	62.53°
120°	135°	102.13°	159.17°	57.04°

(ค)

รูปที่ 3.16 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยบนที่ความถี่ 3.7 GHz
 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz
 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz
 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบนที่ความถี่ 4.75 GHz



มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
60°	120°	93.41°	145.55°	52.14°
90°	140°	111.02°	160.37°	49.35°
120°	140°	112.13°	160.9°	48.77°

(ค)

รูปที่ 3.17 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยบนที่ความถี่ 4.75 GHz

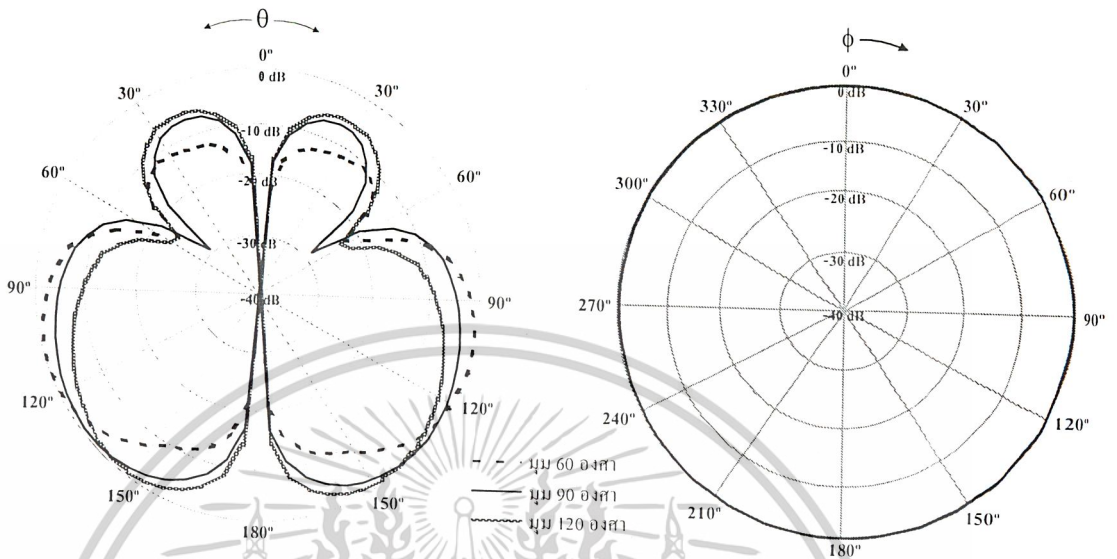
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยบนที่ความถี่ 5.8 GHz



มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
60°	115°	88.68°	136.01°	47.34°
90°	135°	101.97°	157.11°	55.14°
120°	145°	118.93°	163°	44.07°

(ก)

รูปที่ 3.18 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมของกรวยบนที่ความถี่ 5.8 GHz

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

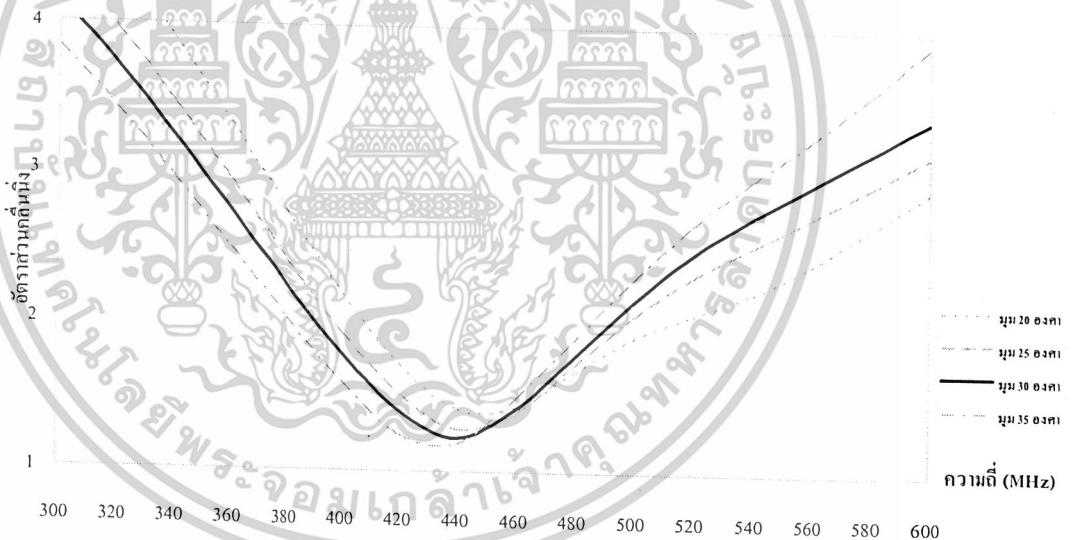
เมื่อทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศกรณีที่มีมุมของกรวย $\theta_a = 90^\circ$ จะเห็นได้ว่าคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศที่สุดดั่งนั้นเมื่อพิจารณากรวยที่อยู่ด้านบนที่มีมุมของกรวย $\theta_a = 90^\circ$ กรวยที่อยู่ด้านบนจะกลายเป็นจานกลมที่วางอยู่บนยอดกรวย ดังนั้นสายอากาศแบบนี้จึงมีโครงสร้างของสายอากาศเป็นแบบที่เรียกว่า สายอากาศแบบดิสโคเน (Discone)

3.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่าง

มุมของกรวยด้านล่างมีผลทำให้คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปลี่ยนไป โดยพิจารณาจากสมการทางทฤษฎีที่ได้จากบทที่ 2 ดังนั้นจึงต้องทำการหาค่ามุมของกรวยด้านล่าง θ_b ของสายอากาศเพื่อทำให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุด

3.4.1 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF เมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่าง

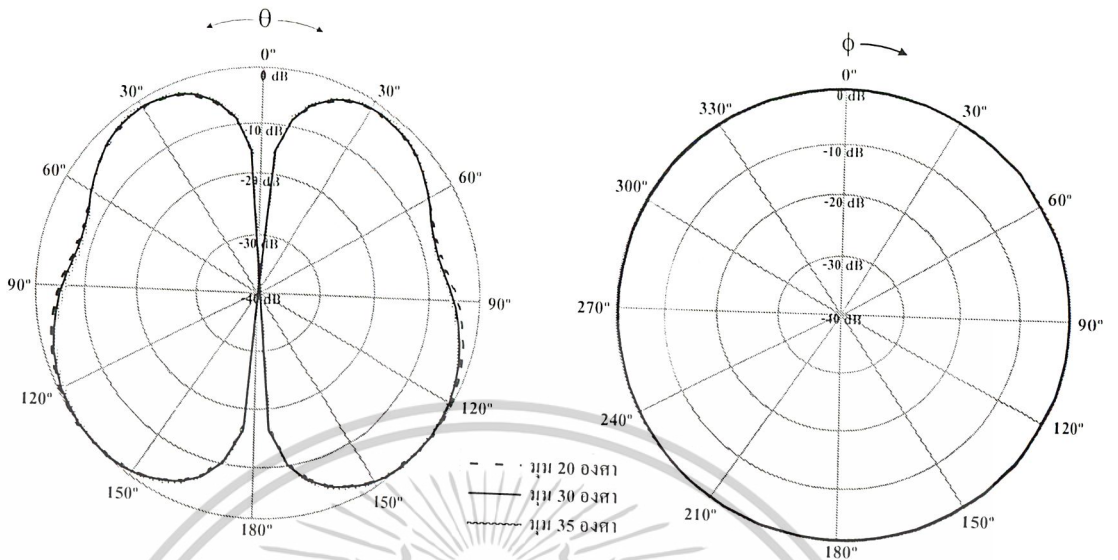
แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่าง



รูปที่ 3.19 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 400 MHz



มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
20°	135°	104.40°	158.09°	53.69°
30°	135°	107.25°	159.24°	51.98°
35°	140°	109.38°	160.09°	50.71°

(ค)

รูปที่ 3.20 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 400 MHz

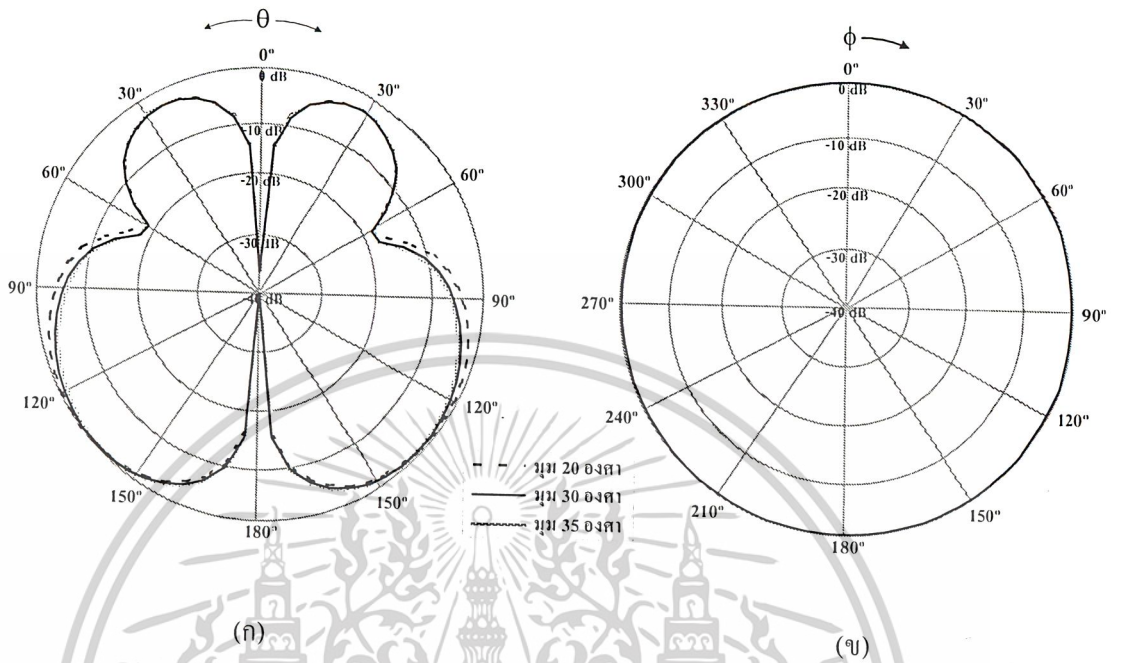
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 400 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 460 MHz



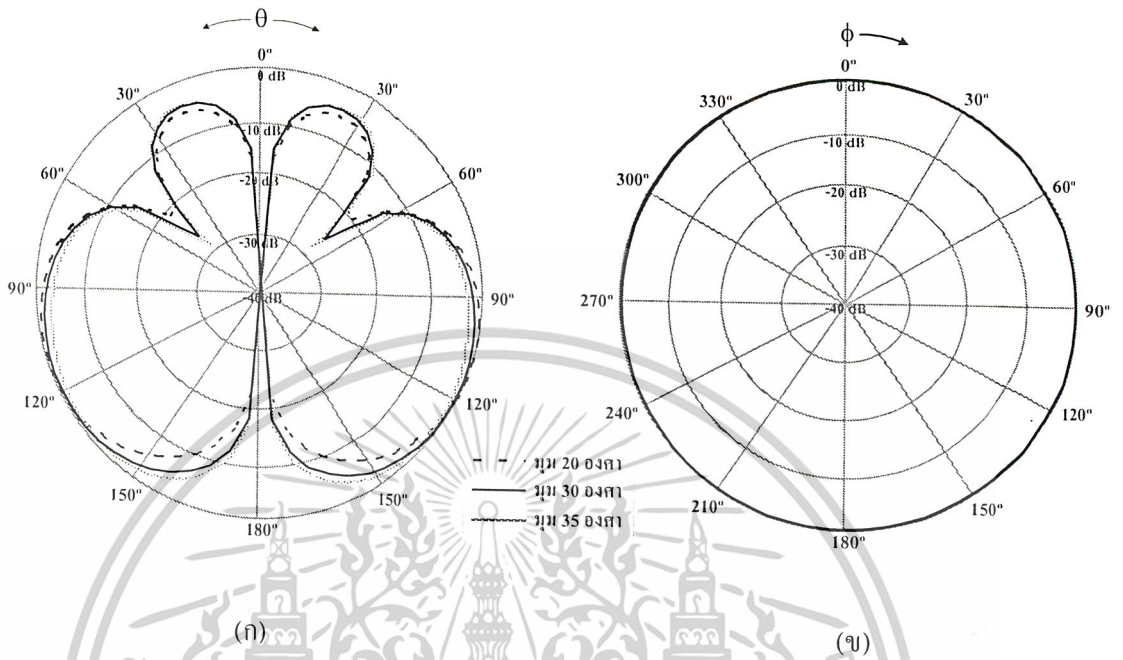
มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
20°	130°	100.38°	157.90°	57.51°
30°	135°	106.91°	160.00°	53.08°
35°	140°	110.87°	160.77°	49.90°

(ค)

- รูปที่ 3.21 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 460 MHz
- (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz
 - (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz
 - (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 460 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 520 MHz



มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และมุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
20°	115°	85.48°	144.34°	58.85°
30°	125°	89.58°	154.82°	65.23°
35°	135°	97.98°	158.92°	60.94°

(ค)

รูปที่ 3.22 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 520 MHz

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz

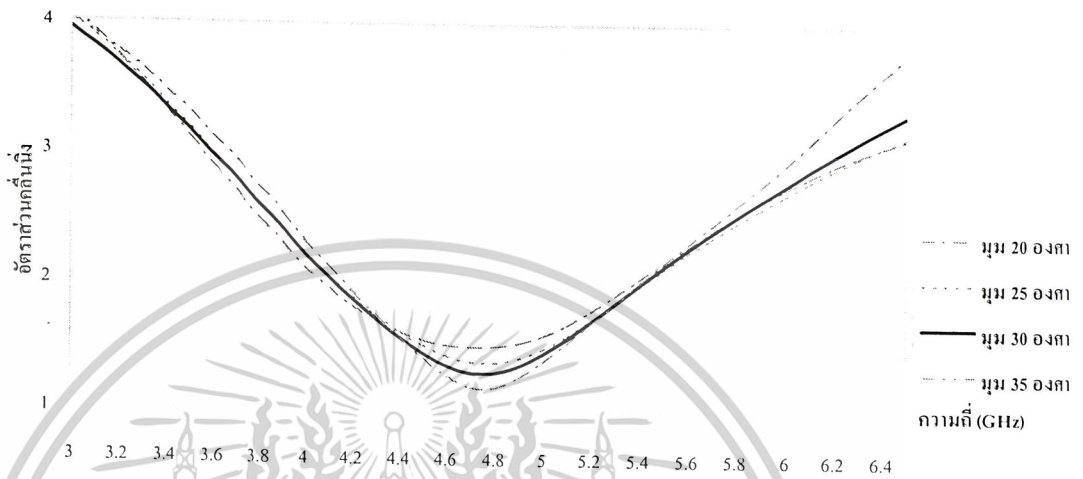
(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 520 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่าง

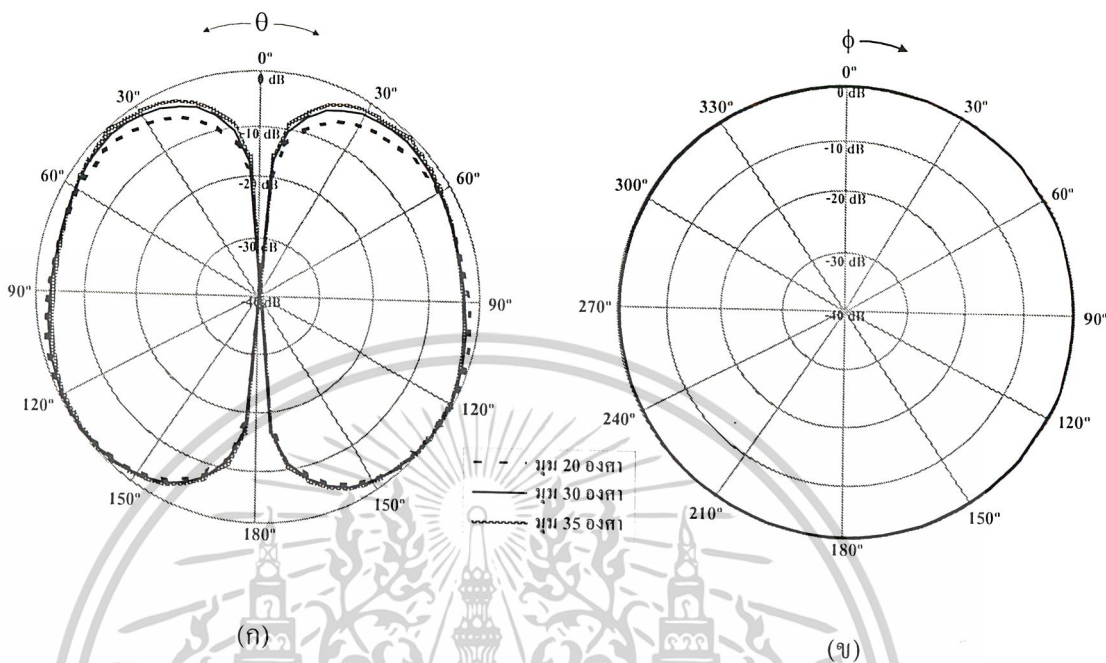
แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่าง



รูปที่ 3.23 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 3.7 GHz



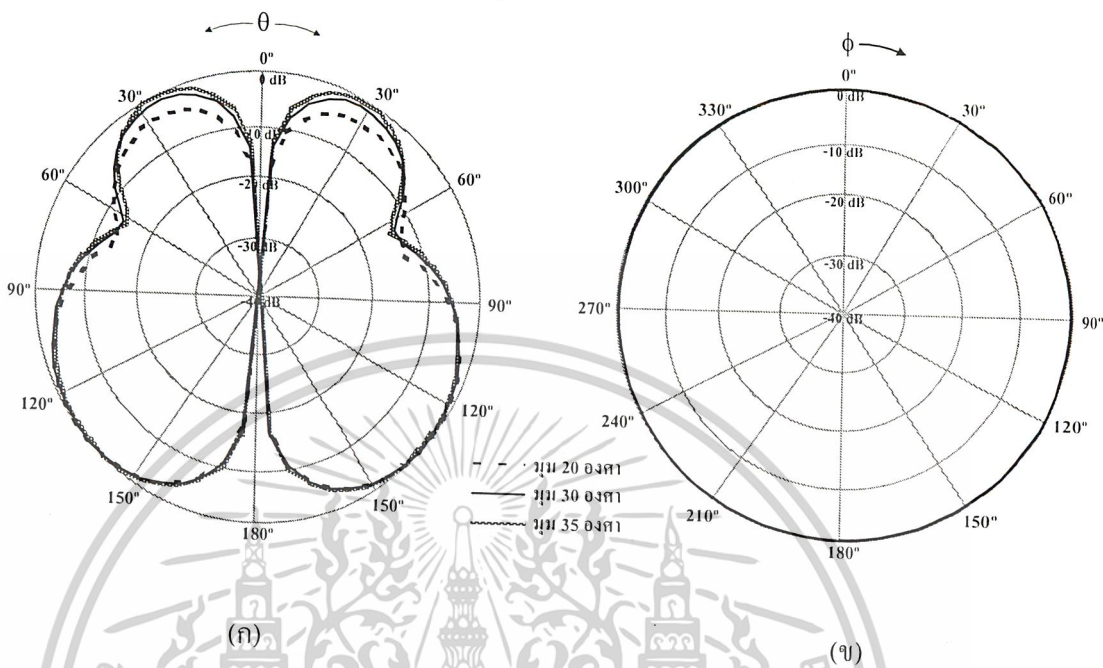
มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
20°	130°	89.3°	155.55°	66.25°
30°	135°	95°	157.53°	62.53°
35°	135°	98.77°	158.52°	59.75°

(ค)

รูปที่ 3.24 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 3.7 GHz
 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz
 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz
 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยค้ำที่ความถี่ 4.75 GHz



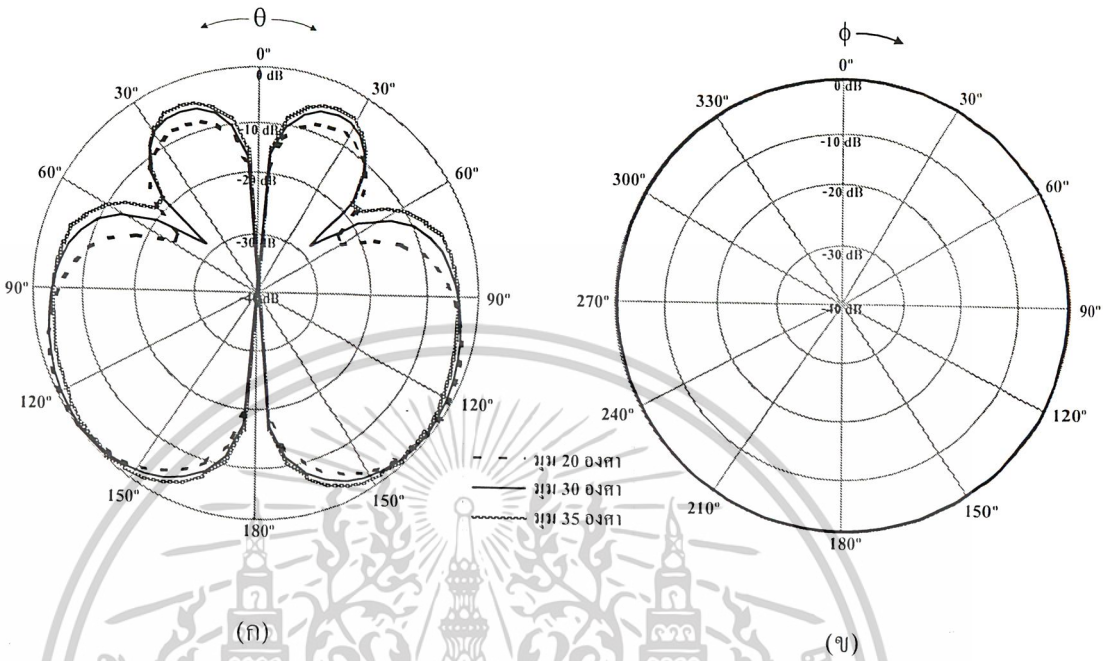
มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
	20°	135°	110.9°	
30°	140°	111.021°	160.37°	49.35°
35°	140°	113.17°	161.16°	47.99°

(ค)

- รูปที่ 3.25 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยค้ำที่ความถี่ 4.75 GHz
- (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz
 - (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz
 - (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 5.8 GHz



มุม	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
20°	130°	102.07°	152.56°	50.48°
30°	135°	101.97°	157.11°	55.14°
35°	140°	109.61°	159.86°	50.25°

(ค)

- รูปที่ 3.26 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนมุมกรวยด้านล่างที่ความถี่ 5.8 GHz
- (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz
 - (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz
 - (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติการป้อนสายอากาศในช่วงความถี่ UHF จำเป็นต้องป้อนจากสายโคแอกเซียลด้านล่างโดยให้โลหะในต่อกับงานโลหะกลมด้านบนและโลหะนอกต่อกับกรวยด้านล่าง ดังนั้นที่จุดยอดของกรวยจึงต้องมีพื้นที่เพียงพอที่จะต่อกอนเนคเตอร์ (Connector) ได้ดังรูปที่ 3.27 ส่วนสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND จะใช้วิธีการป้อนสายอากาศในลักษณะเดียวกันแต่ใช้พื้นที่ที่จุดยอดของกรวยน้อยกว่า



รูปที่ 3.27 Wire-simulation ของสายอากาศที่ตัดยอดกรวยออก

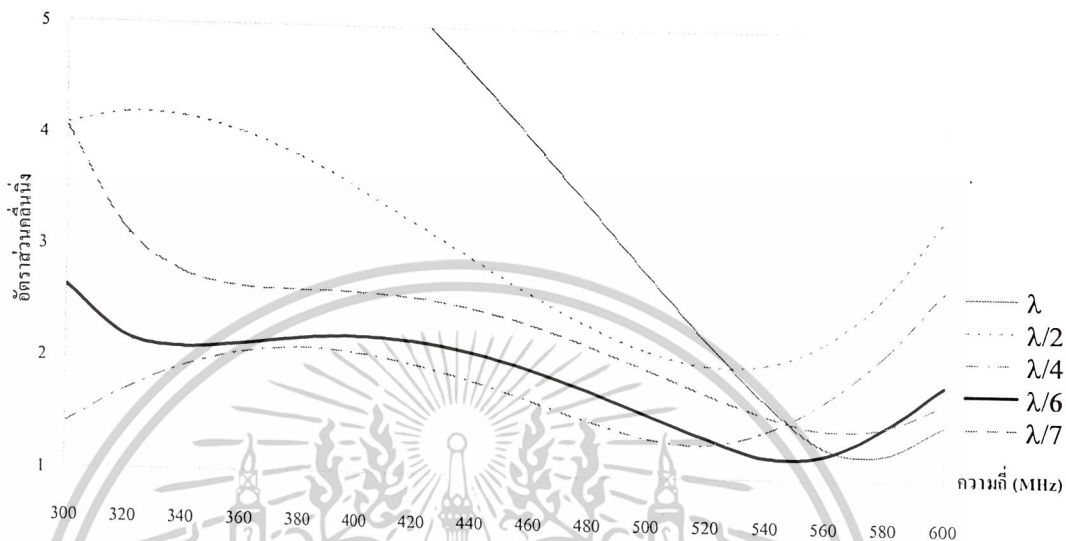
3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของงานโลหะ

งานโลหะด้านบนของสายอากาศแบบดิสโคนนี้ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ดังนั้นโครงสร้างของงานโลหะกลมด้านบนจึงมีผลทำให้คุณลักษณะของสายอากาศเปลี่ยนไปได้มากเช่นคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์หรือคุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่น ในการวิเคราะห์จึงทำการวิเคราะห์หาขนาดของงานโลหะที่ขนาดต่างๆเช่นเมื่องานโลหะมีขนาดเท่ากับความยาวคลื่นหรือเมื่องานโลหะเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นรวมถึงในกรณีที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นด้วย

ในการสร้างสายอากาศจริงในช่วงความถี่ UHF จำเป็นที่จะต้องใช้ก้านโลหะมาแทนงานโลหะแบบทึบอยู่เพื่อลดน้ำหนักของสายอากาศส่วนในช่วงความถี่ C-BAND สามารถใช้งานโลหะแบบทึบได้เนื่องจากขนาดของสายอากาศมีขนาดเล็กอยู่แล้ว จึงสามารถนำไปใช้งานกับระบบอากาศยานไร้คนขับได้อย่างเหมาะสม

3.5.1 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF เมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะ

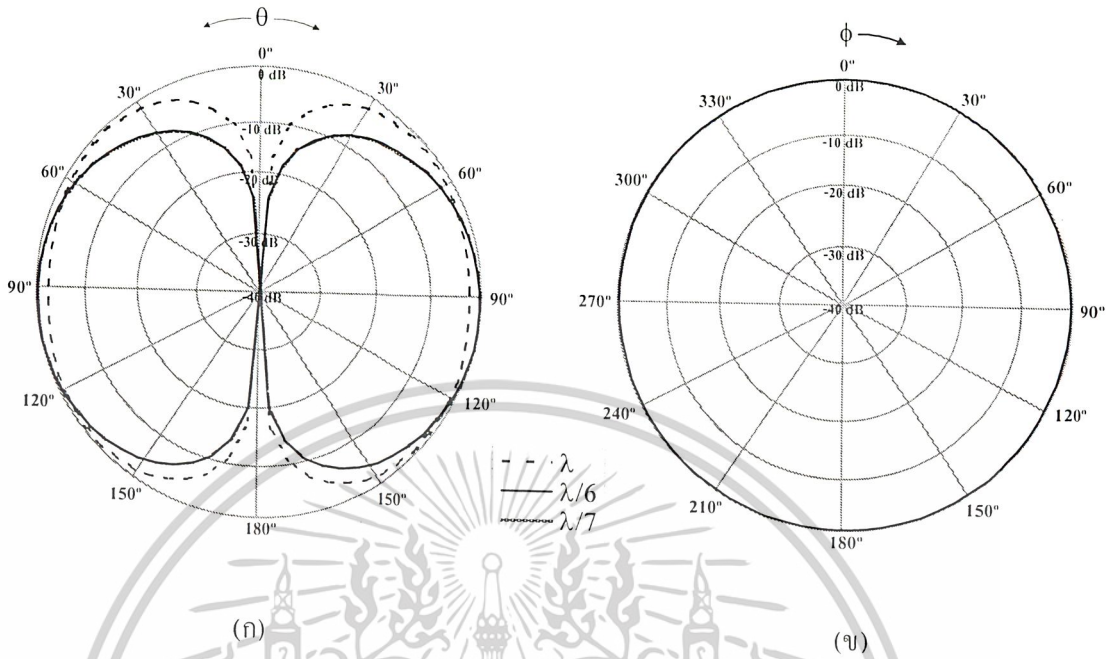
แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะ



รูปที่ 3.28 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของงานโลหะที่ความถี่ 400 MHz



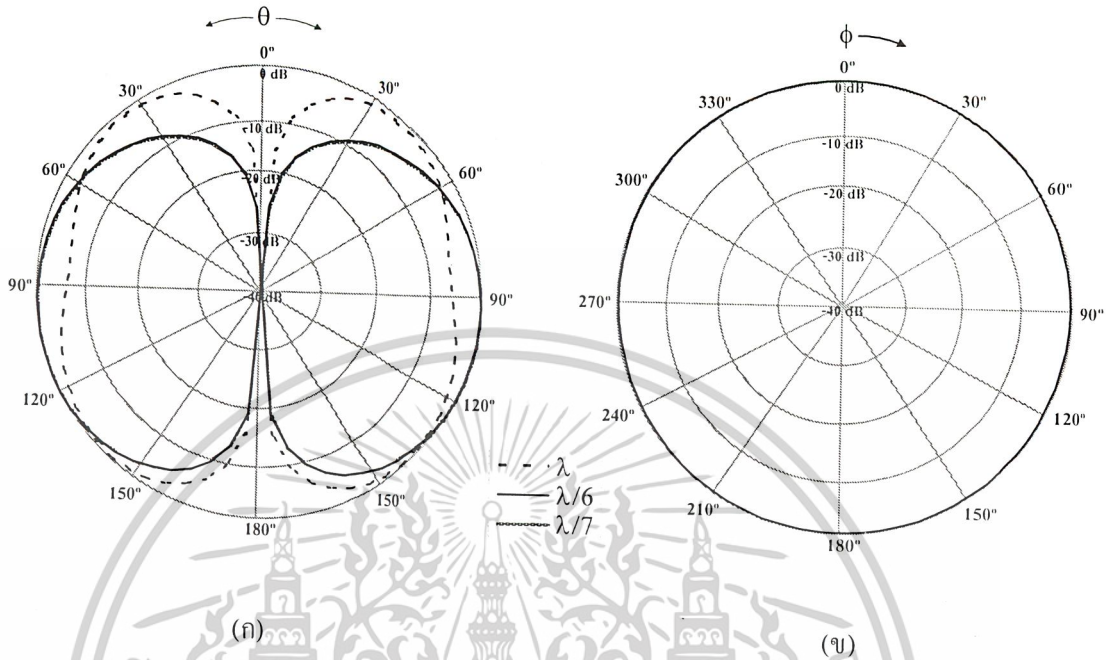
ความกว้าง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
λ	135°	29.61°	157.95°	128.33°
$\lambda/6$	110°	58.15°	146.81°	88.65°
$\lambda/7$	110°	58.88°	146.79°	87.91°

(ค)

รูปที่ 3.29 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของงานโลหะที่ความถี่ 400 MHz
 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz
 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz
 (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 400 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของงาน โลหะที่ความถี่ 460 MHz



ความกว้าง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
λ	140°	111.10°	160.56°	49.46°
$\lambda/6$	120°	69.36°	151.20°	81.84°
$\lambda/7$	120°	70.43°	151.16°	80.73°

(ค)

รูปที่ 3.30 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของงาน โลหะที่ความถี่ 460 MHz

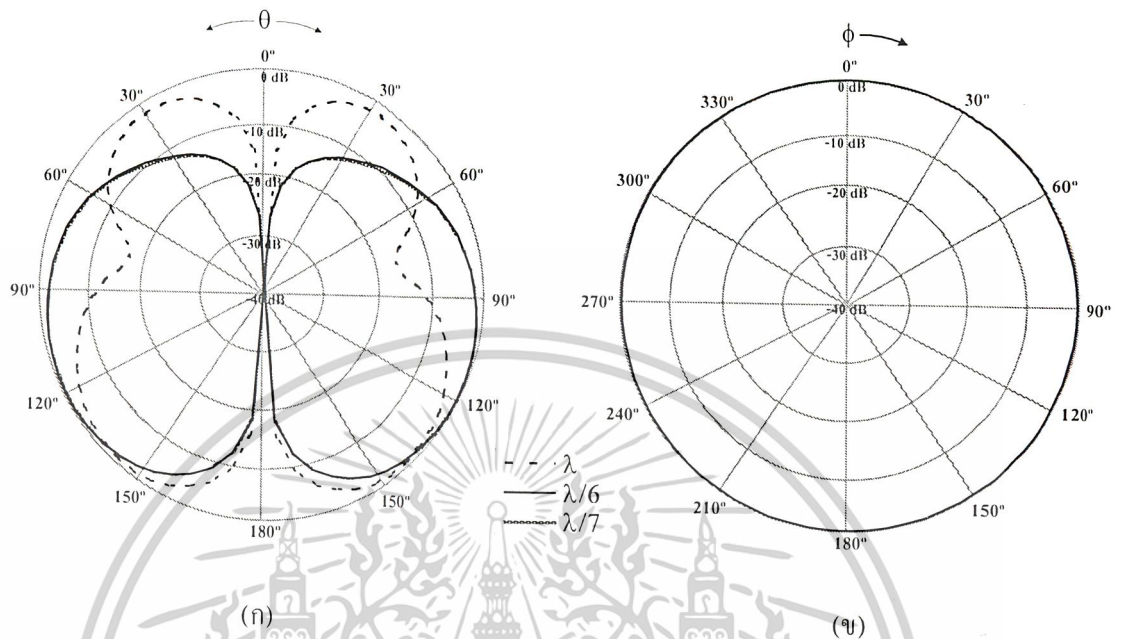
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 460 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของงานโลหะที่ความถี่ 520 MHz



ความกว้าง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายต่ำถึงงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
λ	145°	118.07°	161.90°	43.89°
$\lambda/6$	127.5°	84.66°	154.95°	70.28°
$\lambda/7$	127.5°	85.50°	154.90°	69.38°

(ค)

รูปที่ 3.31 แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของงานโลหะที่ความถี่ 520 MHz

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz

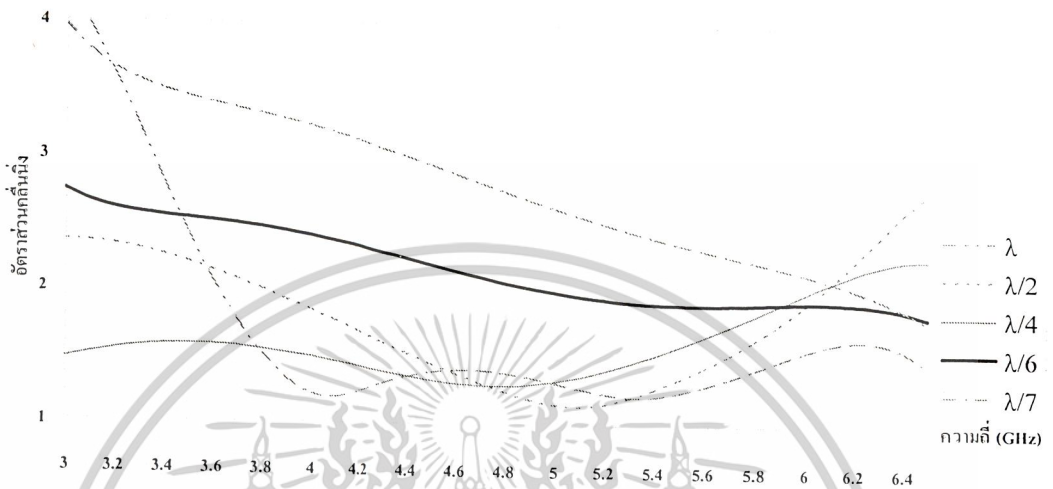
(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 520 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เมื่อเปลี่ยนขนาดของงานโลหะ

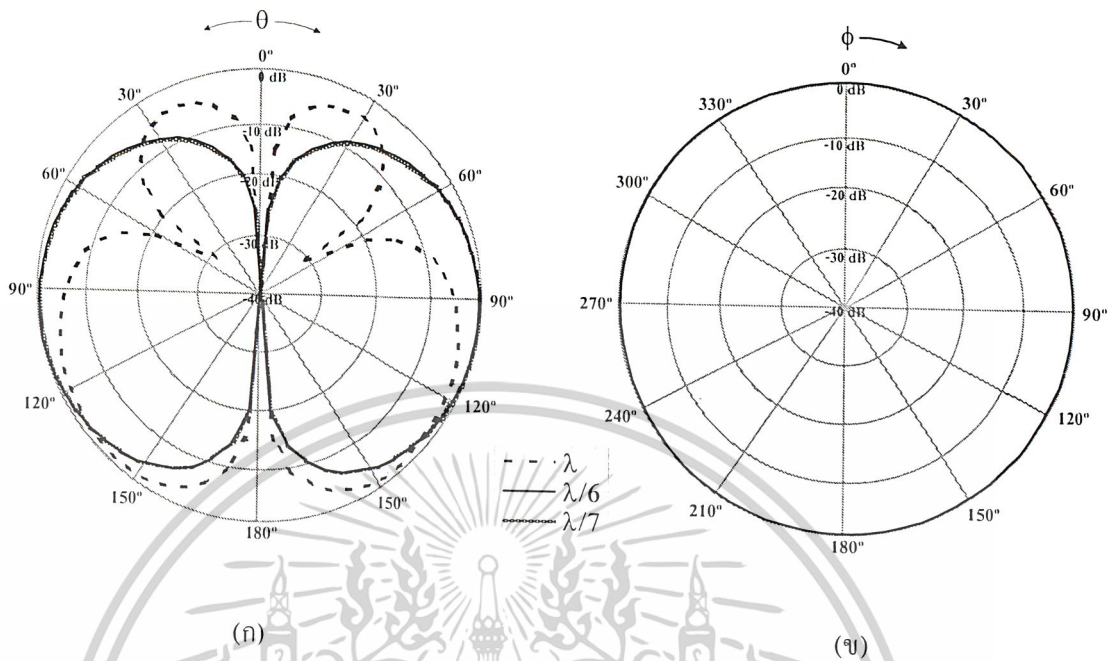
แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนขนาดของงานโลหะ



รูปที่ 3.32 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนขนาดของงานโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของงานโลหะที่ความถี่ 3.7 GHz



ความกว้าง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
λ	140°	105.45°	161.82°	56.37°
$\lambda/6$	115°	64.1°	149.18°	85.08°
$\lambda/7$	115°	65.16°	149.17°	84.01°

(ค)

รูปที่ 3.33 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของงานโลหะที่ความถี่ 3.7 GHz

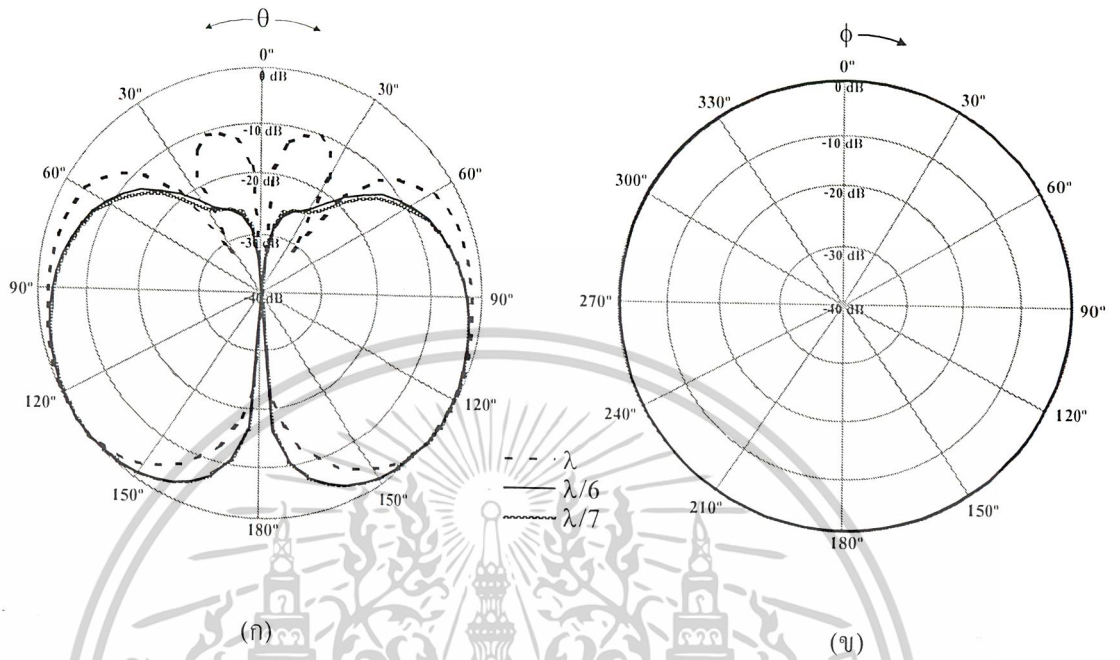
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะที่ความถี่ 4.75 GHz



ความกว้าง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
λ	125°	64.57°	145.54°	80.97°
$\lambda/6$	130°	85.73°	155.71°	69.99°
$\lambda/7$	130°	86.64°	155.64°	69.01°

(ค)

รูปที่ 3.34 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของจานโลหะที่ความถี่ 4.75 GHz

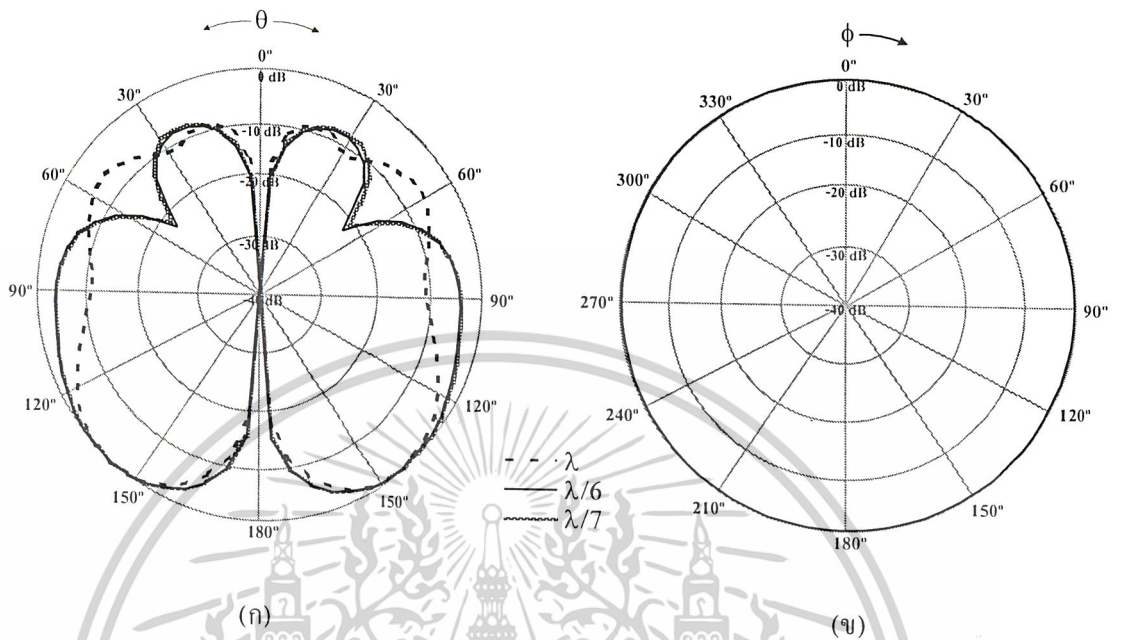
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของงาน โลหะที่ความถี่ 5.8 GHz



ความกว้าง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
λ	140°	122°	157.57°	35.57°
$\lambda/6$	140°	111.29°	160.34°	49.05°
$\lambda/7$	140°	111.06°	160.26°	49.2°

(ค)

รูปที่ 3.35 แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนขนาดของงาน โลหะที่ความถี่ 5.8 GHz

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

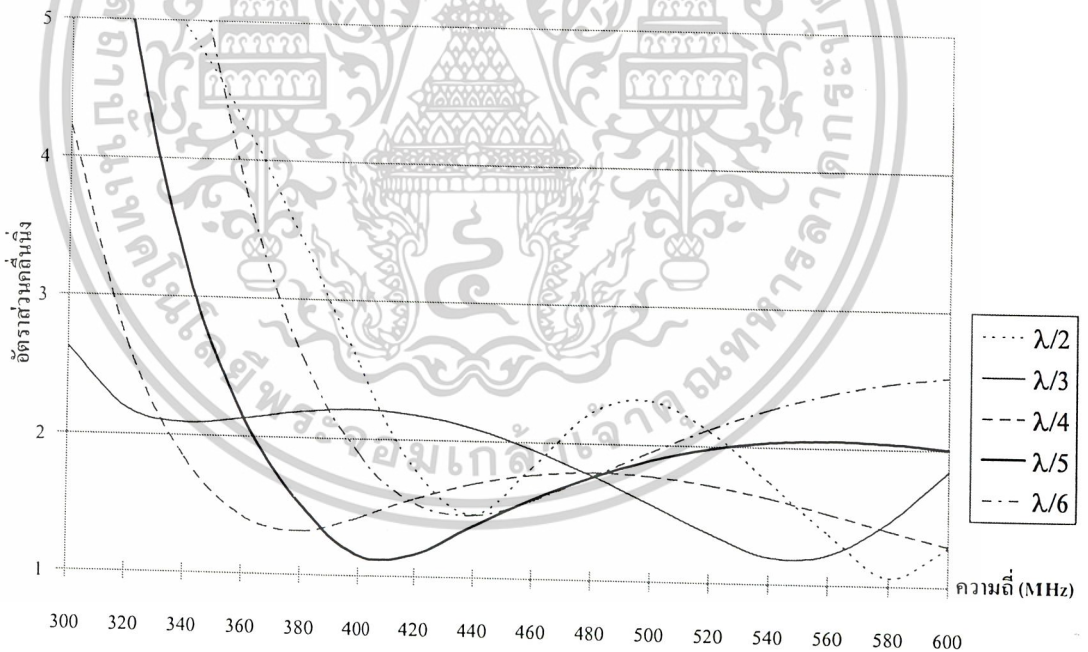
ในการวิเคราะห์หาขนาดของงาน โลหะจะพบได้ว่า เมื่อขนาดของงานโลหะมีขนาดใหญ่หรือเมื่อมีขนาดเท่ากับความยาวคลื่นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรวมถึงมุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครั้งหนึ่งจะมีลักษณะไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานกล่าวคือชี้ไปในทิศทางที่ทำให้ระบบอากาศยานไร้คนขับนั้นไม่สามารถติดต่อสื่อสารกับสถานีภาคพื้นดินได้อย่างมีประสิทธิภาพและจากผลการวิเคราะห์ก็จะพบอีกว่าในกรณีที่ขนาดของงานโลหะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นจะทำให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุดผลการวิเคราะห์หาขนาดของงานโลหะจะสอดคล้องกันทั้งสองช่วงความถี่ที่แถบกว้างที่นำไปใช้งาน

3.6 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผล

ความสูงประสิทธิผลของสายอากาศนั้นมีผลทำให้คุณลักษณะของสายอากาศเปลี่ยนไปดังนั้นจึงต้องทำการหาค่าความสูงประสิทธิผลของสายอากาศเพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุด

3.6.1 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF เมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผล

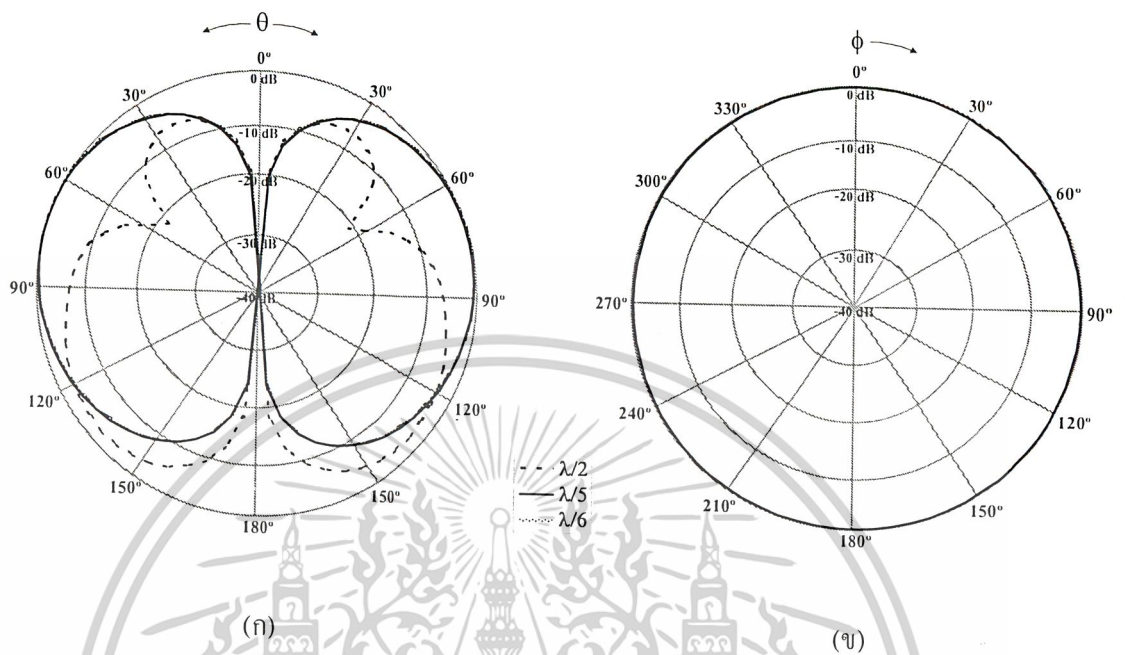
แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผล



รูปที่ 3.36 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 400 MHz



ความสูง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
$\lambda/2$	135°	109.31°	158.89°	49.58°
$\lambda/5$	95°	46.47°	138.55°	92.07°
$\lambda/6$	90°	45.21°	137.30°	92.09°

(ค)

รูปที่ 3.37 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 400 MHz

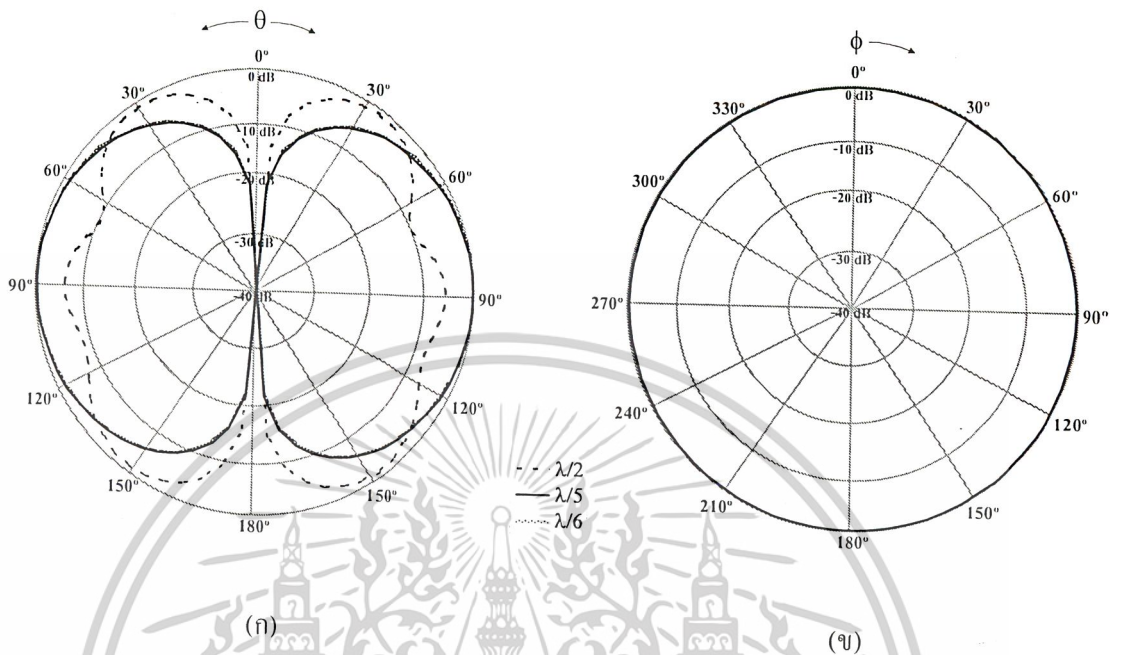
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 400 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 460 MHz



ความสูง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
$\lambda/2$	145°	126.46°	162.52°	36.05°
$\lambda/5$	95°	47.84°	140.66°	92.81°
$\lambda/6$	95°	45.79°	138.61°	92.82°

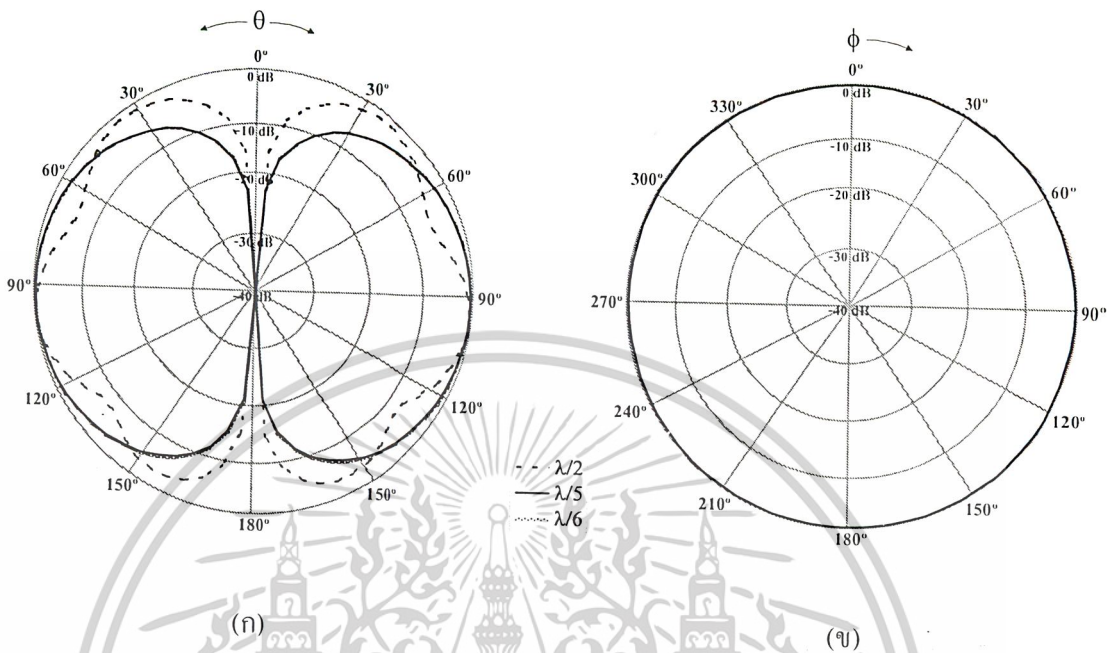
(ค)

รูปที่ 3.38 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 460 MHz

- (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz
- (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz
- (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 460 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 520 MHz



ความสูง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายค่าถึงงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
$\lambda/2$	100°	78.40°	116.37°	37.96°
$\lambda/5$	95°	46.47°	138.55°	92.07°
$\lambda/6$	95°	46.66°	140.44°	93.77°

(ค)

รูปที่ 3.39 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 520 MHz

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz

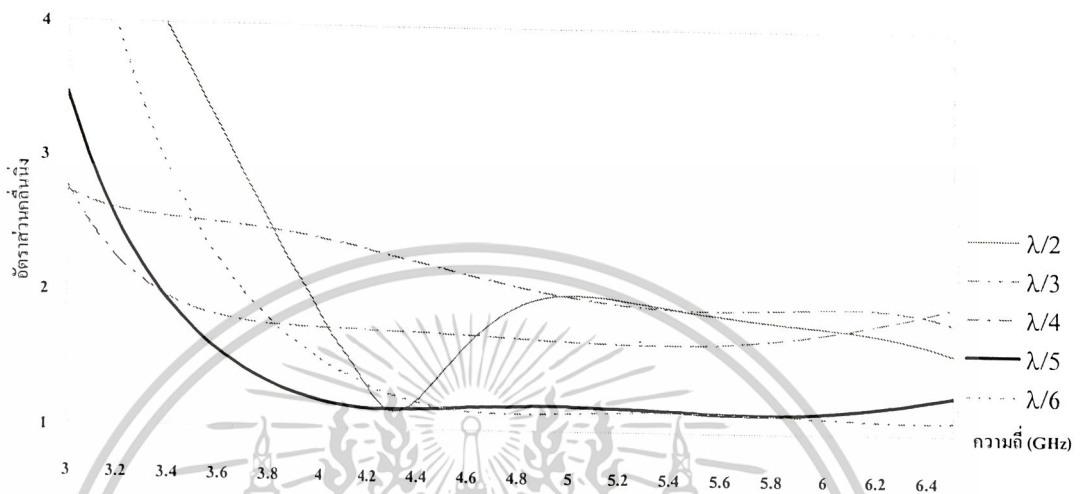
(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่ค่าถึงงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 520 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิภาพ

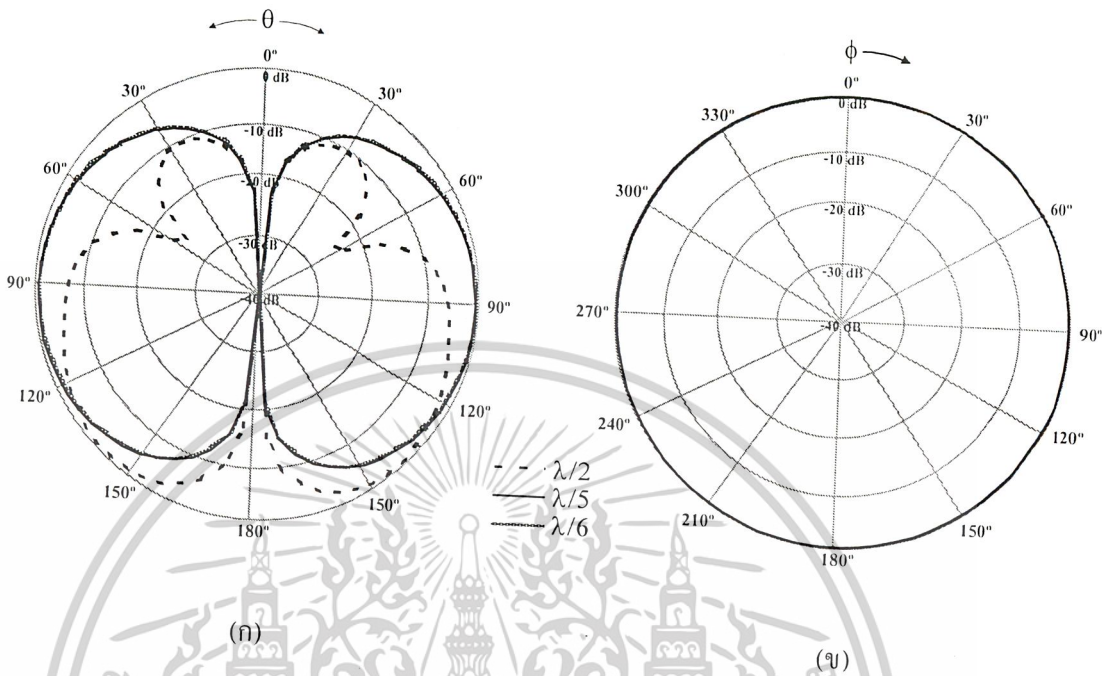
แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.40 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิภาพที่ความถี่ 3.7 GHz



ความสูง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
	$\lambda/2$	140°	108.54°	
$\lambda/5$	95°	47.07°	140.56°	93.49°
$\lambda/6$	95°	45.15°	138.75°	93.6°

(ค)

รูปที่ 3.41 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิภาพที่ความถี่ 3.7 GHz

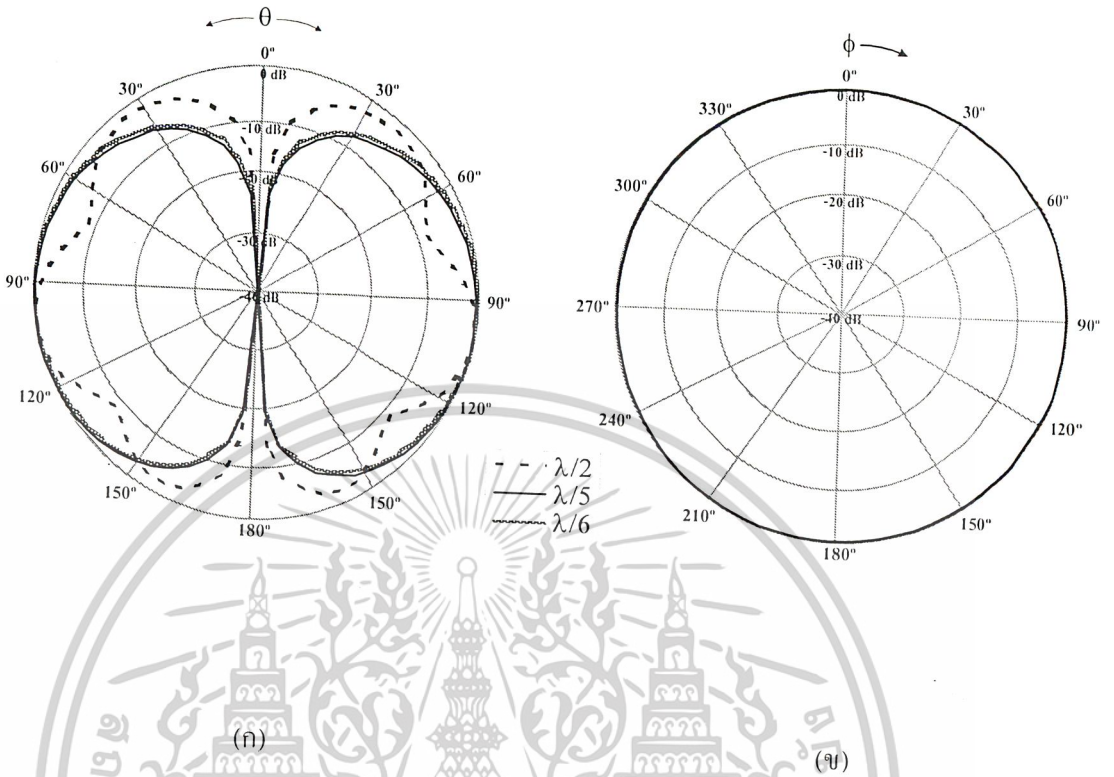
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 4.75 GHz



ความสูง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
$\lambda/2$	100°	83.53°	117.5°	33.97°
$\lambda/5$	105°	52.07°	146.08°	94°
$\lambda/6$	97.5°	46.88°	142.65°	95.76°

(ค)

รูปที่ 3.42 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 4.75 GHz

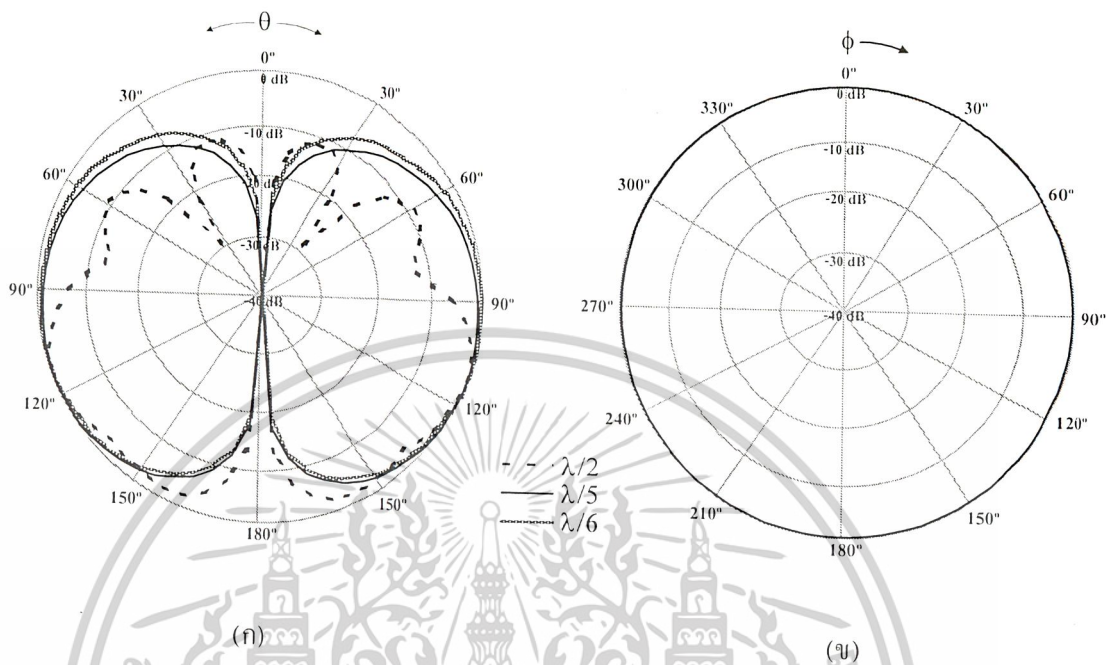
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 5.8 GHz



ความสูง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
$\lambda/2$	115°	96.08°	162.5°	66.41°
$\lambda/5$	120°	62.54°	151.72°	89.18°
$\lambda/6$	107.5°	50.98°	147.78°	96.8°

(ค)

รูปที่ 3.43 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าความสูงประสิทธิผลที่ความถี่ 5.8 GHz

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 5.8 GHz

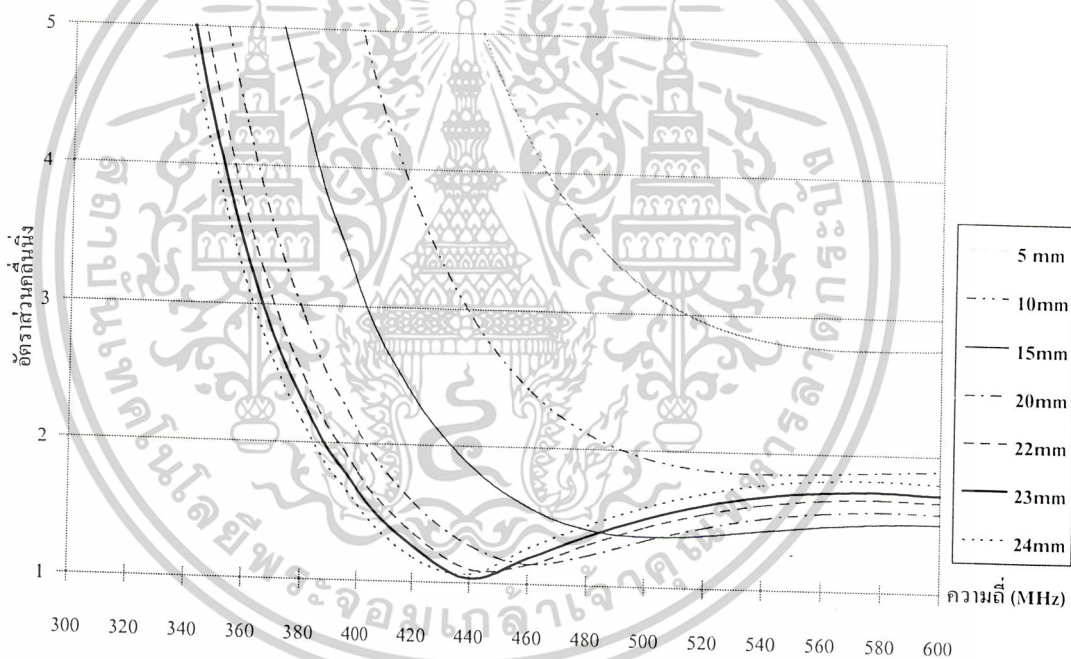
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะ

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแบบดิสโคนั้นสิ่งที่จะพิจารณาเป็นส่วนสุดท้ายก็คือ ระยะห่างระหว่างกรวยและจานโลหะกลมที่วางอยู่ด้านบนของกรวย (Gap) ซึ่งระยะห่างนี้เป็นผลทำให้ ความยาวของโลหะนำในของสายนำสัญญาณเปลี่ยนไปตามระยะห่างนี้ ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์เพื่อที่จะหา ระยะห่างระหว่างกรวยและจานโลหะกลม เพื่อที่จะทำให้ได้ความยาวของโลหะนำในของสายนำสัญญาณ ที่มีความเหมาะสมทำให้คุณลักษณะของสายอากาศดีที่สุด

3.7.1 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจาน โลหะ

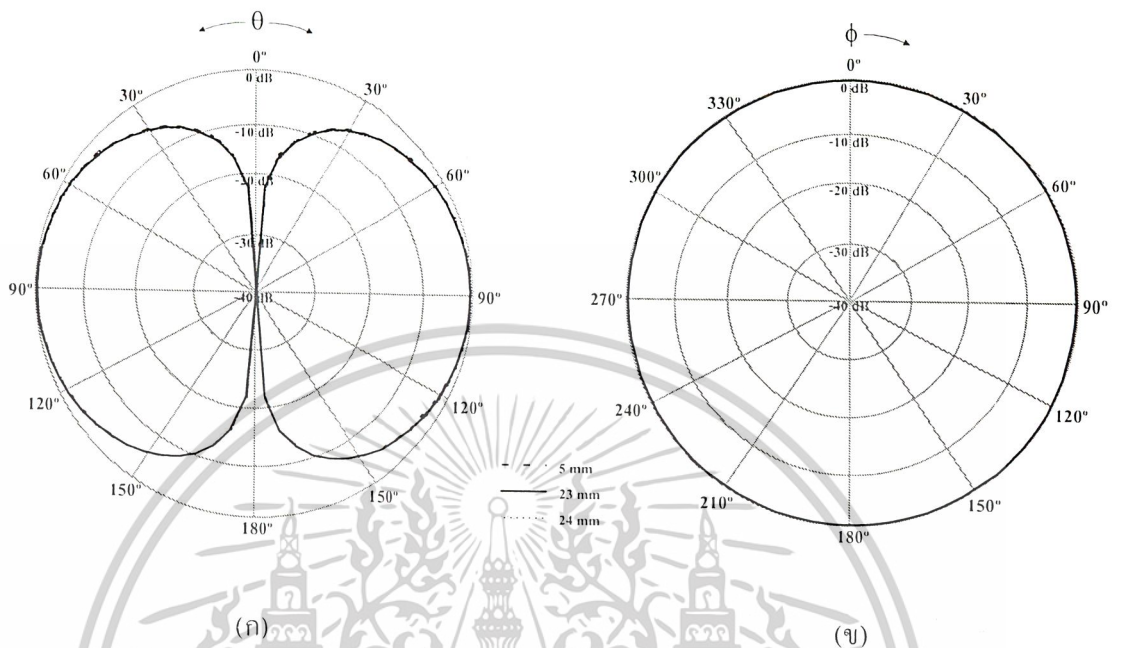
แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะ



รูปที่ 3.44 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงาน โลหะที่ความถี่ 400 MHz



ระยะห่าง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
	5 mm	92.5°	45.57°	
23 mm	95°	46.94°	138.37°	91.43°
24 mm	95°	47.04°	138.33°	91.29°

(ค)

รูปที่ 3.45 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงาน โลหะที่ความถี่ 400 MHz

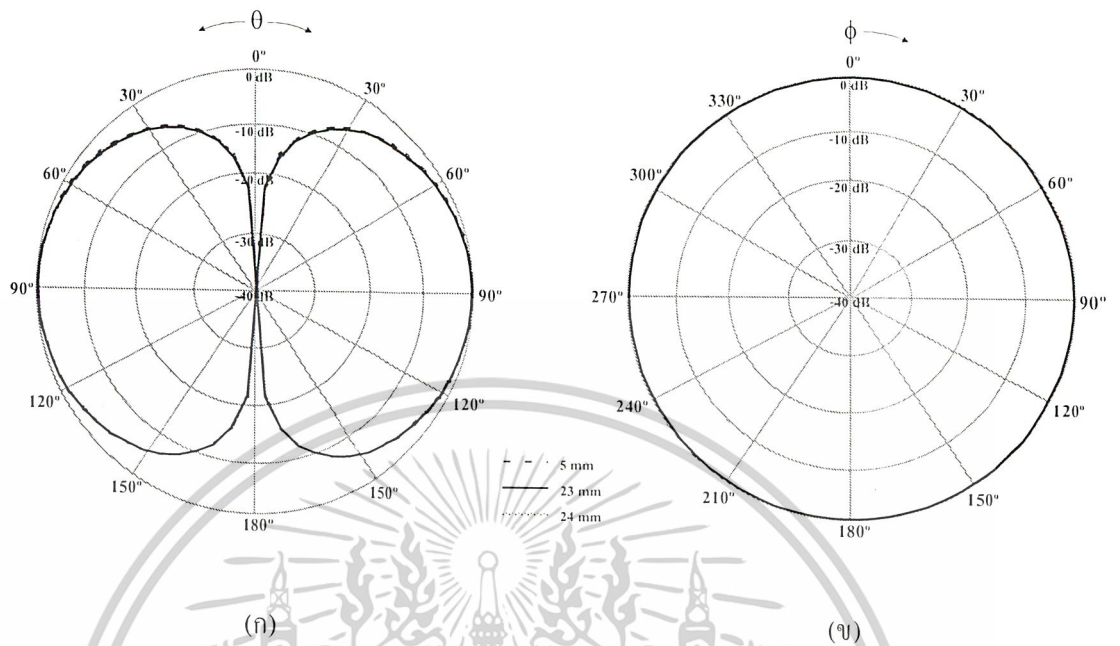
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 400 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 460 MHz



ระยะห่าง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW (degree)
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
5 mm	95°	46.57°	140.33°	93.76°
23 mm	95°	48.49°	140.50°	92.00°
24 mm	95°	43.58°	140.54°	96.96°

(ค)

รูปที่ 3.46 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 460 MHz

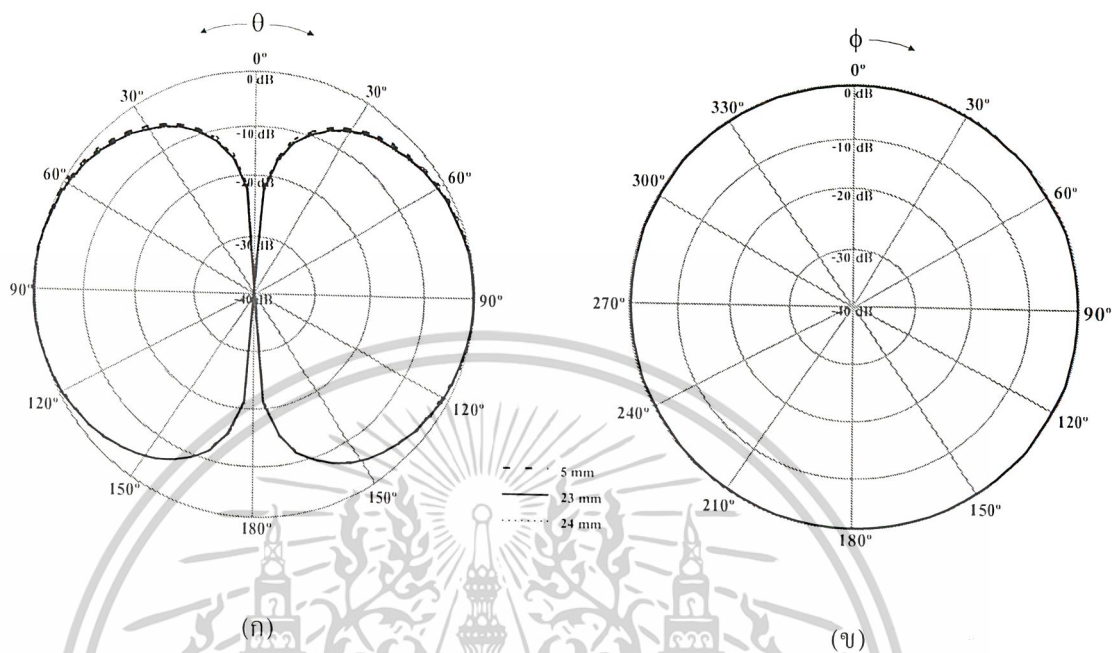
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 460 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะที่ความถี่ 520 MHz



ระยะห่าง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
5 mm	100°	47.95°	142.67°	94.71°
23 mm	100°	51.00°	143.04°	92.04°
24 mm	100°	51.21°	143.02°	91.81°

(ค)

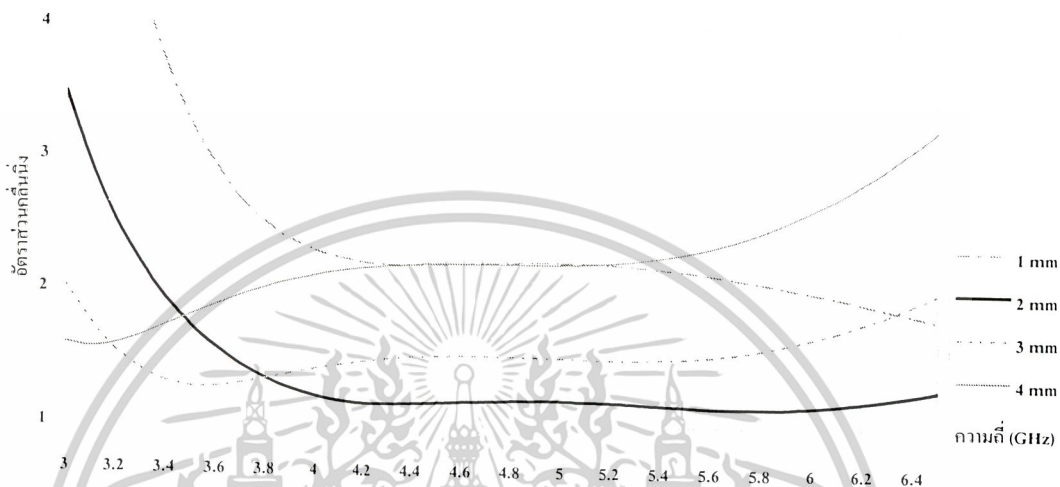
รูปที่ 3.47 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะที่ความถี่ 520 MHz

- (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz
- (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz
- (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 520 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 คุณลักษณะของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะ

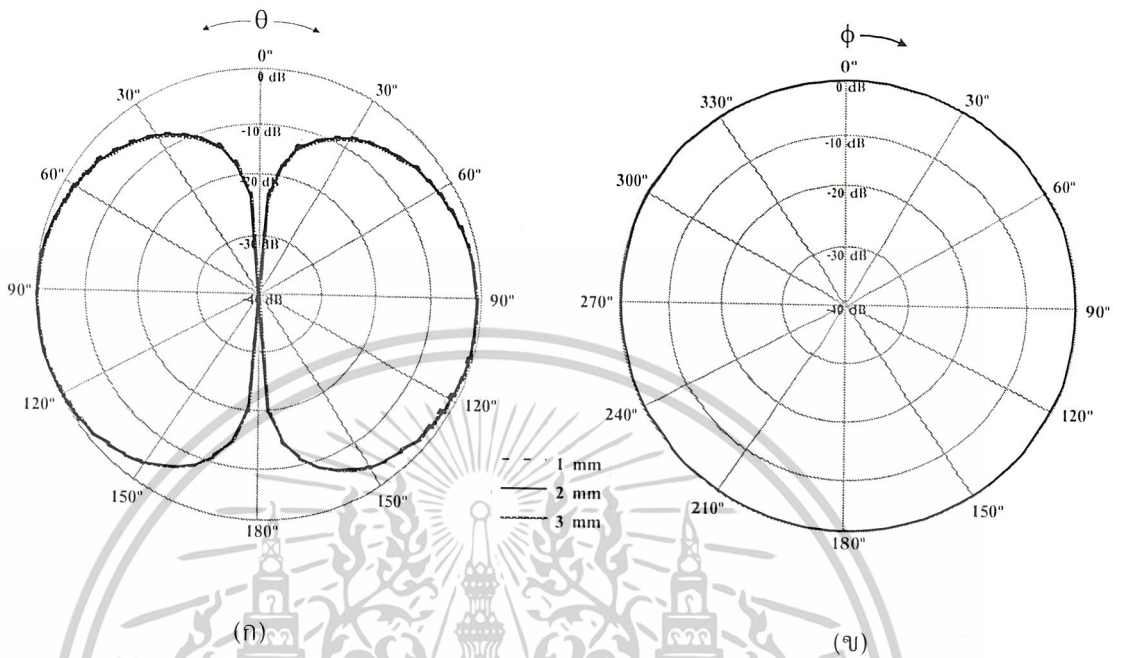
แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะ



รูปที่ 3.48 อัตราส่วนคลื่นนิ่งเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 3.7 GHz



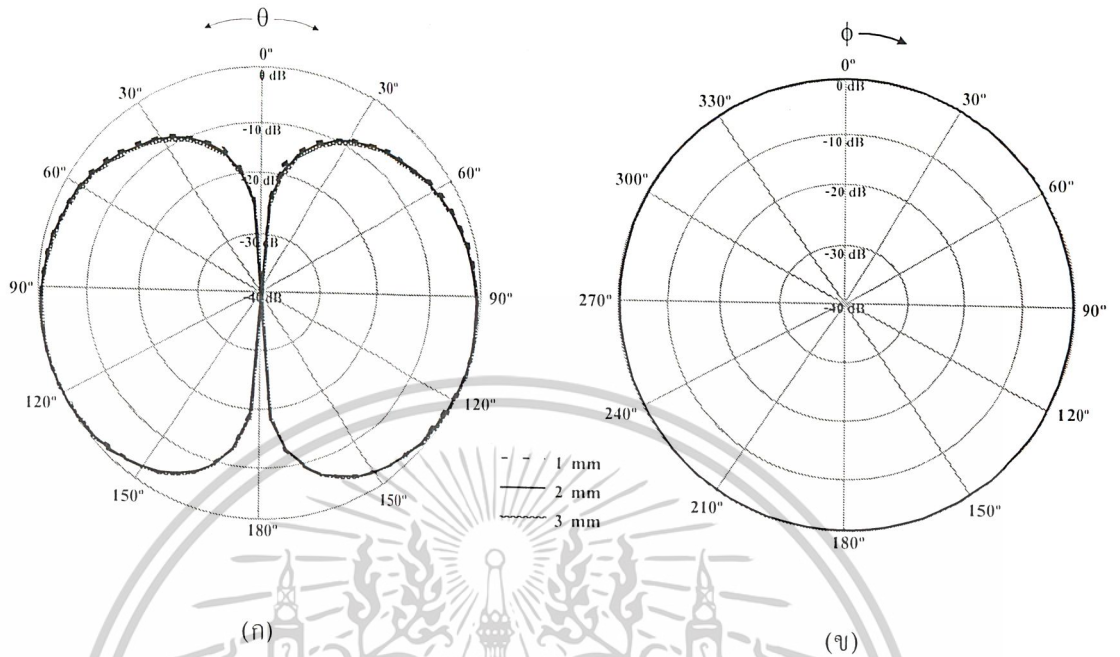
ระยะห่าง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
1 mm	95°	46.16°	140.45°	94.29°
2 mm	95°	47.07°	140.56°	93.49°
3 mm	95°	47.85°	140.62°	92.77°

(ค)

- รูปที่ 3.49 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 3.7 GHz
- (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz
- (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7GHz
- (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 4.75 GHz



ระยะห่าง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
1 mm	105°	49.72°	145.83°	96.11°
2 mm	105°	52.08°	146.08°	94°
3 mm	105°	54.06°	146.22°	92.17°

(ค)

รูปที่ 3.50 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 4.75 GHz

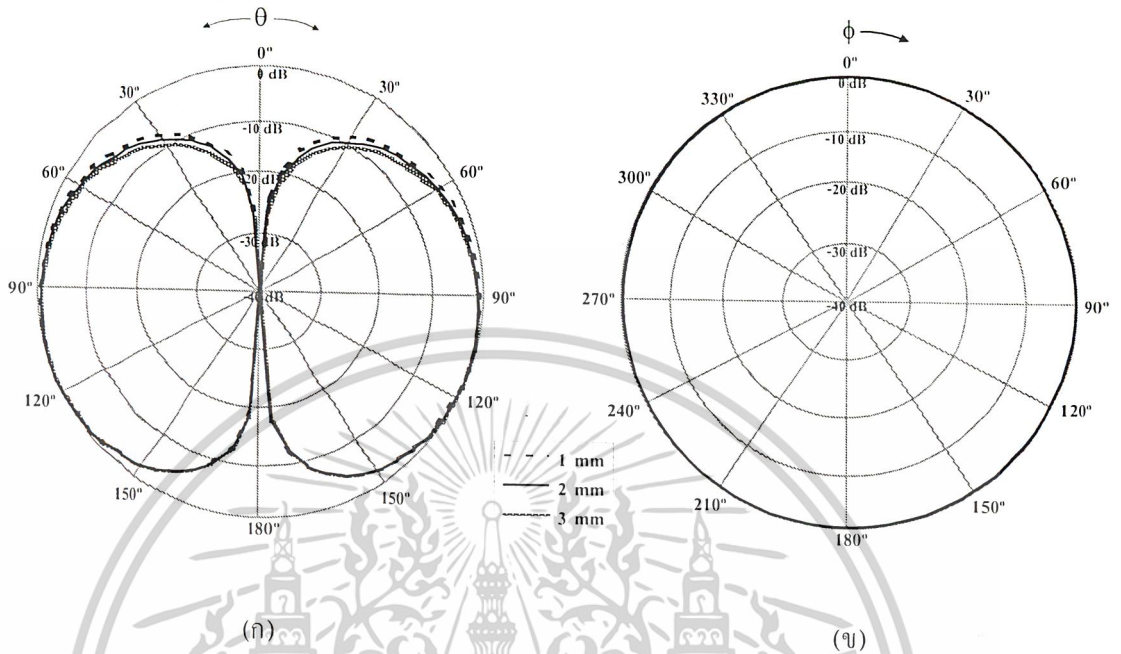
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 5.8 GHz



ระยะห่าง	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
	1 mm	117.5°	58.19°	
2 mm	120°	62.54°	151.723°	89.18°
3 mm	120°	66.14°	151.81°	85.68°

(ค)

รูปที่ 3.51 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยกับงานโลหะที่ความถี่ 5.8 GHz

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ที่ความถี่ 5.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการวิเคราะห์จะพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะเปลี่ยนไปนั้นจะมีผลทำให้ อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศนั้นเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

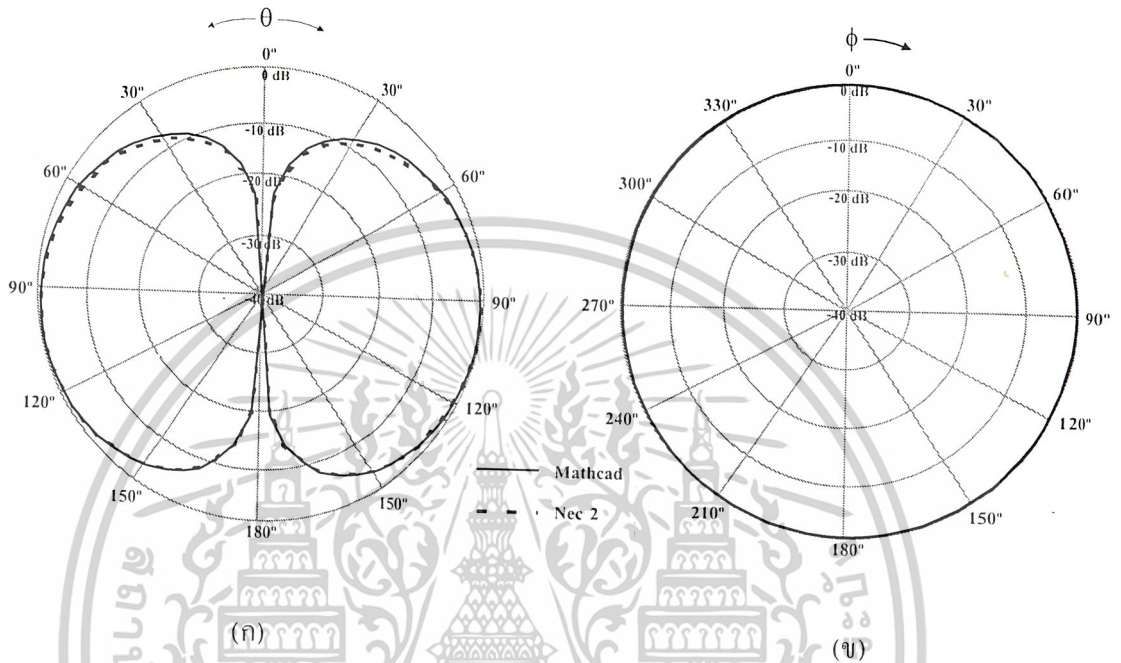
3.8 คุณลักษณะของสายอากาศจากโครงสร้างขั้นสุดท้ายที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า เทียบกับ MATHCAD

คุณลักษณะของสายอากาศแบบดิสโคนที่ได้จากโครงสร้างขั้นสุดท้ายโดยวิเคราะห์จากโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนที่จะนำโครงสร้างเหล่านี้ไปสร้างสายอากาศจริงจะเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ากับโปรแกรม MATHCAD เพื่อเป็นการทดสอบในขั้นสุดท้ายว่าคุณลักษณะของสายอากาศที่สร้างขึ้นจริงนั้นจะมีคุณลักษณะที่เหมาะสมตามความต้องการ โดยที่จะเน้นไปที่คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นและมุมที่อัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง และเมื่อพิจารณาผลของการเปรียบเทียบก็จะพบว่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากโปรแกรมทั้งสองนั้นเกือบเหมือนกันทุกประการจะมีความแตกต่างอยู่บ้างเล็กน้อย ทั้งนี้ก็เพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดลองสายอากาศที่ได้สร้างขึ้นจริงนั้นจะมีคุณลักษณะตรงตามที่วิเคราะห์ไว้มากที่สุด



3.8.1 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ของสายอากาศใน ช่วงความถี่ UHF

ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 400 MHz



ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
Nec 2	95°	46.94°	138.38°	91.43°
Mathcad	90°	42.3°	140.15°	97.85°

(ค)

รูปที่ 3.52 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 400 MHz

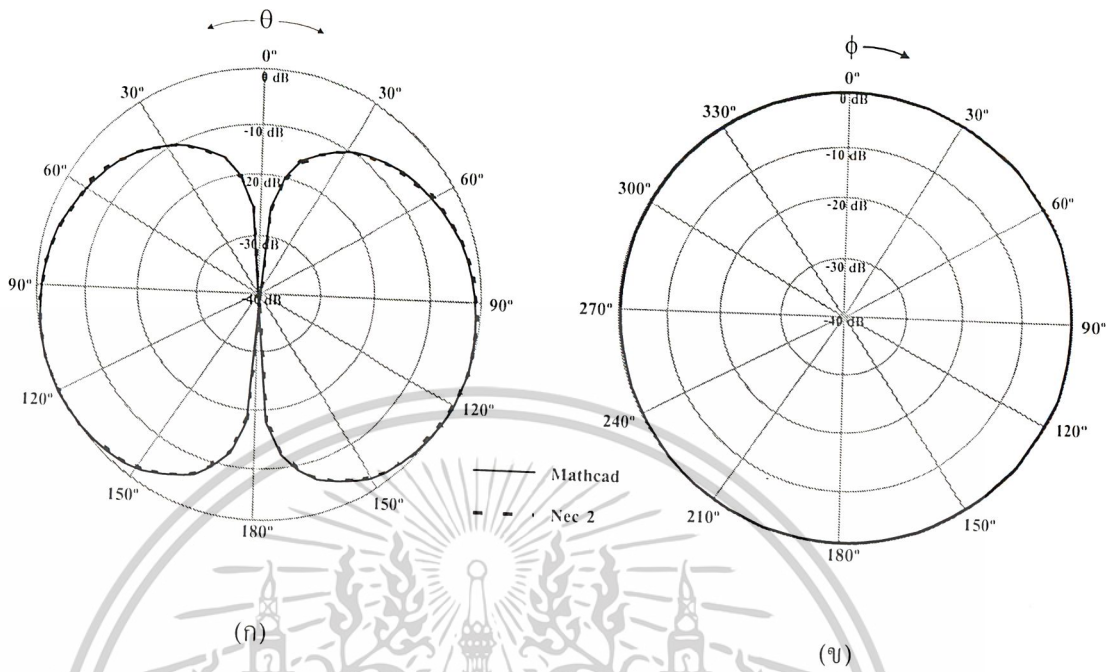
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กึ่งกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 400 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 460 MHz



ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
460 MHz				
Nec 2	95°	51.02°	137.33°	86.32°
Mathcad	95°	48.49°	140.5°	92°

รูปที่ 3.53 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 460 MHz

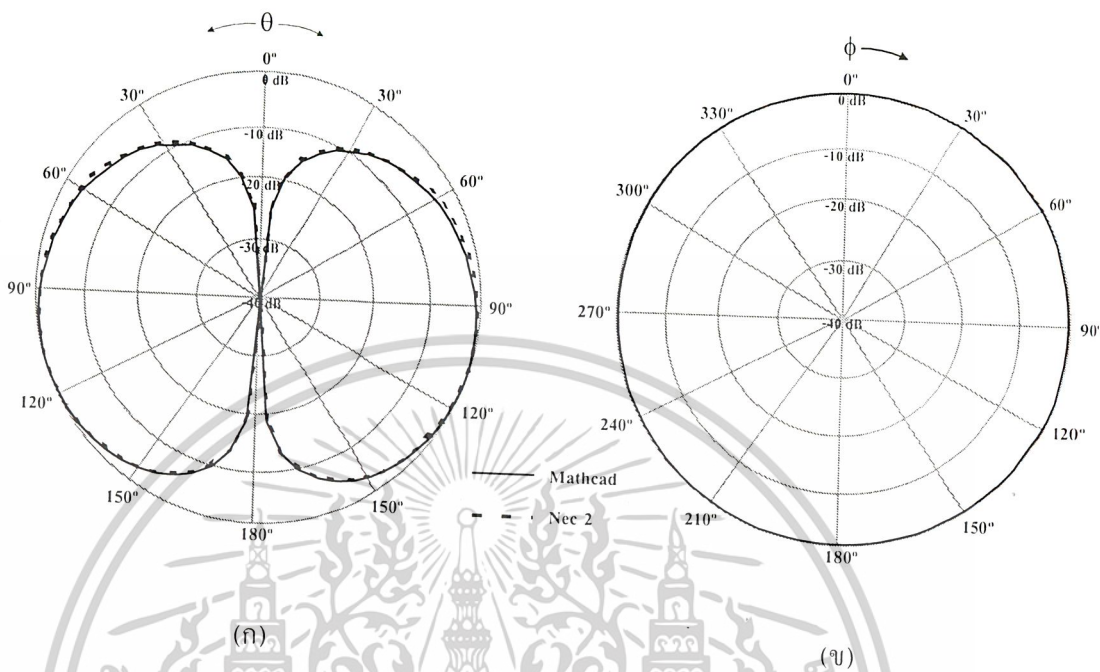
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 460 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 520 MHz



ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
520 MHz				
Nec 2	100°	51°	143.04°	92.04°
Mathcad	105°	54.77°	144.342°	89.57°

(ค)

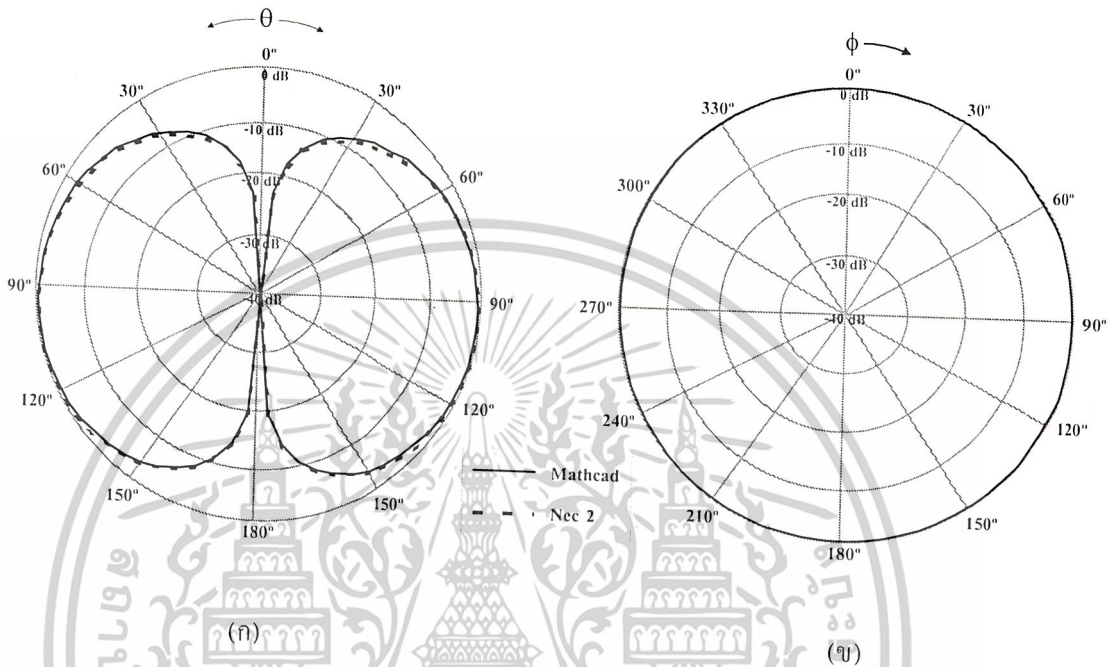
รูปที่ 3.54 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 520 MHz

- (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz
- (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz
- (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 520 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ของสายอากาศใน ช่วงความถี่ C-BAND

ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 3.7 GHz



ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
Nec 2	95°	47.07°	140.56°	93.49°
Mathcad	92.5°	43.43°	139.93°	96.5°

(ค)

รูปที่ 3.55 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 3.7 GHz

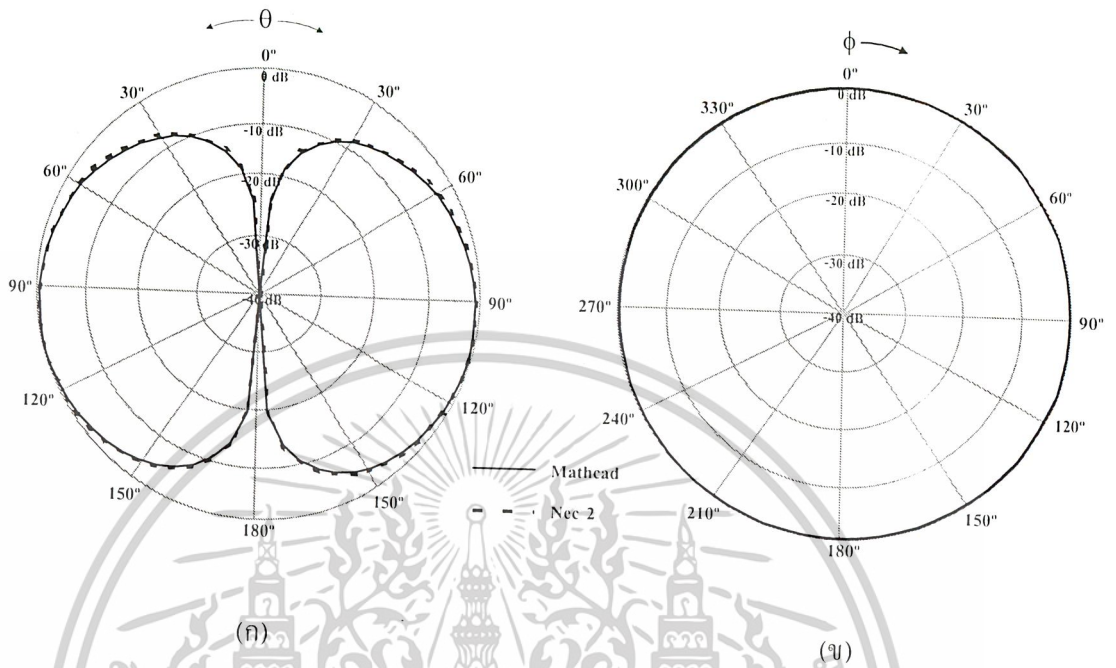
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลวิเคราะห์ห้ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 4.75 GHz



ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
4.75 GHz				
Nec 2	105°	52.081°	146.08°	94°
Mathcad	105°	55.6°	144.59°	88.99°

(ค)

รูปที่ 3.56 ผลวิเคราะห์ห้ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 4.75 GHz

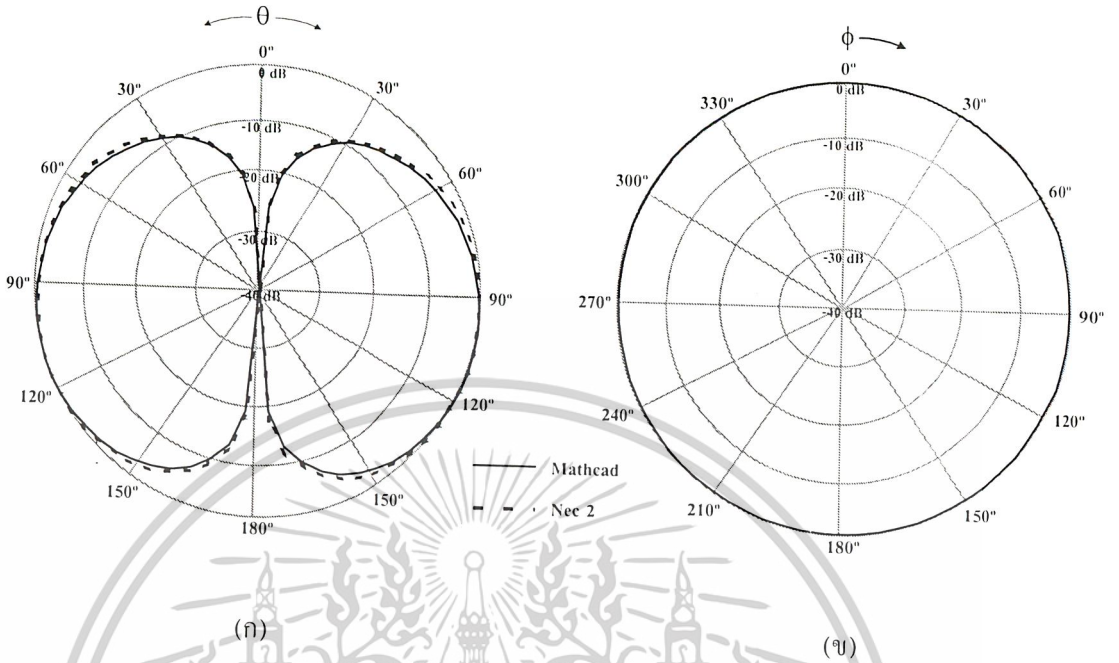
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 5.8 GHz



ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
5.8 GHz				
Nec 2	120°	62.54°	151.72°	89.18°
Mathcad	112.5°	67.21°	148.42°	81.21°

(ค)

รูปที่ 3.57 ผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับ MATHCAD ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 สรุปผลการวิเคราะห์

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าและโปรแกรม MATHCAD จึงทำให้ได้โครงสร้างต่างๆของสายอากาศโดยสายอากาศในช่วงความถี่ UHF และสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND นั้นจะมีคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนโครงสร้างต่างๆในลักษณะที่ สอดคล้องกันในส่วนของการวิเคราะห์ในขั้นสุดท้ายสรุปได้เป็นดังนี้

$$\text{มุมของกรวยด้านบน } (\theta_a) = 90^\circ$$

$$\text{มุมของกรวยที่อยู่ด้านล่าง } (\theta_b) = 30^\circ$$

$$\text{เส้นผ่าศูนย์กลางของจาน โลหะด้านบน } (D) = \lambda/6$$

$$\text{ความสูงประสิทธิภาพ } (h) = \lambda/5$$

$$\text{ระยะห่างระหว่างกรวยกับจาน โลหะกลมด้านบน } (Gap) = 0.02\lambda$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสร้างและผลการทดสอบ

4.1 การสร้างสายอากาศแบบดิสโคน

เมื่ออาศัยผลการวิเคราะห์โครงสร้างต่างๆ ของสายอากาศทำให้ได้โครงสร้างของสายอากาศที่ทำให้คุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุด โครงสร้างดังกล่าวคือ

ความสูงประสิทธิภาพ (h)

มุมของกรวยด้านบน (θ_a)

มุมของกรวยที่อยู่ด้านล่าง (θ_b)

เส้นผ่าศูนย์กลางของจานโลหะด้านบน (D)

ระยะห่างระหว่างกรวยกับจานโลหะกลมด้านบน (Gap)

การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศแบบดิสโคนในทางปฏิบัติ จะต้องออกแบบที่ความถี่ด้านต่ำของช่วงความถี่ที่นำไปใช้งาน และจากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีและการทดสอบต้องออกแบบโครงสร้างที่ความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ด้านต่ำที่ใช้งานถึง 25 % จึงจะทำให้ได้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพและเนื่องจากโครงการนี้วิเคราะห์สายอากาศที่นำไปใช้กับระบบอากาศยานไว้คนขับในสองช่วงความถี่ จึงได้โครงสร้างของสายอากาศทั้งสองช่วงความถี่ที่ได้จากการคำนวณและการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1.1 การสร้างสายอากาศในช่วงความถี่ BHF

ขนาดต่างๆ ของสายอากาศเป็นดังนี้

$$h = 0.2\lambda = 0.2 \text{ เมตร}$$

$$\theta_a = 90^\circ \quad \theta_b = 30^\circ$$

ความยาวของแท่งโลหะที่แทนกรวย L หาได้จากสมการ

$$h = L \cos \theta_b$$

ดังนั้น

$$L = 0.23\lambda = 0.23 \text{ เมตร}$$

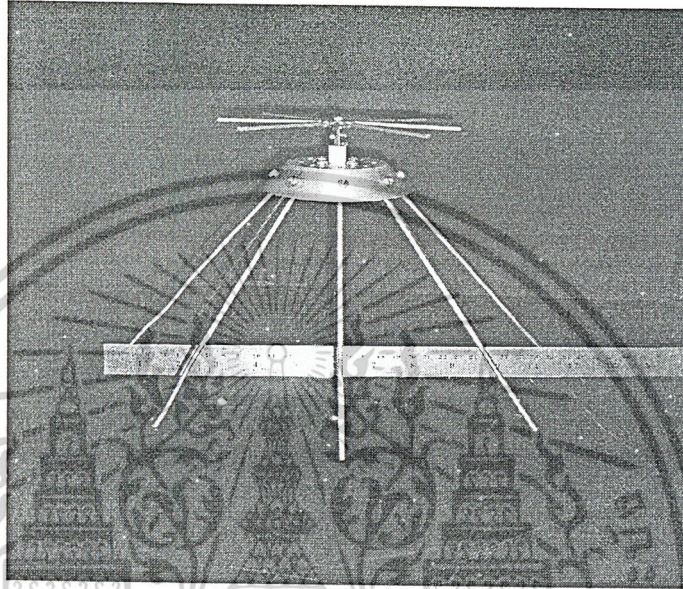
$$D = 0.14\lambda = 0.14 \text{ เมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

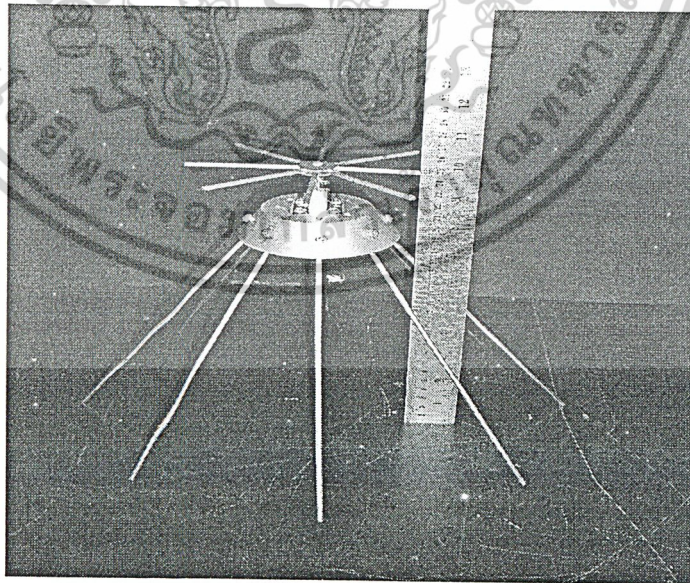
และ *Gap* จากผลทางทฤษฎีและการทดสอบ

$$Gap = 0.033\lambda = 0.033 \text{ เมตร}$$

นำค่าโครงสร้างต่างๆที่ได้นี้มาสร้างสายอากาศในช่วงความถี่ UHF ดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 เส้นผ่าศูนย์กลางกรวยของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF



รูปที่ 4.2 ความสูงของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การสร้างสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

ขนาดต่างๆ ของสายอากาศเป็นดังนี้

$$h = 0.2\lambda = 0.022 \text{ เมตร}$$

$$\theta_a = 90^\circ \quad \theta_b = 30^\circ$$

ความยาวของกรวย L หาได้จากสมการ

$$h = L \cos \theta_b$$

ดังนั้น

$$L = 0.23\lambda = 0.025 \text{ เมตร}$$

$$D = 0.14\lambda = 0.02 \text{ เมตร}$$

และ Gap จากผลทางทฤษฎีและการทดสอบ

$$Gap = 0.022\lambda = 0.002 \text{ เมตร}$$

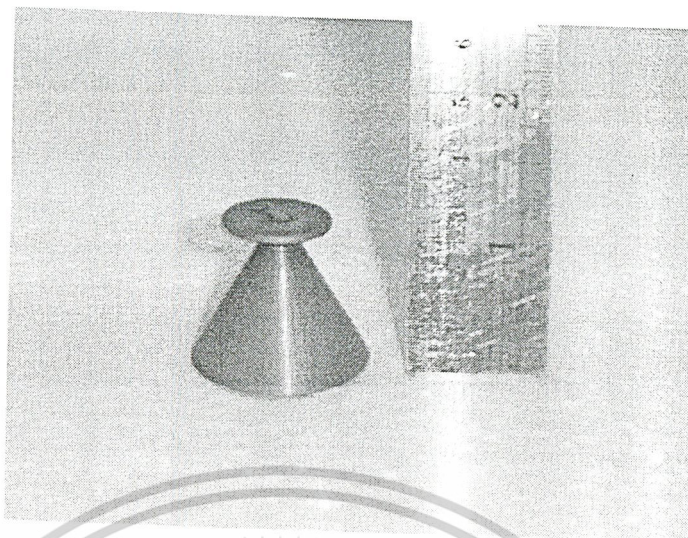
นำค่าโครงสร้างต่างๆ ที่ได้มาสร้างสายอากาศแบบคอสโคนดังรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 เส้นผ่าศูนย์กลางกลางกรวยของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสูงของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

4.2 การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR)

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

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

โดยที่

f_H คือค่าความถี่สูงสุดที่สามารถทำงานได้

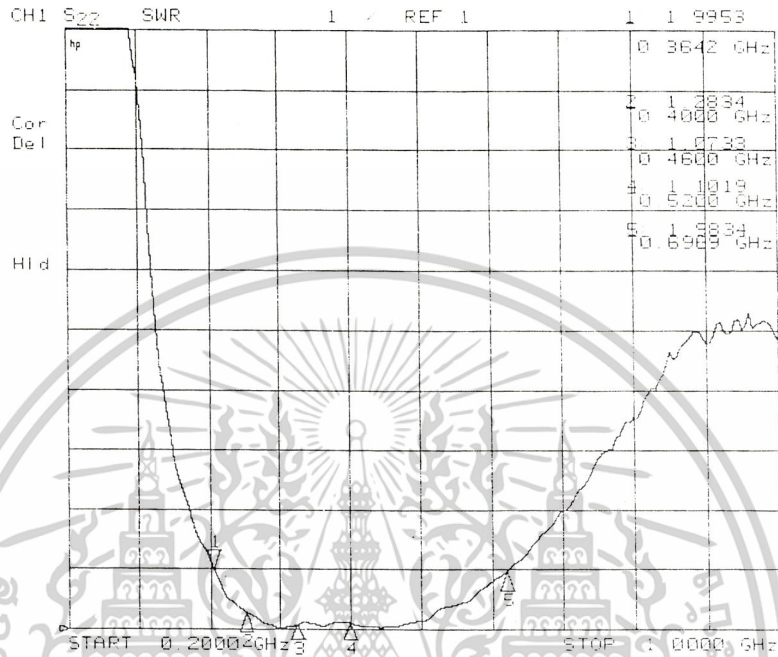
f_L คือค่าความถี่ต่ำสุดที่สามารถทำงานได้

f_C คือค่าความถี่กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF

สายอากาศในช่วงความถี่ UHF จะพิจารณาที่ช่วงความถี่ 400 MHz – 520 MHz ได้เป็นอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแสดงดังรูป 4.5



รูปที่ 4.5 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF

สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

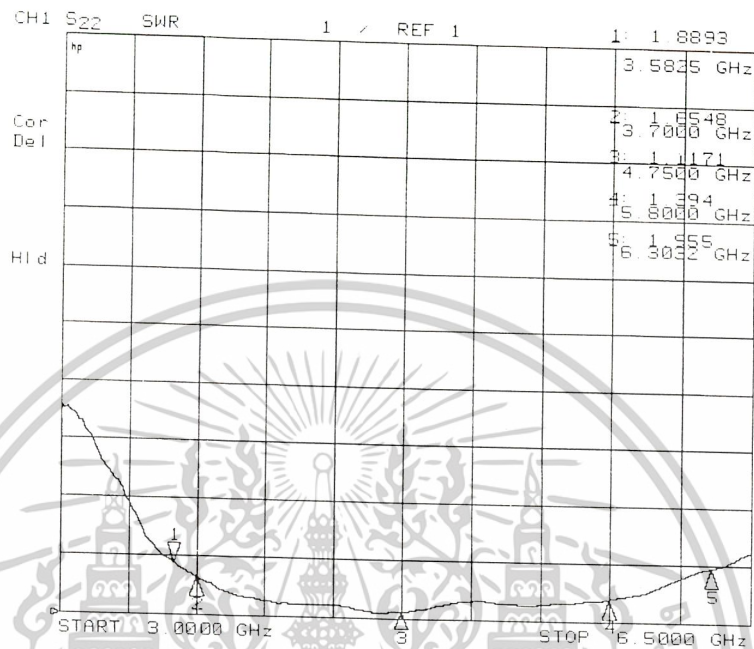
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF

ความถี่(MHz)	อัตราส่วนคลื่นนิ่ง
360	1.99 : 1
400	1.28 : 1
460	1.07 : 1
520	1.10 : 1
690	1.98 : 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

สายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND จะพิจารณาที่ช่วงความถี่ 3.7 GHz – 5.8 GHz ได้เป็นอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

ความถี่(GHz)	อัตราส่วนคลื่นนิ่ง
3.50	1.88 : 1
3.70	1.65 : 1
4.75	1.11 : 1
5.80	1.39 : 1
6.30	1.95 : 1

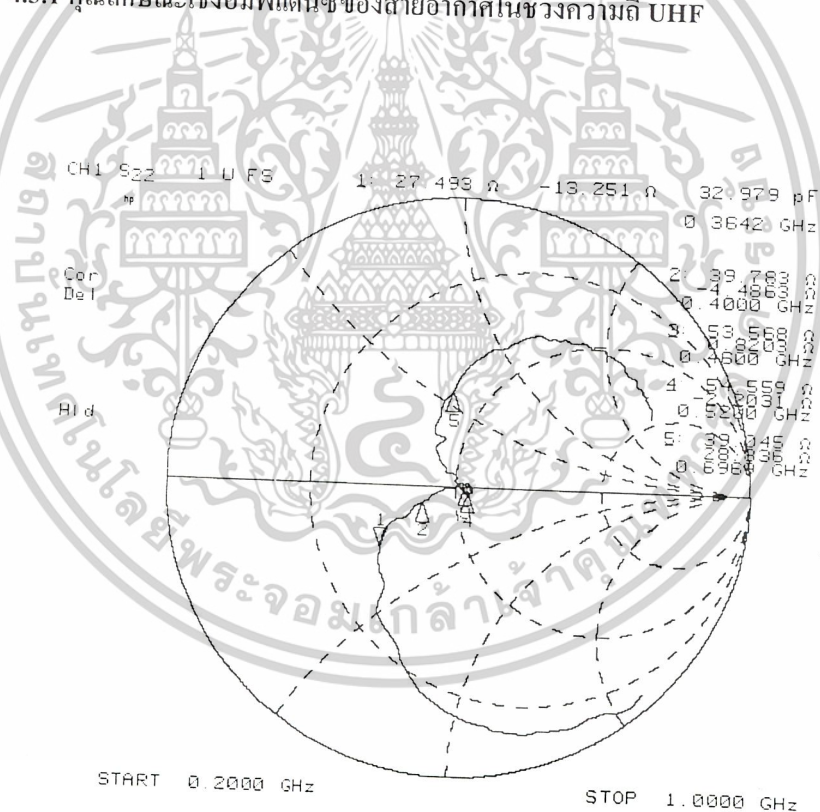
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศในช่วงกว้างแถบความถี่ที่นำไปใช้งานพบว่าสายอากาศแบบดิสโคนนี้มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่สามารถยอมรับได้คือ SWR น้อยกว่า 2:1 ในช่วงความถี่ UHF ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 360 MHz – 690 MHz คิดเป็น 62.86 % และในช่วงความถี่ C-BAND ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 3.50 GHz – 6.30 GHz คิดเป็น 57.14 % จะเห็นได้ว่าสายอากาศมีประสิทธิภาพมากพอที่จะนำไปใช้งานกับระบบอากาศยานไร้คนขับ

4.3 การทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็นคุณลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะใช้ระบบ 50 โอห์ม เมื่อสายอากาศและสายนำสัญญาณมีอิมพีแดนซ์เท่ากันจะทำให้การสะท้อนกลับของสัญญาณต่ำ ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในทั้งสองช่วงความถี่แสดงดังหัวข้อถัดไป

4.3.1 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF



รูปที่ 4.7 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF

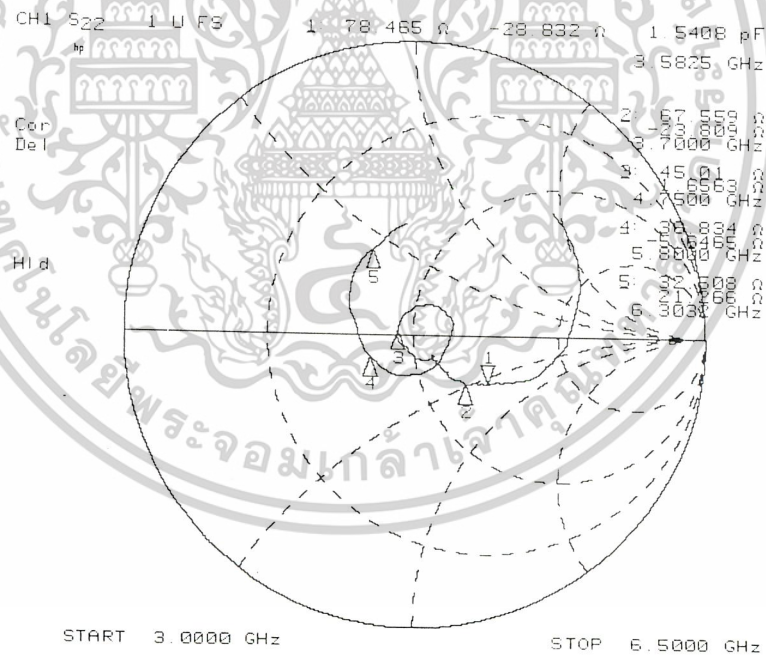
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ใน ช่วงความถี่ UHF

ความถี่ (MHz)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
360	27.493 - j13.251
400	39.783 - j4.4863
460	53.568 + j0.8203
520	54.559 - j2.2031
690	39.045 + j28.836

4.3.2 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND



รูปที่ 4.8 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

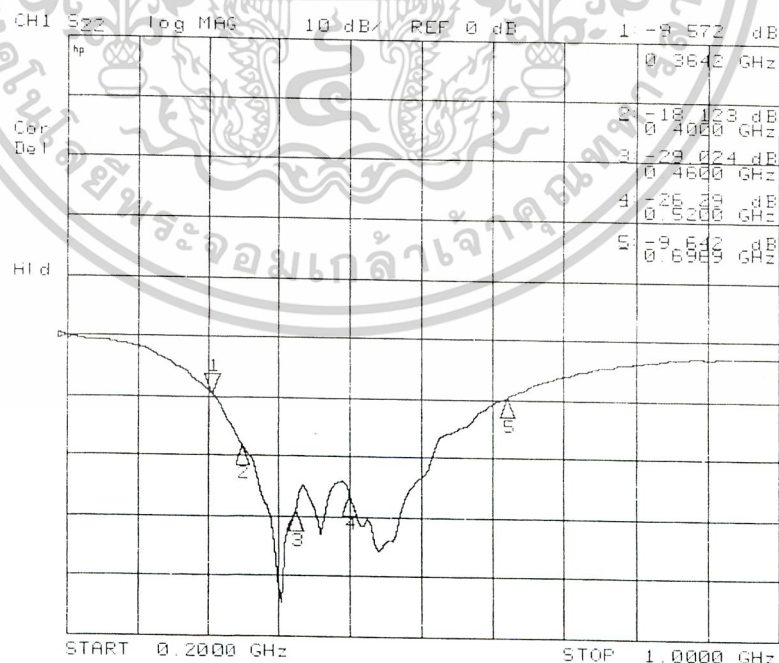
ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ C-BAND

ความถี่ (GHz)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
3.58	78.465 - j28.832
3.70	67.559 - j23.809
4.45	45.010 + j1.656
5.80	38.834 - j5.646
6.30	32.508 + j21.266

4.4 การทดสอบอัตราการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss Ratio)

กำลังงานที่คลื่นแพร่กระจายออกไปนั้นจะมีค่าอัตราสูญเสียย้อนกลับคิดเป็น dB ในทางปฏิบัติจะต้องการอัตราการสูญเสียย้อนกลับมากๆ หรือมีสัญญาณย้อนกลับต่ำนั่นเอง โดยที่จะพิจารณาในช่วงกว้างแถบความถี่ที่สายอากาศสามารถนำไปใช้งานได้

4.4.1 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF



รูปที่ 4.9 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF

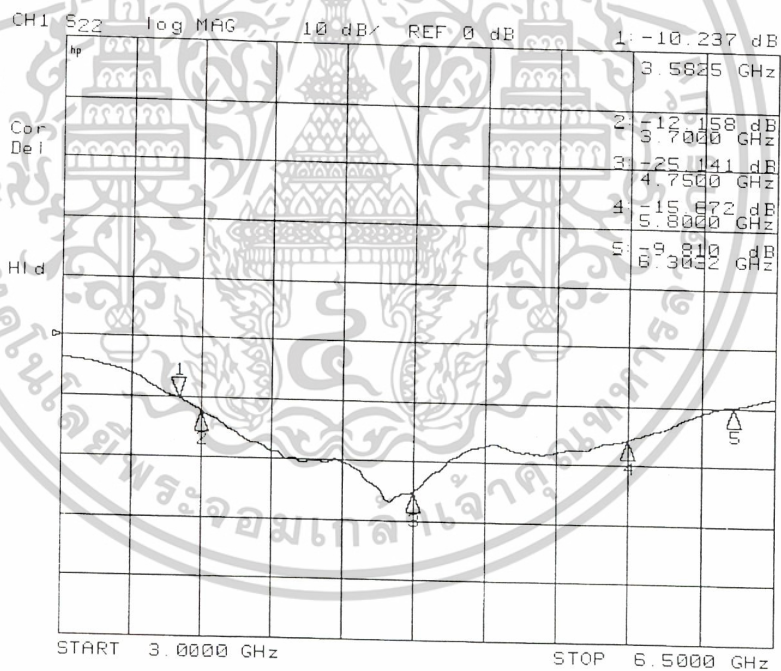
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF

ความถี่ (MHz)	ค่าอัตราการสูญเสียย้อนกลับ (dB)
360	-9.572
400	-18.123
460	-29.024
520	-26.29
690	-9.642

4.4.2 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND



รูปที่ 4.10 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 อัตราการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

ความถี่ (GHz)	ค่าอัตราการสูญเสียย้อนกลับ (dB)
3.50	-10.237
3.70	-12.158
4.75	-25.141
5.80	-15.672
6.30	-9.810

4.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นคุณลักษณะของสายอากาศที่จะใช้พิจารณาว่าสายอากาศนั้นมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานหรือไม่ คือแบบรูปของสายอากาศจะต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ระบบอากาศยานไร้คนขับจะติดต่อกับสถานีภาคพื้นดินถ้าหากว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีลักษณะที่ไม่เหมาะสมอาจจะทำให้การส่งข้อมูลจากระบบอากาศยานไร้คนขับมายังสถานีภาคพื้นดินรวมถึงการควบคุมระบบอากาศยานจากสถานีภาคพื้นดินนั้นมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะใช้เครื่องมือในการทดสอบคือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย สายอากาศในช่วงความถี่ UHF ใช้สายอากาศแบบไดโพลเป็นสายอากาศส่งและสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND ใช้สายอากาศแบบท่อนำคลื่นเป็นสายอากาศส่งโดยการจัดดวงอุปกรณ์ต่างๆเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

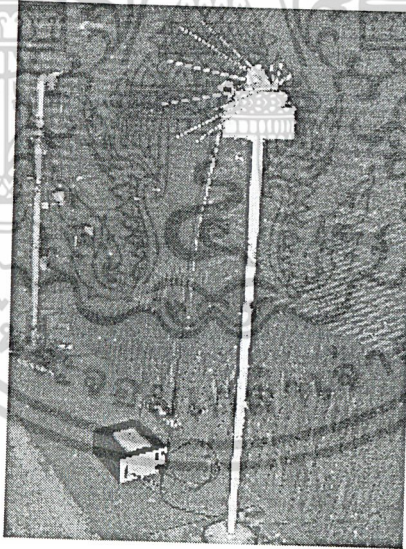
ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นต้องคำนวณระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ
ด้วยโดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2

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

เมื่อ D_1 และ D_2 คือมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศส่งและรับตามลำดับ
 λ คือความยาวคลื่นที่ความถี่สูงสุดที่ใช้งาน

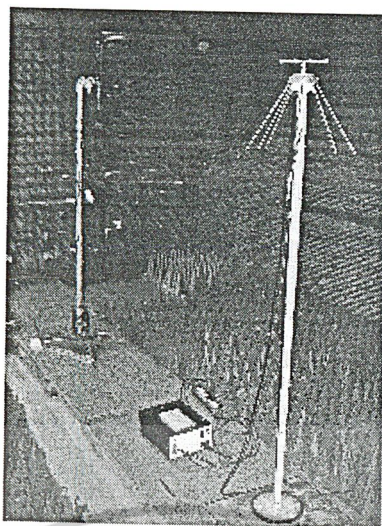
4.5.1 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะทำการทดสอบที่ทั้งสามความถี่ใน
ช่วงกว้างแถบความถี่ที่นำไปใช้งานที่ความถี่ดังนี้ 400 MHz 460 MHz และ 520 MHz โดยจะทำการ
ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบมุมยกและในระนาบมุมกวาด ในรูปที่ 4.12 และ 4.13
แสดงการวัดแบบรูปการแพร่กระจายในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาดของสายอากาศในช่วงความถี่
UHF ตามลำดับ

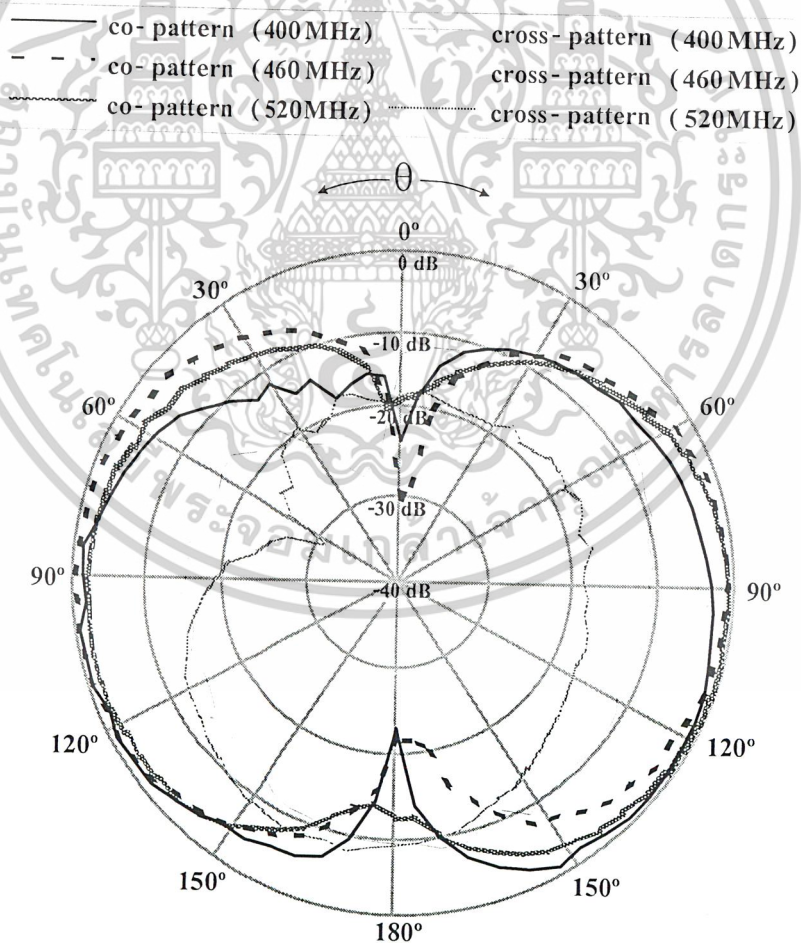


รูปที่ 4.12 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



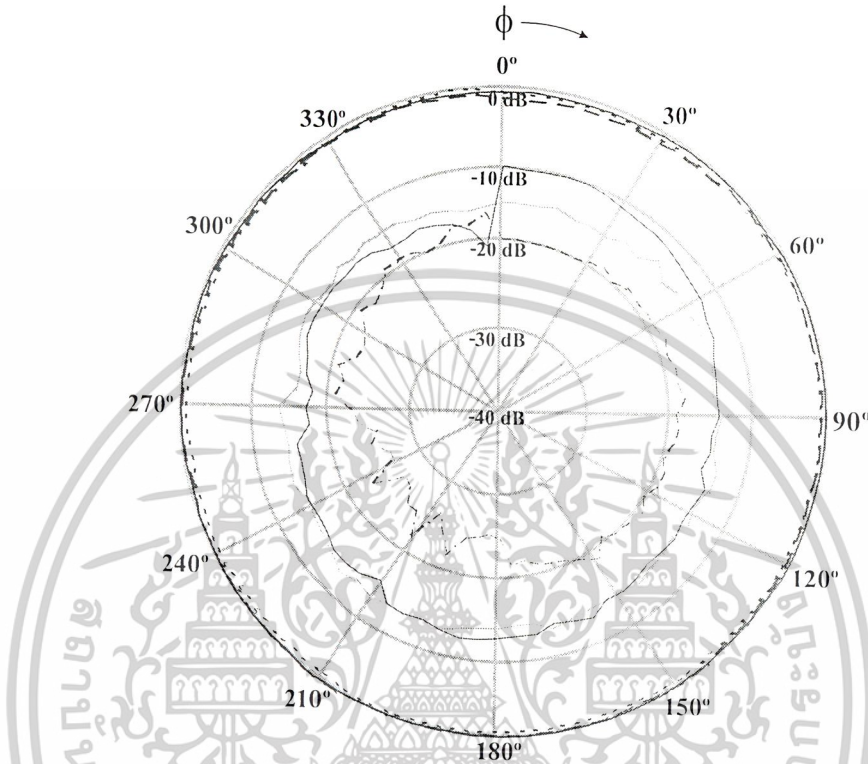
รูปที่ 4.13 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— co-pattern (400 MHz) — cross-pattern (400 MHz)
 - - co-pattern (460 MHz) - - cross-pattern (460 MHz)
 --- co-pattern (520 MHz) --- cross-pattern (520 MHz)



รูปที่ 4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด

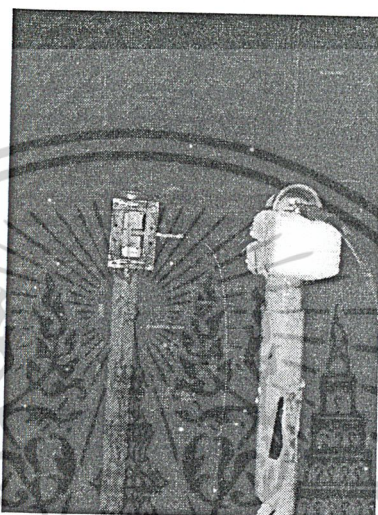
ตารางที่ 4.7 ความกว้างลำคลื่นที่ค่าพลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF

ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายค่าพลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
400 MHz	135°	82.58°	166.69°	84.11°
460 MHz	100°	141.00°	80.04°	60.95°
520 MHz	115°	60.82°	151.44°	90.62°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะทำการทดสอบที่ทั้งสามความถี่ในช่วงกว้างแถบความถี่ที่นำไปใช้งานที่ความถี่ดังนี้ 3.7 GHz 4.75 GHz และ 5.8 GHz โดยจะทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบมุมยกและในระนาบมุมกวาด ในรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงการวัดแบบรูปการแพร่กระจายในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาดของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก

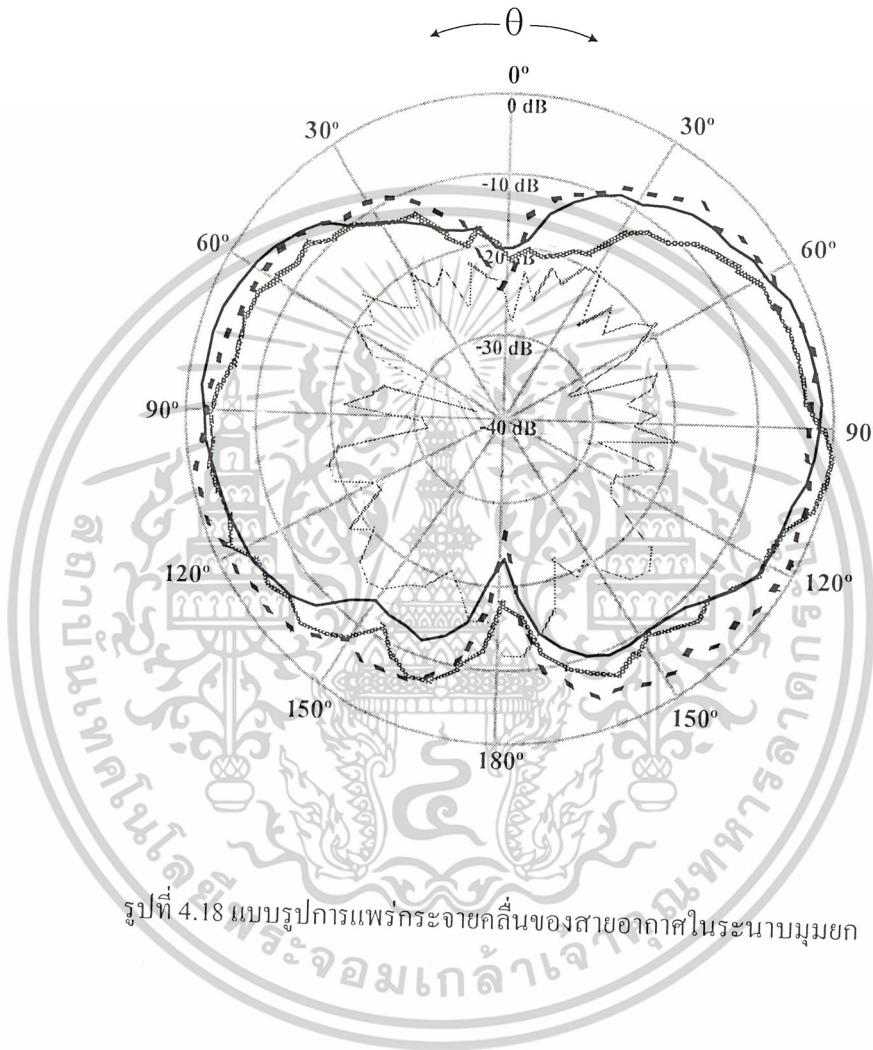


รูปที่ 4.17 แสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

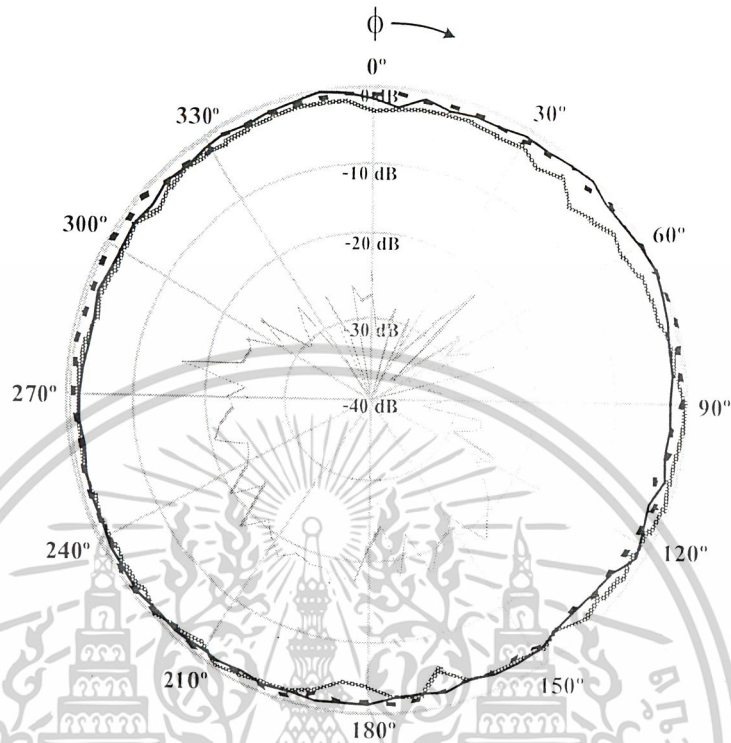
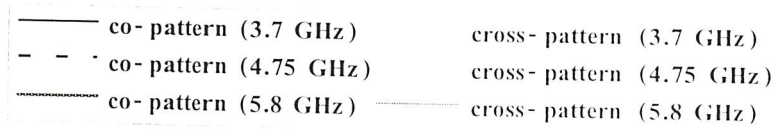
ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 และ 4.19

- co- pattern (3.7 GHz)
- - - co- pattern (4.75 GHz)
- ~~~~~ co- pattern (5.8 GHz)
- cross- pattern (3.7 GHz)
- cross- pattern (4.75 GHz)
- cross- pattern (5.8 GHz)



รูปที่ 4.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด

ตารางที่ 4.8 ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ			HPBW
	มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
3.7 GHz	90	50.14	122.72	72.58
4.75 GHz	115	58.21	137.73	79.53
5.8 GHz	90	52.05	128	75.95

จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่แถบกว้างโดยที่พิจารณาช่วงความถี่สามความถี่นั้นจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทั้งสามความถี่แตกต่างกันไม่มากนัก แสดงให้เห็นว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบคิสิกอนนั้นสามารถที่จะนำไปใช้ได้ทั้งช่วงความถี่แถบกว้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

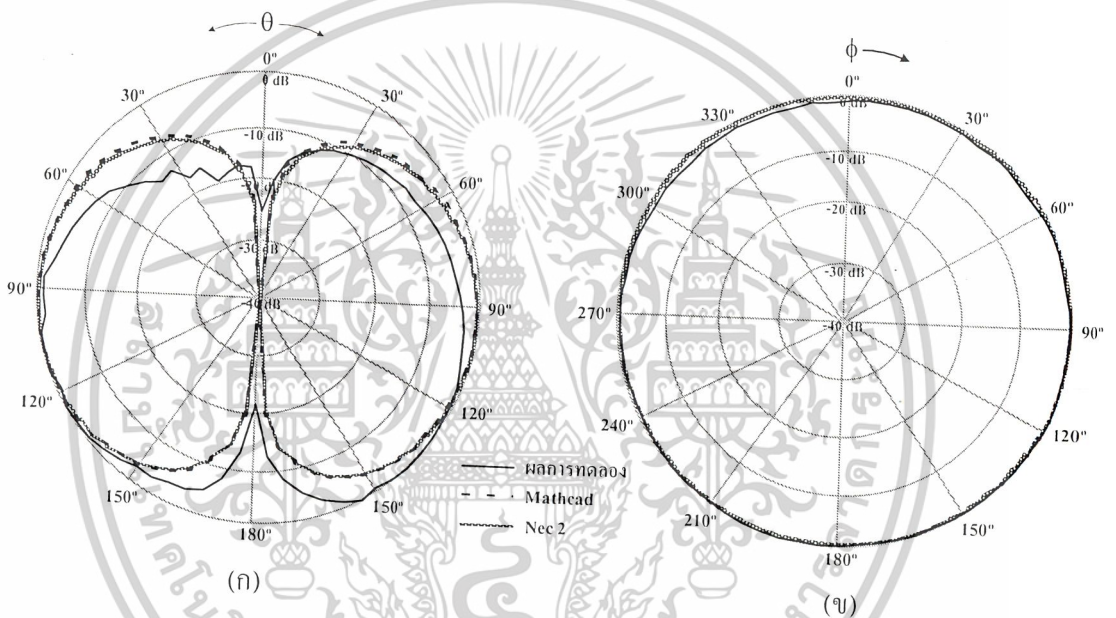
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งด้วยโปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง

นำผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าและโปรแกรม MATHCAD เปรียบเทียบกับผลการทดลองในทั้งสองช่วงความถี่ เพื่อเปรียบเทียบดูว่าประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นไปตามจุดประสงค์ที่จะนำไปใช้หรือไม่ และในการเปรียบเทียบจะชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของผลการวิเคราะห์กับผลการทดลองที่ความถี่ต่างๆ

4.6.1 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งด้วยโปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลองในช่วงความถี่ UHF

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลองที่ความถี่ 400 MHz



ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และมุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
400 MHz				
ผลการทดลอง	115°	77.96°	160.37°	82.41°
Mathcad	90°	42.3°	140.15°	97.85°
Nec 2	95°	46.94°	138.38°	91.43°

(ค)

รูปที่ 4.20 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 400 MHz

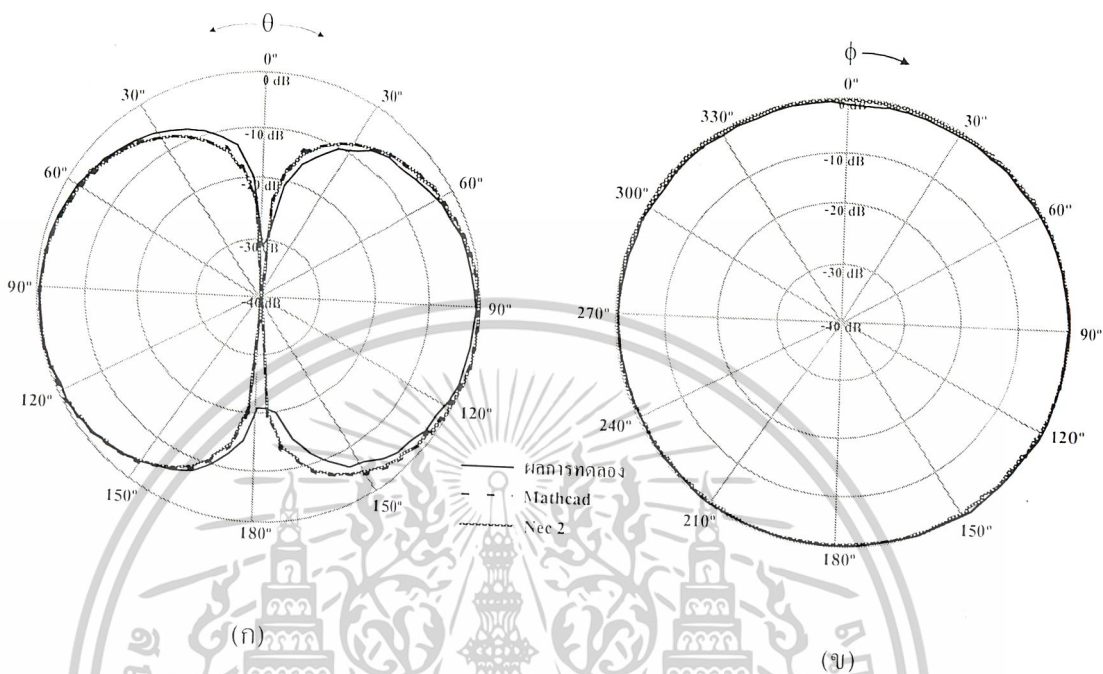
(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 400 MHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 400 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลองที่ความถี่ 460 MHz



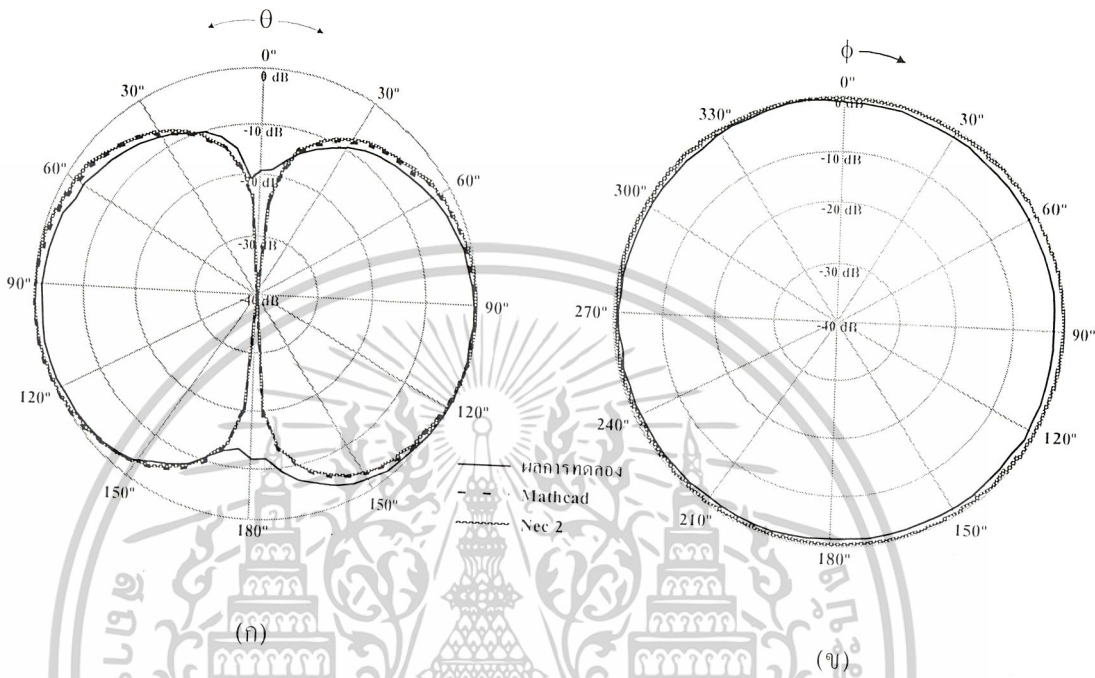
ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และมุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
460 MHz				
ผลการทดลอง	95°	51.02°	137.33°	86.32°
Mathcad	95°	48.49°	140.5°	92°
Nec 2	95°	51.02°	137.33°	86.32°

(ก)

- รูปที่ 4.21 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง
- (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 460 MHz
 - (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 460 MHz
 - (ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 460 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลองที่ความถี่ 520 MHz



ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
520 MHz				
ผลการทดลอง	105°	60.13°	151.87°	91.74°
Mathcad	105°	54.77°	144.342°	89.57°
Nec 2	100°	51°	143.04°	92.04°

(ค)

รูปที่ 4.22 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 520 MHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 520 MHz

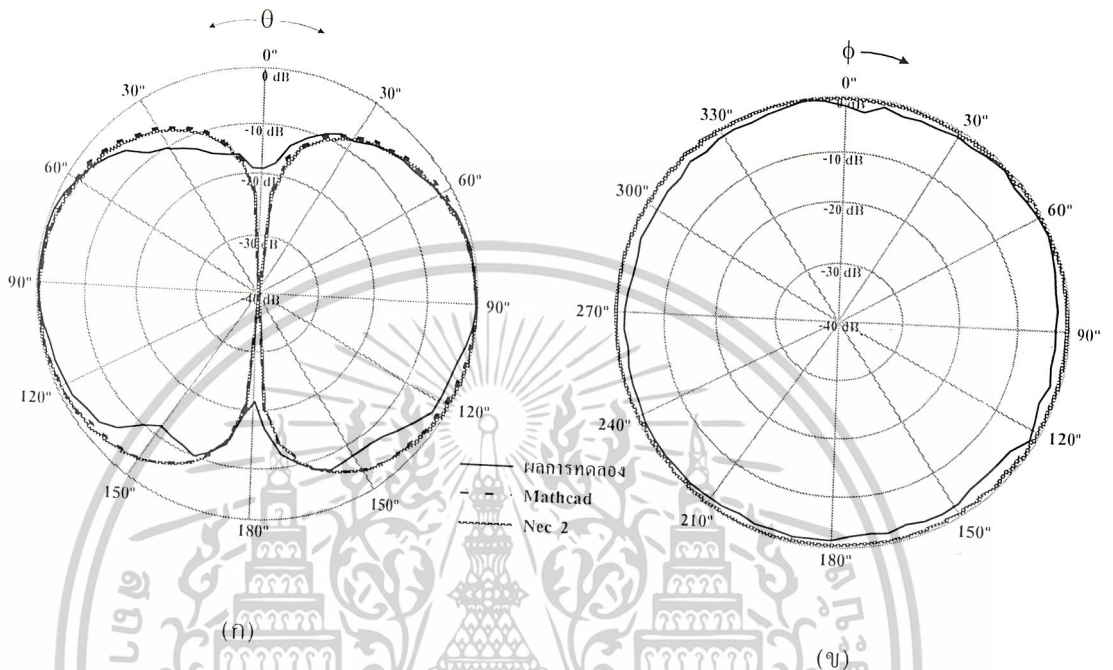
(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 520 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและความกว้างลำคลื่นที่ก้ำกึ่งงานลดลง
 ครั้งหนึ่งด้วยโปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลองในช่วงความถี่ C-BAND

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลองที่
 ความถี่ 3.7 GHz



ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายก้ำกึ่งงานลดลงครั้งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
3.7 GHz				
ผลการทดลอง	90°	50.14°	122.72°	72.58°
Mathcad	92.5°	43.43°	139.93°	96.50°
Nec 2	95°	47.07°	140.56°	93.49°

(ค)

รูปที่ 4.23 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง

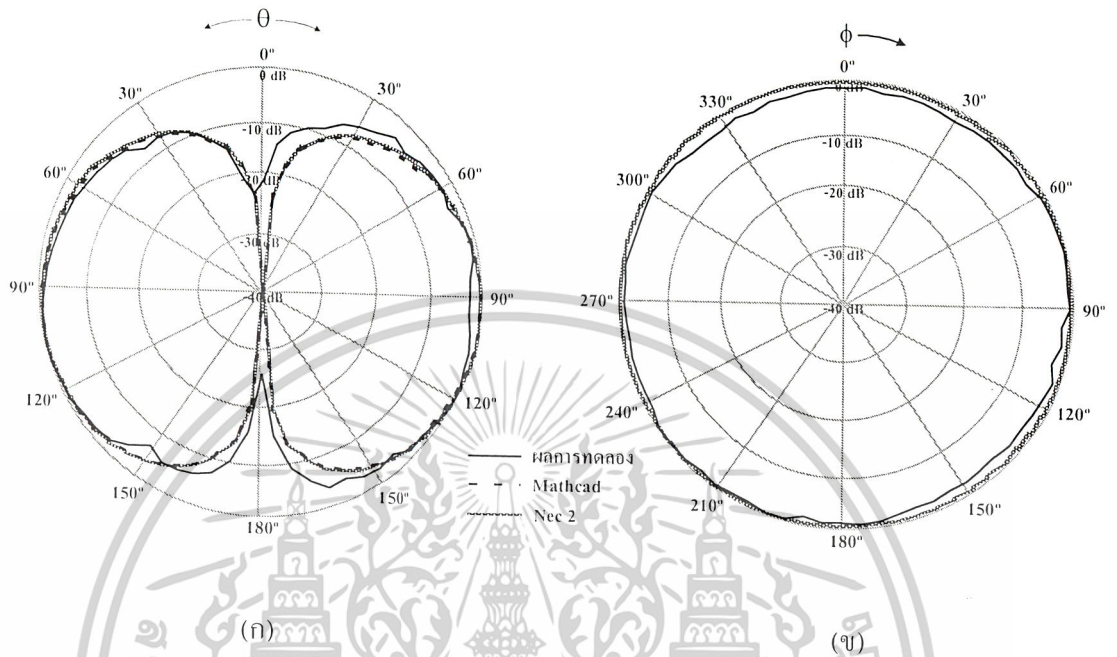
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 3.7 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่ก้ำกึ่งงานลดลงครั้งหนึ่งที่ความถี่ 3.7 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลองที่ความถี่ 4.75 GHz



ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
4.75 GHz				
ผลการทดลอง	115°	58.21°	137.73°	79.53°
Mathcad	105°	55.6°	144.59°	88.99°
Nec 2	105°	52.081°	146.08°	94°

(ค)

รูปที่ 4.24 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง

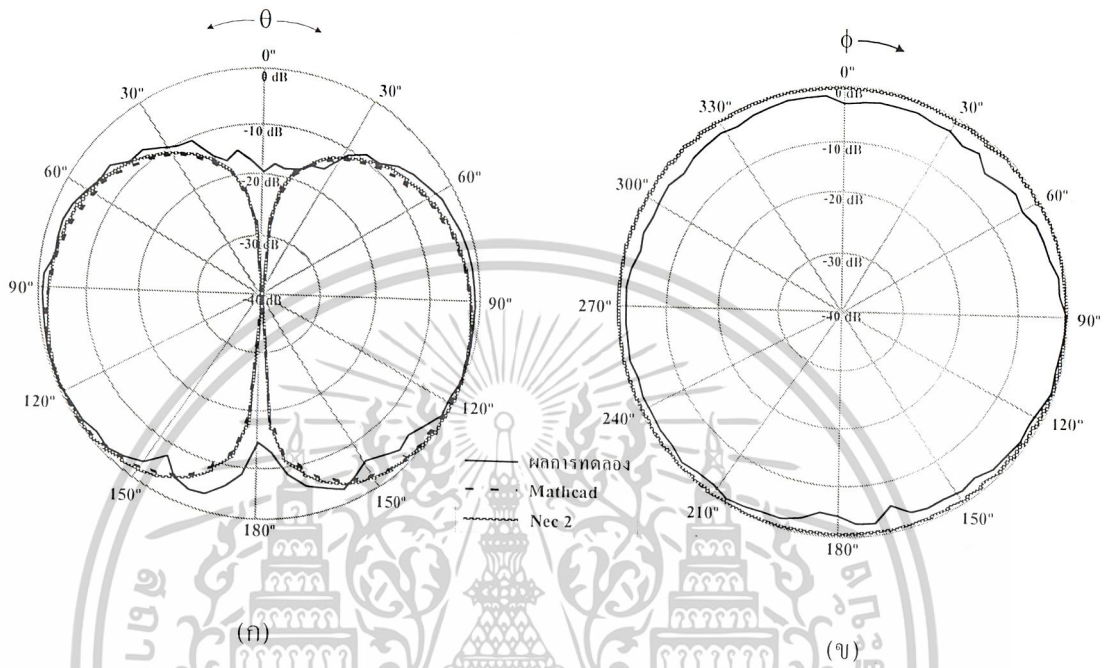
(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 4.75 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 4.75 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลองที่ความถี่ 5.8 GHz



ความถี่	มุมที่มีอัตราขยายสูงสุด (0dB) และ มุมที่มีอัตราขยายกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB)			HPBW
	0dB	-3dB (left)	-3dB (right)	
ผลการทดลอง	90°	52.05°	128°	75.95°
Mathcad	112.5°	67.21°	148.42°	81.21°
Nec 2	120°	62.54°	151.72°	89.18°

(ค)

รูปที่ 4.25 คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อใช้โปรแกรมทดสอบสายอากาศเทียบกับผลการทดลอง

(ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

(ค) ความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ความถี่ 5.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

4.7.1 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ UHF

การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศใช้อุปกรณ์ในการทดสอบดังนี้

- 1) Spectrum Analyzer
- 2) Signal Generator

การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศทำได้โดยใช้เครื่อง Spectrum Analyzer วัดค่ากำลังงานที่รับได้ของสายอากาศด้านรับโดยทางด้านส่งใช้เครื่อง Signal Generator เป็นตัวส่งกำลังงานผ่านสายอากาศทางด้านส่งและสายอากาศที่นำมาทดสอบค่าอัตราขยายอ้างอิงนั้นในโครงงานนี้จะใช้สายอากาศแบบ ยากิ (Yagi) ที่มีความเหมือนกันทุกประการมาทำการวัดค่ากำลังงานที่ส่งออกไปและกำลังงานที่รับได้เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศโดยใช้สมการที่ 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 จะได้เป็น

$$G_t(dB) + G_r(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \quad (4.4)$$

เมื่อ

$$G_t(dB) = \text{อัตราขยายของสายอากาศด้านส่ง (dB)}$$

$$G_r(dB) = \text{อัตราขยายของสายอากาศด้านรับ (dB)}$$

$$P_r = \text{กำลังงานที่รับได้ (W)}$$

$$P_t = \text{กำลังงานที่ส่งออกทางด้านส่ง (W)}$$

$$R = \text{ระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและรับ (m)}$$

$$\lambda = \text{ความยาวคลื่นที่ความถี่ใช้งาน (m)}$$

ในทางปฏิบัติการคำนวณอัตราขยายจะต้องคำนึงถึงอัตราการสูญเสียภายในสายนำสัญญาณ และอัตราการสูญเสียในอากาศว่างโดยสามารถหาอัตราการสูญเสียดังกล่าวได้ดังนี้

$$R \geq \frac{2(0.30 + 0.30)^2}{0.65} \\ \geq 1.11 \text{ m}$$

เมื่อ D_1 และ D_2 ของสายอากาศแบบยากิยาว 0.30 เมตร

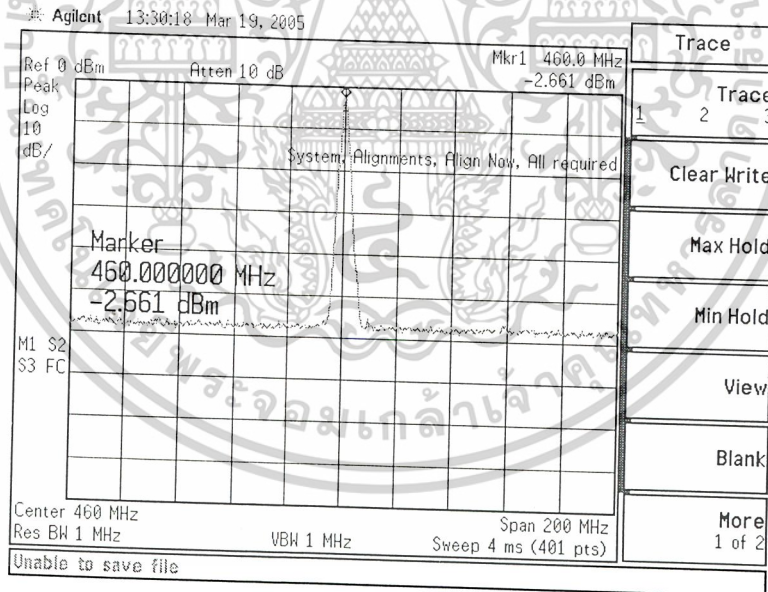
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 L_S &= 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \\
 &= 20 \log \left(\frac{4\pi (2)}{0.65} \right) \\
 &= 31.75 \text{ dB}
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

เมื่อ L_S คือ อัตราการสูญเสียในอากาศว่างและคิดระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ 2 เมตร

อัตราการสูญเสียที่ต้องพิจารณาอีกคือ L_{fr} และ L_{fl} คืออัตราการสูญเสียในสายนำสัญญาณทางด้านรับและด้านส่ง ตามลำดับ สามารถหาได้จากการทดสอบโดยใช้เครื่อง Signal Generator ส่งกำลังงานผ่านสายนำสัญญาณที่ต้องการหาค่าอัตราการสูญเสีย แล้วใช้เครื่อง Spectrum Analyzer วัดค่ากำลังงานที่รับได้ทางด้านรับแล้วนำมาคำนวณหาค่าอัตราการสูญเสียในสายนำสัญญาณ โดยส่งกำลังงานทางด้านส่งไป 0 dBm ผลการทดสอบเป็นดังนี้

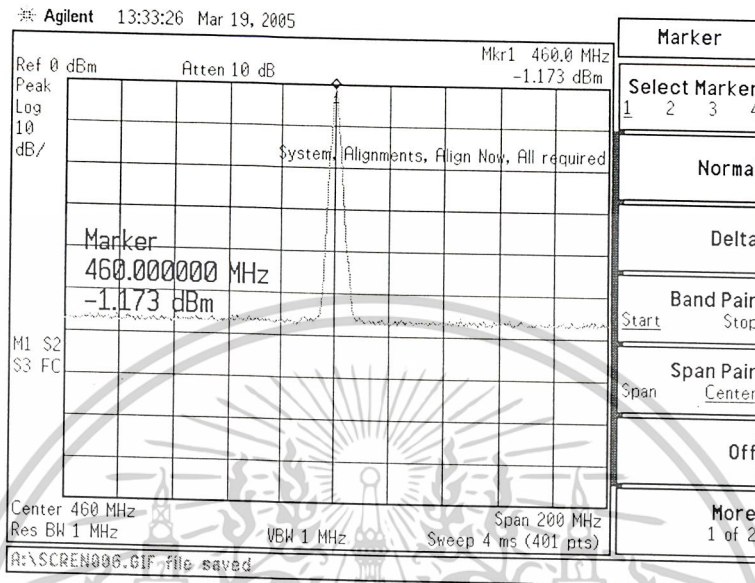
ใช้สายนำสัญญาณยาว 10 เมตรกำลังงานทางด้านรับมีค่าดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 กำลังงานที่รับได้ในการทดสอบอัตราการสูญเสียในสายนำสัญญาณยาว 10 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สายนำสัญญาณยาว 5 เมตร กำลังงานทางด้วนรับมีค่าดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 กำลังงานที่รับได้ในการทดสอบอัตราการสูญเสียในสายนำสัญญาณยาว 5 เมตร เกิดการสูญเสียในสายนำสัญญาณดังนี้

$L_{f, 10}$ = 10 เมตร อัตราสูญเสียในสายนำสัญญาณ 2.661 dBm

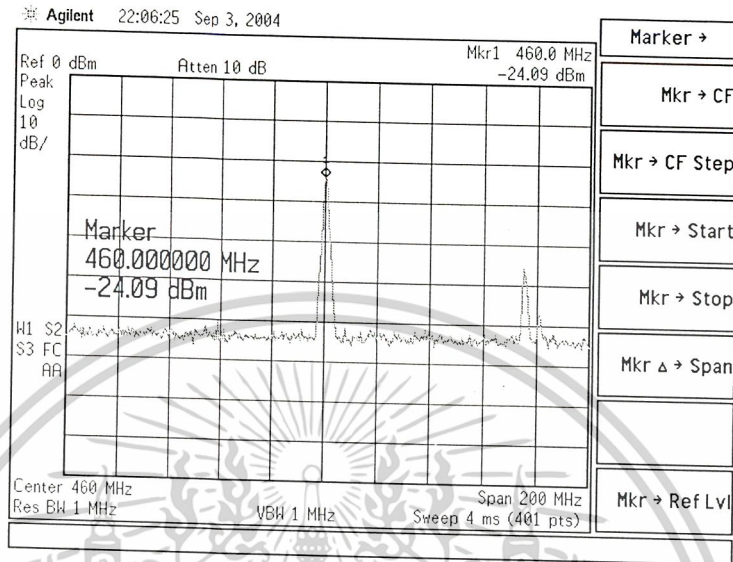
$L_{f, 5}$ = 5 เมตร อัตราสูญเสียในสายนำสัญญาณ 1.173 dBm

ดังนั้นสมการ 4.4 จะได้เป็น

$$G_{T(dBi)} + G_{R(dBi)} = P_{r(dBm)} - P_{t(dBm)} + L_{S(dB)} + L_{f_t(dB)} + L_{f_r(dB)} \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบยาก็ที่มีความเหมือนกันทุกประการ โดยวัดกำลังงานทางด้านรับดังรูปที่ 4.28



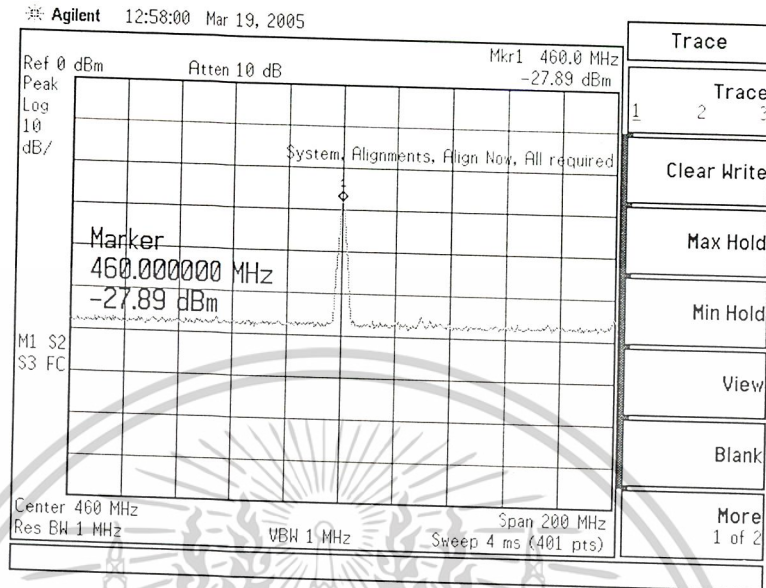
รูปที่ 4.28 กำลังงานที่วัดได้ทางด้านรับเมื่อใช้สายอากาศแบบยาคิดังนี้ อัตราขยายของสายอากาศแบบยาก็จะได้

$$2G_{(dBi)} = -24.09 \text{ dBm} - 0 \text{ dBm} + 31.75 \text{ dB} + 2.661 \text{ dBm} + 1.173 \text{ dBm}$$

$$G_{(dBi)} = 5.747 \text{ dBi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนสายอากาศด้านส่งเป็นสายอากาศแบบดิสโคนและ วัดกำลังงานทางด้านรับได้ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 กำลังงานที่วัดได้ทางด้านรับเมื่อเปลี่ยนสายอากาศส่งเป็นแบบดิสโคน

ดังนั้นอัตราขยายของสายอากาศแบบดิสโคนเมื่อเทียบกับสายอากาศแบบยาจิกจะได้

$$G_i(dBi) = P_r(dBm) - P_t(dBm) + L_s(dB) - G_r(dBi) + L_{f_t}(dB) + L_{f_r}(dB)$$

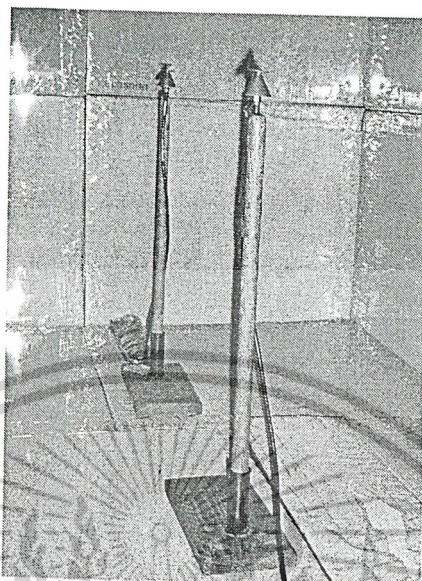
$$G_i = -27.89 dBm - 0 dBm + 31.75 dB - 5.768 dB + 2.661 dBm + 1.173 dBm$$

$$G_i = 1.947 dBi$$

4.7.2 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

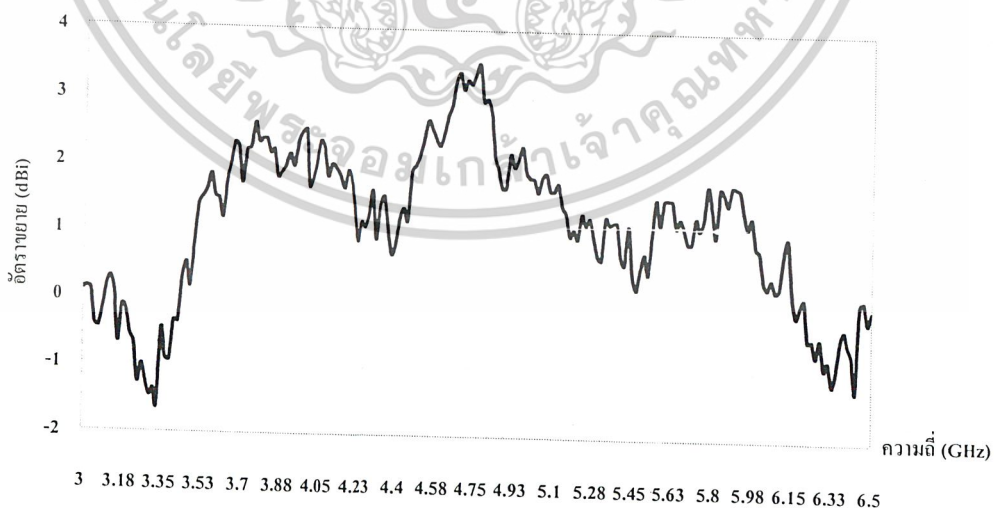
การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND อาจจะใช้วิธีการทดสอบแตกต่างไปจากการทดสอบสายอากาศในช่วงความถี่ UHF อยู่บ้างเนื่องจากขนาดของสายอากาศมีอำนวยให้การทดสอบสายอากาศนั้นทำได้ง่ายยิ่งขึ้นลดความยุ่งยากลงไป โดยอุปกรณ์ในการทดสอบสายอากาศใช้เพียงแค่เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเท่านั้น การทดสอบจะใช้วิธีการสร้างสายอากาศแบบดิสโคนที่เหมือนกันทุกประการสองตัวมาทำการทดสอบหาอัตราการขยายโดยอาศัยสมการที่ 4.3 4.4 และ 4.5 จากนั้นจึงสามารถทราบอัตราขยายของสายอากาศที่นำไปใช้เพียงตัวเดียวได้ ส่วนการจัดวางสายอากาศในการทดสอบเพื่อหาอัตราขยายนั้นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 การจัดเรียงสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND เพื่อทดสอบอัตราขยาย

อัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND นี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราขยายของสายอากาศตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งานเพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าสายอากาศนั้น มีอัตราขยายที่จะสามารถนำไปใช้กับระบบอากาศยานได้อย่างมีประสิทธิภาพแสดงไว้ในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 อัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND จะแสดงไว้ทั้งสามความถี่ที่ใช้งานดังนี้

3.70 GHz 1.70 *dBi*

4.75 GHz 3.36 *dBi*

5.80 GHz 1.42 *dBi*



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

ปริญญาโทฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์สายอากาศแบบดิสโคน ซึ่งเป็นสายอากาศที่สามารถที่จะนำไปใช้ในช่วงความถี่แถบกว้างได้ดี ลักษณะการนำไปใช้สามารถประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ ได้กว้างมาก เช่นใช้เป็นสายอากาศในหอควบคุมการบิน หรือเป็นสายอากาศตรวจราชการใช้ความถี่เป็นต้น และเมื่อนำสายอากาศแบบดิสโคนไปประยุกต์ใช้กับระบบอากาศยานไร้คนขับจึงได้พิจารณาถึงคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศแบบดิสโคนเช่นคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต้องมีค่าที่ยอมรับได้คือไม่ควรเกิน 2 : 1 ในช่วงกว้างแถบความถี่นำไปใช้งาน คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นต้องออกเป็นแบบอกรอบตัวโครงสร้างโดยรวมของสายอากาศต้องมีขนาดเหมาะสมที่จะนำไปติดตั้งบริเวณลำตัวด้านล่างของอากาศยานไร้คนขับได้ ในการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศได้ใช้แท่งโลหะแทนกรวยทึบของสายอากาศทำให้น้ำหนักโดยรวมของสายอากาศน้อยลง ในการออกแบบได้ใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า NEC2 วิเคราะห์หาโครงสร้างที่ทำให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศดังกล่าว

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจะพบว่าสายอากาศแบบดิสโคนทั้งสองช่วงความถี่มีคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศสอดคล้องกันดังที่ได้สรุปไว้ดังนี้

1) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศเป็นค่าที่ยอมรับได้คือ SWR 2 : 1 สายอากาศในช่วงความถี่ UHF นั้นอยู่ในช่วงกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ 360 MHz – 690 MHz คิดเป็น 62.86 % ส่วนสายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND อยู่ในช่วงกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ 3.5 GHz – 6.3 GHz คิดเป็น 57.14 % ดังนั้นจะพบว่าสายอากาศในช่วงความถี่ทั้งสองนั้นครอบคลุมช่วงกว้างแถบความถี่ที่ระบบอากาศยานไร้คนขับต้องการ

2) สายอากาศแบบดิสโคนในทั้งสองช่วงความถี่นั้นมีอัตราการสูญเสียย้อนกลับมากหรือมีสัญญาณย้อนกลับต่ำในช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งาน

3) มีอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในช่วงกว้างแถบความถี่ที่ใช้งานมีค่าดังนี้

สายอากาศในช่วงความถี่ UHF

ที่ความถี่ 400 MHz $39.783 \Omega - j4.4863 \Omega$

460 MHz $53.568 \Omega + j0.8203 \Omega$

520 MHz $54.559 \Omega - j2.2031 \Omega$

สายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND

ที่ความถี่ 3.70 GHz $67.559 \Omega - j23.809 \Omega$

4.75 GHz $45.010 \Omega + j1.656 \Omega$

5.80 GHz $38.834 \Omega - j5.646 \Omega$

4) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งสองช่วงความถี่เป็นแบบอกรอบตัว มีลักษณะเหมือนกันตลอดช่วงกว้างแถบความถี่ที่ระบบอากาศยานไร้คนขับต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) อัตราขยายของสายอากาศที่ทำการทดสอบมีค่าดังนี้

สายอากาศในช่วงความถี่ UHF 1.947 dBi

สายอากาศในช่วงความถี่ C-BAND จะแสดงทั้งสามความถี่คือ

3.70 GHz 1.70 dBi

4.75 GHz 3.36 dBi

5.80 GHz 1.42 dBi

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

- ปัญหาในกรณีที่ระบบอากาศยานไร้คนขับปฏิบัติงาน โดยทำการบินด้วยความเร็วสูงมากๆ นั้น สายอากาศที่ติดตั้งอยู่บนระบบอากาศยานไร้คนขับที่เป็นสายอากาศในช่วงความถี่ UHF นั้นจะเป็นแหล่งโลหะที่แทนกรวยที่บนนั้นอาจเกิดการสั้นเนื่องจากแรงลมได้ ส่งผลให้เกิดผลกระทบกับการบินของระบบอากาศยานไปบ้าง ส่วนสายอากาศที่อยู่ในช่วงความถี่ C-BAND มีขนาดเล็กอยู่แล้วจึงไม่ส่งผลกระทบต่ออากาศยานไร้คนขับ แต่โดยปกติแล้วระบบอากาศยานไร้คนขับจะปฏิบัติงานโดยใช้ความเร็วอยู่ในระดับที่ไม่ทำให้สายอากาศสั้นมากจนถึงขนาดที่จะทำให้อากาศยานไร้คนขับบินปฏิบัติงานไม่ได้ สายอากาศแบบดิสโคนจึงยังสามารถใช้ได้ดีกับระบบอากาศยานไร้คนขับ

- แนวทางการแก้ไขอาจใช้วิธีสร้างวัสดุที่ไม่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นรอบสายอากาศเพื่อลดแรงเสียดทานของลมทำให้ลดผลกระทบกับการปฏิบัติงานของระบบอากาศยานไร้คนขับในขณะที่ใช้ความเร็วสูงได้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นโดยอาศัยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า

(Numerical -Electromagnetic Code)

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟารุ่นที่ 2 หรือ NEC2 เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการแห่งชาติลอเรนซ์ลิเวอร์มอร์ (Lawrence Livermore National Laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกาและเป็นโปรแกรมประเภทฟรีแวร์ (Freeware) ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลด (download) มาใช้งานได้โดยง่าย การจะสั่งให้โปรแกรมทำงานนั้น ผู้ใช้จะต้องจัดเตรียมรหัสทางคอมพิวเตอร์ (User-Oriented Computer Code) ให้กับโปรแกรม เพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศและโครงสร้างที่เป็นโลหะใดๆ ที่มีรูปร่างไม่เจาะจง รหัสทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมที่ผู้ใช้จะต้องใส่เข้าไปนั้น คือการสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นลวดเล็กๆ (Wire) หรือพื้นผิว (Surface) จำนวนมากซึ่งในกรณี ที่โครงสร้างถูกแทนด้วยเส้นลวด โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (Electric Field Integral Equation : EFIE) ในการหากระแสเหนี่ยวนำ (Induce Current) บนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด (Source) หรือสนามที่ตกกระทบ (Incident Field) และในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยพื้นผิว โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Integral Equation : MFIE) ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ การกระตุ่นสามารถที่จะเป็นไปได้ทั้งแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป (Applied Voltage Source) หรือคลื่นระนาบที่ตกกระทบ (Incident Plane Wave) NEC2 สามารถใช้การคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระยะใกล้และไกล ภาคตัดขวางเป้าเรดาร์ (Radar Cross Section : RCS) อิมพีแดนซ์ แอดมิตแดนซ์ อัตราขยาย และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง การใช้พลังงาน (Power Budget) และการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ (Mutual Coupling)

สำหรับสายอากาศที่นำเสนอในปริณญาณิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของสายอากาศ โดยการแทนโครงสร้างของสายอากาศด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก ดังนั้นสมการที่ใช้จึงเป็นสมการเชิงอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า รูปแบบของสมการสนามไฟฟ้าที่ใช้ใน NEC2 มีรายละเอียดในหัวข้อต่อไปนี้

1 สมการอินทิกรัลเชิงสนามในอากาศว่าง

รูปแบบของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่ใช้ใน NEC2 สำหรับสนามไฟฟ้าของการกระจายกระแส \vec{j} คือ

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

เมื่อ

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

และแบบแผนทางเวลา (Time Convention) คือ $e^{j\omega t} \bar{\bar{I}}$ คือเอกลักษณ์คู่ (Identity Dyad) $\hat{a}_x \hat{a}_x + \hat{a}_y \hat{a}_y + \hat{a}_z \hat{a}_z$ เมื่อการกระจายกระแสจำกัดให้อยู่บนพื้นผิวของตัวนำที่มีค่าความนำสมบูรณสมการ(1) จะกลายเป็น

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

เมื่อ \bar{j}_s เป็นความหนาแน่นกระแสพื้นผิว จุดสังเกต \bar{r} จะถูกกำหนดให้อยู่บนพื้นผิว S ดังนั้น $\bar{r} \neq \bar{r}'$ ถ้า \bar{r} เข้าใกล้ S ลักษณะคล้ายลิมิต สมการ (2) จะเป็น

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

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

สมการอินทิกรัลของกระแสเหนี่ยวนำบน S โดยสนามตกกระทบ \bar{E}' สามารถหาได้จากสมการ (3) และเงื่อนไขขอบเขตสำหรับ \bar{r} ที่แปรผันตาม S

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

เมื่อ $\hat{n}(\bar{r})$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับพื้นผิว \bar{r} และ \bar{E}^s เป็นสนามเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำ \bar{j}_s เมื่อแทนค่า \bar{E}^s ในสมการ (4) ด้วยสมการ (3) สามารถเขียนสมการ (4) ได้เป็น

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

สมการอินทิกรัลเวกเตอร์ในสมการ (5) สามารถลดให้กลายเป็นสมการอินทิกรัลเชิงสเกลาร์เมื่อพื้นผิวตัวนำ S ถูกแทนที่ด้วยเส้นลวดทรงกระบอกบางๆ ซึ่งจะทำให้วิธีการแก้ปัญหาง่ายขึ้นมาก การสมมุติที่ประยุกต์ใช้กับเส้นลวดบาง เรียกว่า วิธีการประมาณเส้นลวดบาง (Thin-Wire Approximation) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระแสตามขวางที่สัมพันธ์กับกระแสตามแกนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
2. การเปลี่ยนแปลงโดยรอบในกระแสตามแกนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
3. กระแสสามารถแทนได้ด้วยกระแสเชิงเส้น (Filament) บนแกนลวด
4. เงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้าจะถูกบีบบังคับให้มีเฉพาะ ในทิศทางตามแนวแกนเท่านั้น

การประมาณนี้สามารถนำมาใช้ได้เมื่อ รัศมีของเส้นลวดมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นและความยาวเส้นลวดที่มีค่ามากๆ นอกจากนี้ สมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ในกรณีที่รัศมีของเส้นลวดมีขนาดใหญ่จนไม่สามารถใช้วิธีการประมาณด้วยเส้นลวดบางได้นั้น ก็ได้ถูกรวมไว้ใน NEC2 ด้วยซึ่งการประมาณนี้ มีชื่อเรียกว่า การขยายออกของการประมาณของเส้นลวดบาง (Extended Thin Wire Approximation)

จากคุณสมบัติในข้อ (1) (2) และ (3) กระแสพื้นผิว $\vec{j}_s(\vec{r})$ บนเส้นลวดที่มีรัศมี a สามารถแทนกระแสของเชิงเส้น (Filament Current) I เมื่อ

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

เมื่อ

S = ระยะทางตามแกนเส้นลวดที่ \vec{r} และ

\hat{s} = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่สัมผัสแกนเส้นลวดที่ \vec{r}

สมการ (5) จะกลายเป็น

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

เมื่อการอินทิเกรตกระทำตามความยาวของเส้นลวด การบังคับเงื่อนไขขอบเขตให้มีเฉพาะทิศทางในแนวแกนทำให้สมการ (5) ลดรูปเป็นสมการสเกลาร์

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

\vec{r}' บนจุดที่ s แกนเส้นลวด ในขณะที่ \vec{r} เป็นจุดที่ s บนพื้นผิวเส้นลวด $|\vec{r} - \vec{r}'| \geq a$ และการอินทิเกรตก็จะมีขอบเขต

2 วิธีการแก้ปัญหาเชิงเลขในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

สมการอินทิกรัล (7) จะสามารถหาคำตอบใน NEC2 ได้โดยใช้ระเบียบเชิงตัวเลขของโมเมนต์ สำหรับในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึง รายละเอียดฟังก์ชันฐานและฟังก์ชันให้น้ำหนักของวิธีเชิงโมเมนต์ที่ใช้ใน NEC2 ใน NEC2 ฟังก์ชันฐานและฟังก์ชันให้น้ำหนักที่จะใช้แตกต่างกัน ฟังก์ชันให้น้ำหนัก w_j ฟังก์ชันเดลตา (Delta Function) ที่มีรูปแบบสมการคือ

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

เซตของจุดบนพื้นผิวตัวนำผลลัพท์ที่เป็นจุดการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) ของสมการอินทิกรัล รู้จักกันในชื่อวิธีวางรวมตำแหน่ง (Collocation Method) ของการแก้ปัญหา เส้นลวดจะถูกแบ่งเป็นเซกเมนต์ (Segment) เส้นตรงสั้นๆ ที่มีจุดสุ่มตัวอย่างอยู่ที่ตรงกลางของแต่ละเซกเมนต์ ฟังก์ชันฐานหรือฟังก์ชันกระแสนบนแต่ละเซกเมนต์อยู่ในรูปผลรวมของ 3 องค์ประกอบคือค่าคงที่ไซน์ (Sine) และค่าโคไซน์ (cosine) ซึ่งการเลือกกระแสนแบบนี้จะทำให้การแก้ปัญหารวดเร็วขึ้น และกระแสนไซน์นูชอยด์ ยังสามารถวิเคราะห์ได้ง่ายในรูปแบบสำเร็จ (Close Form) แอมพลิจูดของค่าคงที่ ค่าไซน์ ค่าโคไซน์ จะมีความเกี่ยวข้องกับผลรวมของแอมพลิจูดชนิดต่างๆ ซึ่งจะต้องเหมาะสมกับเงื่อนไขทางกายภาพ ของพฤติกรรมของกระแสและประจุที่ปลายของเซกเมนต์การแมตซ์ที่ปลายของแต่ละเซกเมนต์ จะช่วยปรับปรุงให้วิธีการแก้ปัญหามาแน่นขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่จุดต่อที่มีความยาวแต่ละเซกเมนต์ไม่เท่ากัน กระแสนทั้งหมดบนเซกเมนต์หมายเลข j ใน NEC2 จะมีรูปแบบคือ

$$I_j(s) = A_j + B_j \sin k(s - s_j) + C_j \cos k(s - s_j), |s - s_j| \leq \Delta_j / 2 \quad (8)$$

เมื่อ s_j เป็นค่าของ s ที่ตรงกลางเซกเมนต์ j และ Δ_j เป็นความยาวของเซกเมนต์ j ตัวแปร A_j, B_j และ C_j คือแอมพลิจูดของฟังก์ชันค่าคงที่ไซน์และโคไซน์ตามลำดับ

2.5.3 วิธีการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณทางไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

สำหรับการจำลอง โครงสร้างด้วยเส้นลวดนั้น อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างด้วยรหัส NEC2 คือ เซกเมนต์ที่มีลักษณะตรงและสั้น การกำหนดเซกเมนต์สำหรับการออกแบบเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเพราะจะมีผลต่อความถูกต้องของผลลัพท์จำนวนเซกเมนต์ควรจะมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะต้องการสำหรับความถูกต้องเพราะ โปรแกรมจะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนเซกเมนต์เพิ่มขึ้น เซกเมนต์เส้นลวดจะถูกกำหนด โดยพิกัด (Co-ordinate) ของจุดปลายทั้งสองข้างของเซกเมนต์ และขนาดองรัศมี การกำหนดความยาวเซกเมนต์ (Segment Length : Δ) จะสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่น λ โดยปกติ Δ ควรจะมีค่าน้อยกว่า 0.1λ ที่ความถี่ที่ต้องการ ในบางครั้งอาจจะมีการใช้เซกเมนต์ที่ยาวกว่านั้นบนเส้นลวดยาวที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ในขณะที่เซกเมนต์ที่สั้นกว่าเช่น 0.05λ หรือน้อยกว่านี้ อาจจะต้องใช้ในการจำลองบริเวณที่มีความสำคัญของสายอากาศขนาดของเซกเมนต์จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นตัวกำหนดการแก้ปัญหาสำหรับการหากระแสบนแบบจำลอง เนื่องจากกระแสจะถูกคำนวณที่รูกกลางของแต่ละเซกเมนต์ เซกเมนต์ที่มีขนาดสั้นมากๆ เช่นน้อยกว่า $10^{-3} \lambda$ ไม่ควรมานำมาใช้ เพราะความเหมือนกันขององค์ประกอบค่าคงที่และโคไซน์ของการกระจายกระแสจะทำให้ผลจากการเปรียบเทียบวิธีเชิงเลขไม่แม่นยำ

รัศมีของเส้นลวด (Wire Radius : a) ซึ่งสัมพันธ์กับ λ จะถูกจำกัดโดยการประมาณที่ใช้ในเคอร์เนล (Kernel) ของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งมีการประมาณสองแบบด้วยกันที่ใช้ใน NEC2 คือ เคอร์เนลแบบเส้นลวดบาง และเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบางซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4.1 สำหรับเคอร์เนลแบบเส้นลวดบางนั้น กระแสบนกระแสนพื้นผิวของแต่ละเซกเมนต์จะถูกลดกลายเป็นเส้นลวดนำไฟฟ้าเล็กๆ ของกระแสนแกนเซกเมนต์ ส่วนในเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง กระแสจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของเซกเมนต์นั้น

การกระจายกระแสที่ใช้ใน NEC2 จะบังคับเงื่อนไขกระแสและความหนาแน่นประจุตามแนวเส้นลวด ที่จุดเชื่อมต่อ และปลายเส้นลวด จากเงื่อนไขเหล่านี้ทำให้เซกเตอร์จะต้องต่อกันทางไฟฟ้าที่จุดปลาย ถ้าเซกเมนต์มีการซ้อนทับกันเกิดขึ้นที่ปลายของแต่ละอัน NEC2 จะไม่ยอมให้กระแสไหลจากเซกเมนต์หนึ่งไปยังเซกเมนต์อื่นๆ เซกเมนต์จะเหมือนกับต่อกันเมื่อเมื่อระยะห่างของจุดปลายแต่ละด้านมีค่าน้อยกว่า 10^{-3} เท่าของความยาวเซกเมนต์ที่สั้นที่สุดคั้งนั้นถ้าเป็นไปได้ควรเชื่อมต่อเซกเมนต์ด้วยวิธีการกำหนดระบบพิกัดที่เหมือนกัน

ข้อกำหนดของการจำลอง โครงสร้างด้วยตาข่ายเส้นลวด (Wire-grid) มีดังต่อไปนี้

(1) เซกเมนต์จะต้องไม่ซ้อนทับกัน เนื่องจากการแบ่งกระแสระหว่างสองเซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันนั้น ไม่สามารถสรุปได้ เซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันอาจจะมีผลในสมการเมทริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix Equation)

(2) การเปลี่ยนแปลงรัศมีที่มีความแตกต่างกันมากของเซกเมนต์ที่เชื่อมต่อกันอาจจะมีผลทำให้ความแม่นยำลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ค่า Δ/a มีค่าน้อย ปัญหาสามารถแก้ไขได้โดยการให้รัศมีลดลงตามลำดับตลอดหลายเซกเมนต์

(3) จำเป็นจะต้องมีเซกเมนต์ที่จุดซึ่งมีการเชื่อมต่อกับโครงข่าย (Network) หรือแหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage Source) สำหรับช่องว่างการกระตุ้น (Excitation Gap) ก็จำเป็นต้องมีเส้นรอยต่อเนื่องลากข้ามช่องว่าง ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่ต้องการสามารถระบุให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตได้

(4) จำนวนเส้นลวดที่จะนำมาต่อที่จุดเชื่อมต่อใดๆ นั้นไม่สามารถมีค่าเกิน 30 เส้นได้เนื่องจากข้อจำกัดของมิติในรหัส NEC2

ข้อมูลที่ใช้อธิบายสายอากาศและสภาพแวดล้อม และคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการจะคำนวณ จะเป็นอินพุตที่ใส่เข้าไป คล้ายกับบัตรเจาะรูที่เป็นข้อมูลใส่ให้กับคอมพิวเตอร์เมนเฟรมในสมัยก่อน กลุ่มของรหัสข้อมูลในการทำงานครั้งหนึ่งจะประกอบไปด้วย รหัสข้อมูล 3 ประเภทด้วยกัน ส่วนแรกเริ่มต้นด้วยรหัสหนึ่งชุดหรือมากกว่านั้นซึ่งบรรจุรายละเอียดของการทำงาน ซึ่งจะพิมพ์เป็นตัวหนังสือที่จุดเริ่มต้น ของไฟล์เอาต์พุต ต่อมาจะตามด้วยรหัสข้อมูลระบุรูปแบบทางเรขาคณิต ซึ่งจะระบุรูปร่างของสายอากาศ และสุดท้ายจะเป็นส่วนของรหัสควบคุมโปรแกรมซึ่งจะระบุตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ให้ปฏิบัติตามเงื่อนไขการนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ การโหลด (Loading) และการกระตุ้น (Excitation) รวมทั้งความต้องการให้คำนวณกระแสและสนามของสายอากาศ รหัสทุกๆ รหัส จะมีอักษรสองตัว ในหนึ่งคอลัมน์ที่หนึ่งและสองเพื่อเป็นการระบุรหัสให้กับโปรแกรม ตัวอย่างเช่น รหัสข้อมูลระบุเส้นลวด (Wire Specification : GW) ซึ่งจะเป็นรหัสที่ใช้ในการกำหนดเส้นลวดขึ้นมาระหว่างจุดสองจุด ซึ่งมีลักษณะของข้อมูลที่จะต้องใส่ลงไปดังนี้

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

ความหมายของตัวแปรแต่ละตัวที่ต้องใส่ลงไปคือ

ITG(I1) คือ ป้ายแสดงหมายเลขของ (Tag) ที่จะกำหนดให้เส้นลวดมีหมายเลขประจำเส้นลวดเป็นค่าใดๆ รวมทั้งเซกเมนต์ทุกเซกเมนต์ของเส้นลวดก็จะมีหมายเลขเส้นลวดนั้นด้วย

NS(I2) คือ จำนวนเซกเมนต์ที่จะแบ่งให้กับเส้นลวด

XW1(F1) คือ พิกัด x ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

YW1(F2) คือ พิกัด y ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

ZW1(F3) คือ พิกัด z ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

XW2(F4) คือ พิกัด x ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด

YW2(F5) คือ พิกัด y ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด

ZW2(F6) คือ พิกัด z ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด

RAD(F7) คือ รัศมีของเส้นลวด

การกำหนดรัศมีของเส้นลวดนั้นจะต้องเลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดที่ทำให้พื้นที่ผิวรวมของเส้นลวดทั้งหมดมีค่าเท่ากับพื้นที่ผิวของตัวนำของสายอากาศ

จากรหัสตัวอย่างข้างต้น เมื่อทำการใส่ตัวแปรต่างๆ ลงไปแล้วและตั้งให้โปรแกรมทำงาน NEC2 จะสร้างเส้นลวดให้ 1 เส้น ซึ่งเส้นลวดนี้จะแบ่งเป็นเซกเมนต์เล็กๆ จำนวน NS เซกเมนต์ การสร้างแบบจำลองของสายอากาศสามารถทำได้โดยการใส่รหัสที่มีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างข้างบนนี้ไปเรื่อยๆ ก็จะทำให้สามารถสร้างโครงสร้างของสายอากาศและหาคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการได้ นอกจากนี้โครงสร้างที่สร้างขึ้นโดย NEC2 ยังสามารถกำหนดสภาพนำ (Conductivity) ให้เท่ากับสภาพนำของโลหะที่จะใช้ทำสายอากาศได้เช่น ในกรณีนี้สายอากาศต้นแบบจะสร้างขึ้นโดยใช้ทองเหลือง ดังนั้นการคำนวณโดยใช้ NEC2 ก็จะทำให้การกำหนดสภาพนำของโครงสร้างด้วยค่าสภาพนำของทองเหลือง คือ 2.56×10^7 S/m โดยการใส่คำสั่งโหลด

ในการตรวจสอบโครงสร้างของสายอากาศว่าได้สร้างถูกต้องเป็นไปตามโครงสร้างที่ต้องการหรือไม่นั้น สามารถดูได้โดยใช้โปรแกรม Necview ซึ่งจะแสดงโครงสร้างของสายอากาศที่ได้ใส่รหัสใน NEC2 ออกมาเป็นตาข่ายเส้นลวด ตามที่กำหนดในระบบพิกัด x, y และ z นอกจากนี้โปรแกรม Necview ยังให้ดูผลแบบการแผ่พลังงานในระบบพิกัด x, y และ z ของสายอากาศที่ NEC2 คำนวณออกมาได้ด้วย สำหรับไฟล์เอาต์พุตที่ได้ออกมาจากการรันโปรแกรม NEC2 นั้น จะเป็นไปตามรูปแบบของข้อมูลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใส่เข้าไป เริ่มต้นด้วยการอธิบาย ตามด้วยข้อมูลทางเรขาคณิต และจากนั้นเป็นผลของตัวแปรที่ต้องการคำนวณ

NEC2 ได้รับการยอมรับว่า เป็นโปรแกรมที่สามารถคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่สำหรับการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศด้วย NEC2 นั้นยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรม NEC2 เอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดีนั้น ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่าน คือ อาจารย์ทองทศ วาณิชศรี อาจารย์ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำปริญญาานิพนธ์ และ อาจารย์ดวงใจ กาญจนปัญญา ที่ได้ให้คำปรึกษาดูจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้กับทางคณะผู้จัดทำทั้งในอดีตและปัจจุบัน ทั้งยังขอขอบคุณ คุณไพโรจน์ วุ่นชุม คุณสุธาสิณี ละมุลตรี คุณนาคยา ตริวุฒิ สำหรับความช่วยเหลือทั้งอุปการะในการทดลองคำปรึกษาและคำแนะนำในการทำปริญญาานิพนธ์ตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้ที่เป็นแรงบันดาลใจอันสำคัญยิ่ง รวมถึงกำลังใจที่ได้รับเสมอมาจากคุณพ่อ คุณแม่ อีกทั้งญาติพี่น้องของทางคณะผู้จัดทำ ทำให้คณะผู้จัดทำมีความมั่นใจพากเพียรทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] C.A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, John Wiley & Sons., 1988.
- [2] Koji Nagasawa and 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 โรจน์อารยานนท์, *วิศวกรรมสายอากาศ*, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้