

สายอากาศจากท่อนำคลื่นวงกลมแถวลำดับที่ปรับเฟส

ANTENNA USING CIRCULAR APERTURE OF CYLINDER FOR PHASED ARRAY



โดย
นายบัญชา เหลือแดง
นายรุ่งโรจน์ บุตตะจีน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 50133

วันเดือนปี 2 1 เม.ย. 2547

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศจากท่อนำคลื่นวงกลมแถวลำดับที่ปรับเฟส

ANTENNA USING CIRCULAR APERTURE OF CYLINDER FOR PHASED ARRAY

โดย

นายบัญชา เหลือแดง 43015073

นายรุ่งโรจน์ บุตตะจิน 43015083

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศจากท่อนำคลื่นวงกลมแถวลำดับที่ปรับเฟส

ANTENNA USING CIRCULAR APERTURE OF CYLINDER FOR PHASED ARRAY

ผู้จัดทำ

1. นายบัญชา เหลือแดง 43015073

2. นายรุ่งโรจน์ นุตตะจิน 43015083



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. ชுவัต พงศ์เจริญพาณิชย์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศจากท่อนำคลื่นวงกลมแถวลำดับที่ปรับเฟส
 Antenna using Circular Aperture of Cylinder for Phased Array

โดย นายบัญชา เหลือแดง 43015073

นายรุ่งโรจน์ บุตตะจีน 43015083

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นงานนำการศึกษา คำนวณ วิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศจากท่อนำคลื่นวงกลมแถวลำดับที่ปรับเฟส โดยการวิเคราะห์คุณลักษณะสายอากาศนี้จะวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศเปิดช่องบนท่อนำคลื่นวงกลมปากเดียวในโหมดต่างๆ ก่อน จากนั้นได้วิเคราะห์กรณีทีวางเป็นแถวลำดับที่มีการปรับเฟสเพื่อมีการเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่น จากนั้นทำการสร้างสายอากาศแบบช่องเปิดเดี่ยวและแถวลำดับที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบเพื่อทำการทดสอบคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นเพื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีและทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ สำหรับสายอากาศที่ได้ศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศแถวลำดับที่ปรับเฟสสำหรับประยุกต์ใช้ในการสื่อสารเคลื่อนที่ต่อไป

Abstract

This project presents the study, calculation, analysis, design, fabrication and measurement of antenna using circular aperture of cylinder for phased array. The analysis procedure is starting with the investigation of single aperture for various mode operations. Then, the array configurations will be characterized by varying the phase excitation to change the main beam direction. The antenna prototypes are fabricated to measure the radiation characteristics to compare with the theoretical calculations. The impedance characteristics such as input impedance, return loss and standing wave ratio are also tested. The results from the study are necessary for applying to be the phased array antenna for mobile communications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
สารบัญ	II
สารบัญรูปภาพ	IV
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 โครงประกอบของโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ	
2.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ (Essential Antenna Parameter)	3
2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)	3
2.1.2 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)	3
2.1.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)	3
2.1.4 การเข้าหากันได้ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ (Matching Impedance)	4
2.1.5 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width)	4
2.1.6 อัตราการขยาย (Gain)	4
2.1.7 ค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อย (Side Lobe Ratio : SLR)	4
2.1.8 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width : FNBW)	4
2.1.9 การโพลาไรซ์ (Polarization)	5
2.1.10 ช่วงกว้างความถี่ (Bandwidth : BW)	5
2.2 ลักษณะทั่วไปของสายอากาศ	6
2.3 สมการของสายอากาศที่แพร่กระจายจากตัวสายอากาศ	7
2.3.1 สมการเวกเตอร์ของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผันตามเวลา (Vector Wave Equations of Time – Varying Electromagnetic Field)	7
2.3.2 สมการเวกเตอร์ของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผันตามเวลาแบบฮาร์มอนิก (Vector Wave Equations of Time – Harmonic Electromagnetic Field)	9
2.3.3 การหาค่าตอบจากสมการเวกเตอร์ของคลื่นสำหรับระบบพิกัดทรงกระบอก	10
2.3.4 สมการที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวน (Aperture Field)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.3.5 สมการที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศ (Radiation Field)	18
2.4 การออกแบบด้วยวงจรแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน	29
2.4.1 การหาค่า W/h	29
2.4.2 การคำนวณกาโครงสร้าง	30
2.5 ตัวปรับเฟส (Phase Shifter)	31
บทที่ 3 การวิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบ	33
3.1 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ	33
3.1.1 การพิจารณาค่ารัศมีและความกว้างของสายอากาศ	33
3.1.2 การพิจารณาค่าความยาวโพรบ	33
3.2 การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศในกรณียูนิฟอร์ม (Uniform)	34
3.2.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	34
3.2.2 การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	35
3.2.3 การพิจารณาค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง	35
3.2.4 การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลม	37
3.3 การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศในกรณีโหมด TE_{11}	44
3.2.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	44
3.2.2 การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	46
3.2.3 การพิจารณาค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง	46
3.2.4 การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลม	48
3.4 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในกรณีที่ทำกรปรับเฟส	56
บทที่ 4 การสร้าง การทดสอบ และผลการทดสอบ	60
4.1 การสร้าง	60
4.2 การทดสอบและผลการทดสอบ	61
4.2.1 การทดสอบค่า VSWR, Return loss และ Impedance	61
4.2.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	65
บทที่ 5 สรุป และวิจารณ์	72
ภาคผนวก	73
กิตติกรรมประกาศ	87
เอกสารอ้างอิง	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1 สายอากาศจากท่อนำคลื่นวงกลม	6
รูปที่ 2.2 การจัดเรียงแถวลำดับวงกลมแบบสมมาตรที่มี N เอลิเมนต์	6
รูปที่ 2.3 ท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่ระนาบ $z = 0$	14
รูปที่ 2.4 ท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่มีช่องเปิดแบบวงกลมบนระนาบ $z = 0$	17
รูปที่ 2.5 การจัดเรียงแถวลำดับวงกลมแบบสมมาตรที่มี N เอลิเมนต์	28
รูปที่ 3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้า ที่ค่ารัศมีต่างๆกัน คือที่ $0.30\lambda, 0.35\lambda, 0.40\lambda, 0.45\lambda$ ตามลำดับ	34
รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก ที่ค่ารัศมีต่างๆกัน คือที่ $0.30\lambda, 0.35\lambda, 0.40\lambda, 0.45\lambda$ ตามลำดับ	34
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับค่ารัศมีของสายอากาศใน แต่ละค่าของรัศมี	35
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งกับ ค่ารัศมีของสายอากาศในแต่ละค่าของรัศมีในระนาบของสนามไฟฟ้า	36
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งกับ ค่ารัศมีของสายอากาศในแต่ละค่าของรัศมีในระนาบของสนามสนามแม่เหล็ก	36
รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.40λ	37
รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.40λ	37
รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.45λ	38
รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.45λ	38
รูปที่ 3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ	39
รูปที่ 3.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ	39
รูปที่ 3.12 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 3.13 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	41
รูปที่ 3.14 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	41
รูปที่ 3.15 ค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านข้างในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	42
รูปที่ 3.16 ค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านข้างในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	42
รูปที่ 3.17 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์กลางแรกในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	43
รูปที่ 3.18 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์กลางแรกในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	44
รูปที่ 3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้า ที่ค่ารัศมีต่างๆกัน คือ ที่ 0.30λ, 0.35λ, 0.40λ, 0.45λ ตามลำดับ	45
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก ที่ค่ารัศมีต่างๆกัน คือ ที่ 0.30λ, 0.35λ, 0.40λ, 0.45λ ตามลำดับ	45
รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพเจาะจงทิศทางการแผ่รังสีของสายอากาศใน แต่ละค่าของรัศมี	46
รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งกับ ค่ารัศมีของสายอากาศในแต่ละค่าของรัศมีในระนาบของสนามไฟฟ้า	47
รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งกับ ค่ารัศมีของสายอากาศในแต่ละค่าของรัศมีในระนาบของสนามสนามแม่เหล็ก	47
รูปที่ 3.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.40λ	48
รูปที่ 3.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.40λ	48
รูปที่ 3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.45λ	49
รูปที่ 3.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.45λ	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.45λ วัตถุประสงค์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านวิชาการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 3.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ	50
รูปที่ 3.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ	50
รูปที่ 3.30 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	51
รูปที่ 3.31 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กึ่งกลางตลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	52
รูปที่ 3.32 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กึ่งกลางตลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	52
รูปที่ 3.33 ค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านข้างในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	53
รูปที่ 3.34 ค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านข้างในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	53
รูปที่ 3.35 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์กลางแรกในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	54
รูปที่ 3.36 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์กลางแรกในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ	55
รูปที่ 3.37 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ($\theta_0 = \frac{\pi}{2}, \phi_0 = \frac{\pi}{2}$)	56
รูปที่ 3.38 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ($\theta_0 = \frac{\pi}{2}, \phi_0 = \frac{\pi}{2}$)	56
รูปที่ 3.39 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ($\theta_0 = \frac{\pi}{2}, \phi_0 = \frac{\pi}{2}$)	57
รูปที่ 3.40 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ($\theta_0 = \frac{\pi}{4}, \phi_0 = 0$)	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 3.41 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ($\theta_0 = \frac{\pi}{3}, \phi_0 = 0$)	58
รูปที่ 3.42 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ($\theta_0 = \frac{\pi}{3}, \phi_0 = 0$)	58
รูปที่ 4.1 การจัดเรียงสายอากาศเป็นแถวลำดับวงกลม	60
รูปที่ 4.2 การจัดเรียงสายอากาศเป็นแถวลำดับวงกลมที่ปรับเฟส	61
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบค่า VSWR	62
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่า Impedance	62
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบค่า Return loss	63
รูปที่ 4.6 รูปแบบของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ (Network Analyzer)	63
รูปที่ 4.7 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	64
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบสายอากาศ 1 องค์ประกอบ ในระนาบไฟฟ้า	65
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบสายอากาศ 1 องค์ประกอบ ในระนาบไฟฟ้า เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	65
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบสายอากาศ 1 องค์ประกอบ ในระนาบแม่เหล็ก	66
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบสายอากาศ 1 องค์ประกอบ ในระนาบแม่เหล็ก เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	66
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับ วงกลมในระนาบไฟฟ้า	67
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับ วงกลมในระนาบไฟฟ้าเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	67
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับ วงกลมในระนาบแม่เหล็ก	68
รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับ วงกลมในระนาบแม่เหล็กเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	68
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับ วงกลมที่ปรับเฟสในระนาบไฟฟ้า	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับ วงกลมที่ปรับเฟสในระนาบไฟฟ้าเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	69
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับ วงกลมที่ปรับเฟสในระนาบแม่เหล็ก	70
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับ วงกลมที่ปรับเฟสในระนาบแม่เหล็กเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

เรื่อง

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณลักษณะของสาขาอากาศ

หน้า

64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ในระบบการสื่อสาร (Communication System) สายอากาศมีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication System) เนื่องจากสายอากาศมีหน้าที่ รับ-ส่ง สัญญาณที่ถูกผสม (Modulation) ด้วยกรรมวิธีต่างๆ โดยส่วนมากจะเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) โดยวิธีการเหนี่ยวนำกระแส กลายเป็นคลื่นวิทยุ (Radio Wave) ส่งผ่านตัวกลางคืออากาศไปยังเครื่องรับแล้วสายอากาศที่เครื่องรับก็จะรับสัญญาณที่เข้ามาเปลี่ยนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วก็นำส่งไปยังระบบอื่นเพื่อการสื่อสารต่อไปตามระบบที่ทำงานและเพื่อให้สัญญาณรับและส่งมีความผิดพลาดน้อยที่สุดจึงควรสร้างอุปกรณ์ รับส่งสัญญาณให้มีประสิทธิภาพ และลักษณะของสายอากาศที่จะนำมาสร้างต้องพิจารณาส่วนต่างๆดังต่อไปนี้ เช่น ลักษณะการใช้งาน, ย่านความถี่ที่ใช้งาน, คุณภาพของสัญญาณที่ต้องการนำไปใช้งาน, ทิศทางการแพร่กระจาย ไปของคลื่นตามแนวต่างๆที่ส่ง, ระยะทางระหว่างตัวส่งและรับ, ทิศทางการรับคลื่นของสายอากาศรับตามแนวต่างๆเป็นต้น สำหรับสายอากาศจากท่อนำคลื่นวงกลมแถวลำดับที่ปรับเฟส (Antenna Using Circular Aperture of Cylinder for Phased Array) ซึ่งทำการสร้างขึ้นมานี้เพื่อจะตรวจสอบคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่ส่งออกไปทั้งระนาบ E-plane และ H-plane และลักษณะการรับคลื่นในทิศทางต่างๆรวมทั้งค่าการชี้ทิศทาง (Directivity), ค่าการขยาย (Gain), ลักษณะการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) และค่าต่างๆเพื่อตรวจสอบว่าตรงกับทฤษฎีที่ได้ศึกษามาเพื่อสร้างขึ้นมาและสามารถพัฒนาสายอากาศให้มีคุณสมบัติเพื่อการตอบสนองที่ดีมากยิ่งขึ้น โดยการนำสายอากาศมาทำเป็นแถวลำดับเพื่อเพิ่มค่า การชี้ทิศทาง และ ค่าการขยาย ให้มีค่าตามต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อวิเคราะห์และศึกษา การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศช่องเปิดบนท่อนำคลื่นวงกลมปากเดียวในกรณี TE_{11} Mode กับ Uniform
2. จากนั้น ได้วิเคราะห์กรณีที่วางเป็นแถวลำดับวงกลม และวางเป็นแถววงกลมที่มีการปรับเฟสเพื่อเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่น
3. ทำการสร้างสายอากาศแบบช่องเปิดเดียว และแถวลำดับวงกลมที่ป้อนสัญญาณด้วย โพรบ เพื่อทำการทดสอบคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นเพื่อเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- สามารถศึกษา คำนวณ วิเคราะห์ ออกแบบ สร้าง และทดสอบการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศช่องเปิดบนท่อนำคลื่นวงกลมปากเดียวในกรณีองค์ประกอบเดียว กรณีวางเป็นแถวลำดับวงกลม และแถวลำดับวงกลมที่มีการปรับเฟสได้

1.4 ส่วนประกอบของโครงการ

โครงการฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยมีบทนำในบทที่ 1 เป็นการกล่าวแนะนำหลักการเบื้องต้น และวัตถุประสงค์ในการทำโครงการนี้ ส่วนรายละเอียดของบทต่างๆ อีก 4 บทมีดังต่อไปนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศ

บทที่ 3 การวิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบสายอากาศ

บทที่ 4 การสร้าง ทดสอบ และผลการทดสอบสายอากาศ

บทที่ 5 สรุป และวิจารณ์ผลการทดสอบ

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ (Essential Antenna Parameters)

2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นคือ รูปที่ใช้เพื่อเป็นตัวบอกว่า ทิศทางต่าง ๆ รอบตัวสายอากาศ สายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นอย่างไร มีอยู่ 2 แบบ คือ แบบ rectangular กับ แบบ polar ซึ่ง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แอมพลิจูด (amplitude) ของสนาม (field) หรือกำลังงาน (power) กับทิศทาง (direction) ของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งแสดงในรูปของมุม (angle) ในหน่วยองศา (degree) หรือเรเดียน (radian)

2.1.2 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน (ตลอดพื้นผิวทรงกลม) แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นกับสนามแม่เหล็กของสายอากาศในระยะไกล ได้ดังนี้

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} \left[|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.1)$$

เมื่อ E_θ, E_ϕ คือ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าในสนามระยะไกล

η คือ อินทรินสิคอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

2.1.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าการชี้ทิศทาง คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงว่า สายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่าง ๆ มากน้อยแค่ไหน ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_0 = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \quad (2.2)$$

เมื่อ

U_{\max} คือ ค่าสูงสุดของความเข้มการแพร่กระจายคลื่น

P_{rad} คือ กำลังงานที่แพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.1.4 การเข้าหากันได้ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ (Matching Impedance)

การเข้าหากันได้ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ จะเป็นตัวบอกว่า คลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด (source) นั้น สามารถจะถูกส่งผ่านสายอากาศออกไปได้หมดหรือไม่ โดยพิจารณาถึงองค์ประกอบที่สำคัญ 2 อย่าง คือ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (input Impedance) ของสายอากาศ และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic Impedance) ของสายนำสัญญาณ (transmission line)

2.1.5 ความกว้างของลำคลื่นที่กึ่งงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam width : HPBW)

คือ มุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มการแผ่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด โดยจะวัดในหน่วยองศา (degree)

2.1.6 อัตราขยาย (Gain)

คือ ความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าการชี้ทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ประสิทธิภาพของสายอากาศจะประกอบด้วย ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ ประสิทธิภาพของตัวนำ และประสิทธิภาพของฉนวน

$$\text{Gain} = \text{Directivity} \times \text{Efficiency of antenna} \quad (2.4)$$

2.1.7 ค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อย (Side Lobe Ratio :SLR)

คือ อัตราส่วนระหว่างระดับลำคลื่นย่อยแรกต่อระดับลำคลื่นหลัก

$$\text{SLR} = \text{Side lobe level (dB)} - \text{Main lobe level (dB)} \quad (2.5)$$

2.1.8 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์คู่แรก (First Null Beam Width:FNBW)

คือ มุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มการแผ่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าลดลงเป็นศูนย์ โดยจะวัดในหน่วยองศา (degree)

จากรูป จะมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกซึ่งเปรียบเสมือนกับสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวนสายอากาศจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9 การโพลาไรซ์ (Polarization)

คือ ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบอกว่า เมื่อคลื่นเดินทางออกจากสายอากาศสนามไฟฟ้า (electric field) จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ประกอบไปด้วย

2.1.9.1 การโพลาไรซ์เชิงเส้น (linear polarization)

คือ เมื่อคลื่นเดินทาง สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอด แบ่งเป็นการโพลาไรซ์แนวตั้ง (vertical polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (horizontal polarization)

2.1.9.2 การโพลาไรซ์แบบวงกลม (circular polarization)

คือ เมื่อคลื่นเดินทาง สนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะวงกลมตลอด การเคลื่อนที่ของคลื่น แบ่งเป็น วงกลมหมุนขวา (right hand circular) และ วงกลมหมุนซ้าย (left hand circular)

2.1.9.3 การโพลาไรซ์แบบวงรี (elliptical polarization)

คือ เมื่อคลื่นเดินทาง สนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะวงรี

2.1.10 ช่วงกว้างความถี่ (Bandwidth : BW)

คือ ช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด หรือช่วงความถี่ที่สายอากาศยังคงมีคุณสมบัติต่างๆ อยู่ในช่วงใช้งานได้ เหมือนกับที่ใช้งานได้ เหมือนกับที่ออกแบบไว้ที่ความถี่กลางแบ่งเป็น

2.1.10.1 ช่วงกว้างความถี่แคบ (Narrow – band)

คือ ความถี่ที่มีช่วงความถี่ของความถี่ใช้งานน้อย

$$BW = \frac{f_H - f_L}{f_a} \times 100 \% \quad (2.6)$$

2.1.10.2 ช่วงความถี่กว้าง (Broadband)

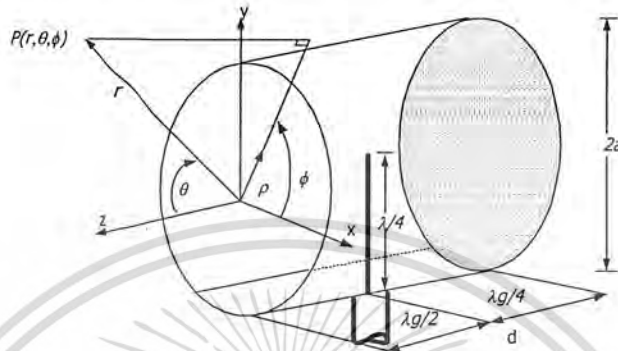
คือ ความถี่ที่มีช่วงความถี่ของความถี่ใช้งานมาก

$$BW = \frac{f_H}{f_L} : 1 \quad (2.7)$$

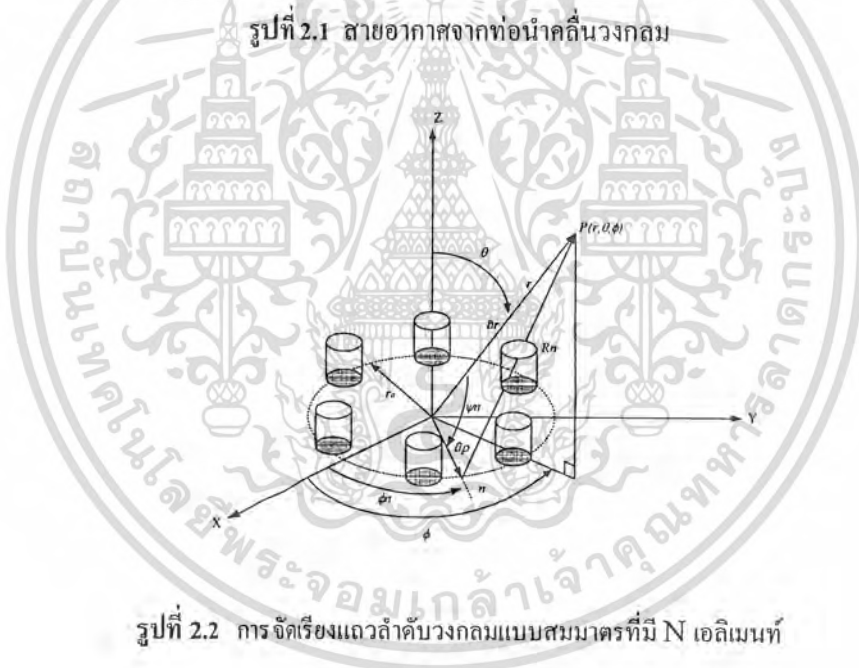
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ลักษณะทั่วไปของสายอากาศ

สายอากาศที่นำมาใช้จะประกอบด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นด้วยความยาว $\lambda/4$ ที่ต่อกับสายนำสัญญาณ แบบ coaxial โดยผ่านตัวต่อ (connector) แบบ SMA ซึ่งอยู่ภายในท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอก โดยมีรัศมีและความยาวของวงแหวนเป็น a และ d ตามลำดับ ซึ่งโพรบจะวางตัวตามแนวแกน y ดังรูป



รูปที่ 2.1 สายอากาศจากท่อนำคลื่นวงกลม



รูปที่ 2.2 การจัดเรียงแถวลำดับวงกลมแบบสมมาตรที่มี N เอลิเมนต์

ให้พิจารณาว่า ท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกซึ่งมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายในทิศทาง $+z$ และจะแพร่กระจายออกจากขอบของท่อนำคลื่นที่ช่องเปิดเพียงด้านเดียวสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากช่องเปิดนี้จะสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยโหมดคลื่น (mode) ต่าง ๆ มากมายที่อยู่ภายในท่อนำคลื่นทรงกระบอก ดังนั้น ความยาวของท่อนำคลื่นและรัศมีจึงถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อที่จะทำให้โหมดอื่น ๆ ถูกตัดออกไปได้เหลือเพียงโหมดคลื่นหลัก (dominant mode : TE_{11}) เพียงโหมดเดียว แต่อย่างไรก็ตาม บริเวณที่ใกล้กับโพรบก็ยังคงมีโหมดคลื่นอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สมการของสนามที่แพร่กระจายจากตัวสายอากาศ

2.3.1 สมการเวกเตอร์ของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา

(Vector Wave Equations of Time-Varying Electromagnetic field)

จากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) ในรูปของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times E = -M_i - \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\nabla \times H = J_i + \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.9)$$

ทำการเคิร์ล (curl) ทั้งสองข้างของสมการที่ 2.8 และ 2.9 โดยสมมุติให้อยู่ในตัวกลางเดียวกัน สามารถเขียนได้ใหม่ว่า

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times E &= -\nabla \times M_i - \mu \nabla \times \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) \\ &= -\nabla \times M_i - \mu \frac{\partial (\nabla \times H)}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times H &= \nabla \times J_i + \sigma \nabla \times E + \epsilon \nabla \times \left(\frac{\partial E}{\partial t} \right) \\ &= \nabla \times J_i + \sigma \nabla \times E + \epsilon \frac{\partial (\nabla \times E)}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.11)$$

แทนสมการที่ 2.9 ลงในด้านขวาของสมการ ที่ 2.10 และใช้คุณสมบัติลาปลาเซียนของเวกเตอร์ (Laplacian of vector) ที่แสดงได้ดังนี้

$$\nabla^2 F = \nabla (\nabla \cdot F) - \nabla \times \nabla \times F \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \nabla \times F = \nabla (\nabla \cdot F) - \nabla^2 F \quad (2.13)$$

แล้วแทนสมการที่ 2.13 ลงในด้านซ้ายของสมการ ที่ 2.10 ได้ว่า

$$\begin{aligned} \nabla (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E &= -\nabla \times M_i - \mu \frac{\partial}{\partial t} \left[J_i + \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right] \\ \nabla (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E &= -\nabla \times M_i - \mu \frac{\partial J_i}{\partial t} - \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการแมกซ์เวลล์ที่แสดงในรูปความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \cdot D = \varepsilon \nabla \cdot E = q_{ev} \Rightarrow \nabla \cdot E = \frac{q_{ev}}{\varepsilon} \quad (2.15)$$

นำสมการที่ 2.15 แทนลงในสมการที่ 2.14 ได้ว่า

$$\nabla^2 E = \nabla \times M_i + \mu \frac{\partial J_i}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla q_{ev} + \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.16)$$

ในทำนองเดียวกัน แทนสมการที่ 2.8 ลงในด้านขวาของสมการที่ 2.11 และใช้คุณสมบัติลาปลาเซียนของเวกเตอร์ที่แสดงในสมการที่ 2.13 แทนลงในด้านซ้ายของสมการที่ 2.11 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \nabla(\nabla \cdot H) - \nabla^2 H &= \nabla \times J_i + \sigma \left(-M_i - \mu \frac{\partial H}{\partial t} \right) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(-M_i - \mu \frac{\partial H}{\partial t} \right) \\ \nabla(\nabla \cdot H) - \nabla^2 H &= \nabla \times J_i - \sigma M_i - \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial M_i}{\partial t} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.17)$$

จากสมการแมกซ์เวลล์ที่แสดงในรูปความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \cdot B = \mu \nabla \cdot H = q_{mv} \Rightarrow \nabla \cdot H = \left(\frac{q_{mv}}{\mu} \right) \quad (2.18)$$

นำสมการที่ 2.18 แทนลงในสมการที่ 2.17 จะได้ว่า

$$\nabla^2 H = -\nabla \times J_i + \sigma M_i + \frac{1}{\mu} \nabla(q_{mv}) + \varepsilon \frac{\partial M_i}{\partial t} + \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ 2.16 และ 2.19 จะถูกเรียกว่าสมการเวกเตอร์ของคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ

สำหรับสภาวะที่เป็นอิสระจากแหล่งจ่าย (source-free) และตัวกลางที่ไม่เกิดการสูญเสีย (lossless media) จะได้ว่า

$$J_i = q_{ev} = M_i = q_{mv} = 0, \sigma = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น รูปแบบของสมการเวกเตอร์ของคลื่นสำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสมการที่ 2.16 และ 2.19 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla^2 E = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.20)$$

$$\nabla^2 H = \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

โดยทั่วไปแล้วสมการที่ 2.20 และ 2.21 จะเป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดสำหรับสมการเวกเตอร์ของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

2.3.2 สมการเวกเตอร์ของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลาแบบฮาร์มอนิกส์

(Vector Wave Equations of Time-Harmonic Electromagnetic field)

สำหรับสนามที่แปรผันกับเวลาแบบฮาร์มอนิกส์ หมายถึง เวลาที่มีการแปรผันในรูปแบบของ $e^{j\omega t}$ ดังนั้น สามารถที่จะหาสมการเวกเตอร์ของคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เช่นเดียวกับกรณีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา โดยกำหนดให้

$$\frac{\partial}{\partial t} \Leftrightarrow j\omega$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \Leftrightarrow (j\omega)^2 = -\omega^2$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.16, 2.19, 2.20 และ 2.21 สามารถแสดงได้ว่า

$$\nabla^2 E = \nabla \times M_i + j\omega\mu J_i + \frac{1}{\epsilon} \nabla q_{cv} + j\omega\mu\sigma E - \omega^2 \mu\epsilon E \quad (2.22)$$

$$\nabla^2 H = -\nabla \times J_i + \sigma M_i + j\omega\epsilon M_i + \frac{1}{\mu} \nabla q_{mv} + j\omega\mu\sigma H - \omega^2 \mu\epsilon H \quad (2.23)$$

$$\nabla^2 E = -\omega^2 \mu\epsilon E = -k^2 E \quad (2.24)$$

$$\nabla^2 H = -\omega^2 \mu\epsilon H = -k^2 H \quad (2.25)$$

เมื่อ

$$k^2 = \omega^2 \mu\epsilon$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ k คือ ค่าคงที่ทาง เฟส (phase constant)

2.3.3 การหาคำตอบจากสมการเวกเตอร์ของคลื่นสำหรับระบบพิกัดทรงกระบอก

เมื่อพิจารณาสมการเวกเตอร์ของคลื่นสำหรับสภาวะที่เป็นอิสระจากแหล่งจ่าย (source-free) และตัวกลางที่ไม่เกิดการสูญเสีย (lossless media) ของสนามไฟฟ้าในระบบพิกัดทรงกระบอก สามารถแสดงได้ดังนี้

จาก

$$E(\rho, \phi, z) = \hat{a}_\rho E_\rho(\rho, \phi, z) + \hat{a}_\phi E_\phi(\rho, \phi, z) + \hat{a}_z E_z(\rho, \phi, z) \quad (2.26)$$

เมื่อ ρ, ϕ, z คือ ค่าในพิกัดทรงกระบอก

เมื่อแทนในสมการที่ 2.26 ลงในสมการที่ 2.20 จะได้ว่า

$$\nabla^2 (\hat{a}_\rho E_\rho + \hat{a}_\phi E_\phi + \hat{a}_z E_z) = -k^2 (\hat{a}_\rho E_\rho + \hat{a}_\phi E_\phi + \hat{a}_z E_z) \quad (2.27)$$

จากสมการที่ 2.27 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ว่า

$$\nabla^2 E = -k^2 E \quad (2.28)$$

จากคุณสมบัติลาปลาเซียนของเวกเตอร์ (Laplacian of Vector) สามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} \nabla^2 E &= \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla \times \nabla \times E \\ \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla \times \nabla \times E &= -k^2 E \end{aligned} \quad (2.29)$$

เมื่อแทนสนามไฟฟ้าที่อยู่ในสมการที่ 2.26 ลงในสมการที่ 2.29 จะได้คำตอบที่อยู่ในรูปแบบดังต่อไปนี้

$$\nabla^2 E_\rho + \left(-\frac{E_\rho}{\rho^2} - \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial E_\phi}{\partial \phi} \right) = -k^2 E_\rho \quad (2.30)$$

$$\nabla^2 E_\phi + \left(-\frac{E_\phi}{\rho^2} - \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial E_\rho}{\partial \phi} \right) = -k^2 E_\phi \quad (2.31)$$

$$\nabla^2 E_z = -k^2 E_z \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\nabla^2 \varphi(\rho, \phi, z)$ คือ ลاپลาเซียนของสเกลาร์ (Laplacian of Scalar) ซึ่งมีค่าในระบบพิกัดทรงกระบอกดังนี้

$$\begin{aligned}\nabla^2 \varphi(\rho, \phi, z) &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \\ &= \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}\end{aligned}\quad (2.33)$$

จากสมการที่ 2.30 และ 2.31 จะมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้า มากกว่า 1 องค์ประกอบ ซึ่งยากต่อการหาคำตอบ ดังนั้นเราจะใช้สมการ ที่ 2.32 ซึ่งมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าเพียงองค์ประกอบเดียวในการหาคำตอบจากสมการคลื่น

จากสมการที่ 2.32 สามารถเขียนได้ใหม่แสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 F}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = -k^2 F \quad (2.34)$$

เมื่อ $F(\rho, \phi, z)$ คือฟังก์ชันของสเกลาร์ (Scalar function) ที่แสดงถึงศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า (Electric vector potential) และสมมติให้ศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้านี้มีคำตอบที่อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$F(\rho, \phi, z) = f(\rho)g(\phi)h(z) \quad (2.35)$$

แทนค่าสมการที่ 2.35 ลงในสมการที่ 2.34 จะได้ว่า

$$gh \frac{\partial^2 f}{\partial \rho^2} + gh \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} + fh \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 g}{\partial \phi^2} + fg \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = -k^2 fgh \quad (2.36)$$

หารทั้งสองข้างของสมการด้วย fgh และเปลี่ยน $\frac{\partial}{\partial x} \Rightarrow \frac{d}{dx}$ จากสมการที่ 2.36 สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{1}{f} \frac{d^2 f}{d\rho^2} + \frac{1}{f} \frac{1}{\rho} \frac{df}{d\rho} + \frac{1}{g} \frac{1}{\rho^2} \frac{d^2 g}{d\phi^2} + \frac{1}{h} \frac{d^2 h}{dz^2} = -k^2 \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่าในแต่ละพจน์ของสมการที่ 2.37 และเป็นฟังก์ชันของตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวเท่านั้น ดังนั้น ผลรวมของทุกพจน์จะมีค่าเท่ากับ $-k^2$ ก็ต่อเมื่อค่าของแต่ละพจน์จะต้องเป็นค่าคงที่ (constant) จะได้ว่า

$$\frac{1}{h} \frac{d^2 h}{dz^2} = -k_z^2 \Rightarrow \frac{d^2 h}{dz^2} = -k_z^2 h \quad (2.38)$$

เมื่อ k_z คือ ค่าคงที่ (constant)

นำสมการที่ 2.38 แทนลงในสมการที่ 2.37 แล้วคูณทั้งสองข้างของสมการด้วย ρ^2 จะได้ว่า

$$\frac{\rho^2}{f} \frac{d^2 f}{d\rho^2} + \rho \frac{df}{f d\rho} + \frac{1}{g} \frac{d^2 g}{d\phi^2} + (k^2 - k_z^2) \rho^2 = 0 \quad (2.39)$$

เนื่องจากพจน์ที่ 3 ของสมการที่ 2.39 เป็นฟังก์ชันของ ϕ เพียงอย่างเดียว ดังนั้นสามารถที่จะกำหนดให้เท่ากับค่าคงที่ใดๆ ได้ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{1}{g} \frac{d^2 g}{d\phi^2} = -m^2 \Rightarrow \frac{d^2 g}{d\phi^2} = -m^2 g \quad (2.40)$$

และกำหนดให้

$$k^2 - k_z^2 = k_\rho^2 \Rightarrow k_\rho^2 + k_z^2 = k^2 \quad (2.41)$$

นำสมการที่ 2.40 แทนลงในสมการที่ 2.39 จะได้ว่า

$$\rho^2 \frac{d^2 f}{d\rho^2} + \rho \frac{df}{d\rho} + \left[(k_\rho \rho)^2 - m^2 \right] f = 0 \quad (2.42)$$

จากสมการที่ 2.41 จะถูกเรียกได้ว่าเป็นสมการจำกัด (constraint equation) สำหรับคำตอบที่ได้จากสมการคลื่นในระบบพิกัดทรงกระบอก และสมการที่ 2.42 จะถูกเรียกว่า เป็น สมการเชิงอนุพันธ์ของเบสเซล (Bessel differential equation)

ดังนั้น คำตอบที่ได้จากสมการที่ 2.34 โดยการสมมุติคำตอบดังสมการที่ 2.35 สามารถแสดงได้ตั้ง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho^2 \frac{d^2 f}{d\rho^2} + \rho \frac{df}{d\rho} + \left[(k_\rho \rho)^2 - m^2 \right] f = 0 \quad (2.43)$$

$$\frac{d^2 g}{d\phi^2} = -m^2 g \quad (2.44)$$

$$\frac{d^2 h}{dz^2} = -k_z^2 h \quad (2.45)$$

โดยที่

$$k_\rho^2 + k_z^2 = k^2$$

และคำตอบที่ได้จากสมการที่ 2.43, 2.44 และ 2.45 สามารถแสดงได้ดังนี้ ตามลำดับ

$$f_1(\rho) = A_1 J_m(k_\rho \rho) + B_1 Y_m(k_\rho \rho) \quad (2.46)$$

หรือ

$$f_2(\rho) = C_1 H_m^{(1)}(k_\rho \rho) + D_1 H_m^{(2)}(k_\rho \rho) \quad (2.47)$$

และ

$$g_1(\phi) = A_2 e^{-jm\phi} + B_2 e^{+jm\phi} \quad (2.48)$$

หรือ

$$g_2(\phi) = C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi) \quad (2.49)$$

และ

$$h_1(z) = A_3 e^{-jk_z z} + B_3 e^{+jk_z z} \quad (2.50)$$

หรือ

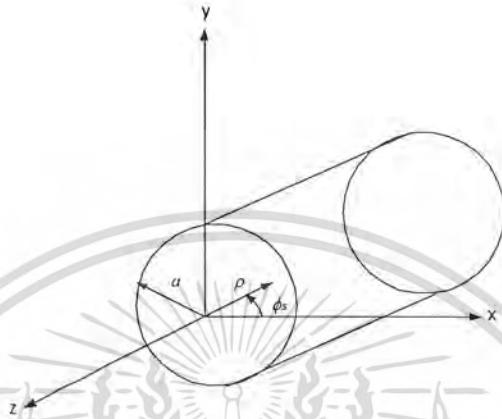
$$h_2(z) = C_3 \cos(k_z z) + D_3 \sin(k_z z) \quad (2.51)$$

โดยที่

$J_m(k_\rho \rho)$	คือ	ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่ 1
$Y_m(k_\rho \rho)$	คือ	ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่ 2
$H_m^{(1)}(k_\rho \rho)$	คือ	ฟังก์ชันแฮงเกิล (Hankel function) ชนิดที่ 1
$H_m^{(2)}(k_\rho \rho)$	คือ	ฟังก์ชันแฮงเกิล (Hankel function) ชนิดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้ว สำหรับท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอก (Cylindrical waveguide) ดังรูปที่ 2.2 นั้น คำตอบที่ได้จากสมการเวกเตอร์ของคลื่นที่เหมาะสมมากที่สุดสำหรับท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่แสดงในรูปที่ 2.2 นั้น สามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 ท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่ระนาบ $z = 0$

$$\begin{aligned}
 F(\rho, \phi, z) &= f(\rho)g(\phi)h(z) \\
 &= \left[A_1 J_m(k_\rho \rho) + B_1 Y_m(k_\rho \rho) \right] \\
 &\quad \times \left[C_2 \cos(m\phi_s) + D_2 \sin(m\phi_s) \right] \left[A_3 e^{-jk_z z} + B_3 e^{+jk_z z} \right] \quad (2.52)
 \end{aligned}$$

2.3.4 สนามที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวน (Aperture Field)

จากคำตอบที่ได้จากสมการเวกเตอร์ของคลื่นในสมการที่ 2.52 นั้น สามารถที่จะนำมาใช้หาสนามที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวนในตัวสายอากาศได้ โดยกำหนดค่าคงที่ต่างๆ ที่อยู่ในสมการที่ 2.52 ให้เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ระหว่างตัวนำไฟฟ้า กับสูญญากาศสามารถแสดงได้ดังนี้

1. สนามทั้งหมดที่แพร่กระจายออกจากตัวนำไฟฟ้าจะต้องมีค่าจำกัด ดังนั้น $B_1 = 0$ เพราะที่ $Y_m(\rho = 0) = \infty$ ซึ่งไม่เป็นจริงตามเงื่อนไข
2. สนามทั้งหมดที่แพร่กระจายออกจากตัวนำไฟฟ้าจะต้องมีค่าเหมือนเดิมทุกๆ ค่าของมุม ϕ_s ที่มีค่าเท่ากับ 2π ดังนั้น m จะต้องเป็นค่าจำนวนเต็มเพื่อให้ค่าของสนามมีค่าคงเดิมเมื่อมุม ϕ_s มีค่าเปลี่ยนไปทุกๆ 2π ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่า C และ D เป็นค่าคงที่ใดๆที่อาจจะให้ C หรือ D มีค่าเท่ากับศูนย์ก็ได้ แต่ C และ D จะมีค่าเป็นศูนย์ทั้งสองตัวไม่ได้ เพราะจะทำให้สนามทั้งหมดมีค่าเป็นศูนย์ นั่นหมายความว่าไม่มีสนามแพร่กระจายออกมาจากท่อ นำคลื่นเลย ซึ่งไม่เป็นจริง ดังนั้นเพื่อไม่ให้สนามมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อมีค่าเท่ากับศูนย์ จะกำหนดให้

$$C \neq 0, D = 0$$

4. เนื่องจากสนามที่แพร่กระจายออกมาจากท่อนำคลื่น จะเดินทางในทิศทางแนวแกน $+z$ ดังนั้น จะสนใจในพจน์ของ $e^{-jk_z z}$ เท่านั้น และเมื่อคิดในสนามที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของท่อนำคลื่นที่ระนาบ $z=0$ จะได้ว่า

$$B_3 = 0, e^{-jk_z z} \Big|_{z=0} = 1$$

5. ค่าของ k_ρ สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$k_\rho = \frac{X'_{mn}}{a}$$

โดยที่

X'_{mn} คือ ค่าที่ทำให้อนุพันธ์ ของฟังก์ชัน เบสเซล ชนิดที่ 1 (J_m) ลำดับที่ m ($m=0,1,2,3,\dots$) มีค่าเท่ากับศูนย์เป็นครั้งที่ n ($n=0,1,2,3,\dots$)

จะเห็นได้ว่าในกรณีของโหมดคลื่นหลัก (TE_{11}) คือ $m=1, n=1$ จะได้ค่าของ X'_{mn} มีค่าเท่ากับ 1.8412

$$k_\rho \Big|_{TE_{11}} = \frac{1.8412}{a}$$

เมื่อนำเงื่อนไขทั้งหมดข้างต้นแทนลงในสมการที่ 2.52 จะได้ว่า

$$F_z^+(\rho, \phi, z) = A_1 J_m(k_\rho \rho) \cdot C_2 \cos(m\phi_s) \cdot A_3 \quad (2.53)$$

เมื่อ $F_z^+(\rho, \phi, z)$ คือ ศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า ของสนามที่แพร่กระจายออกมา ในแนวแกน $+z$ ของระบบพิกัดทรงกระบอก

ในกรณีของรูปแบบคลื่นหลัก (TE_{11}) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_z^+(\rho, \phi, z) = A_1 J_1\left(\frac{1.8412\rho}{a}\right) C_2 \cos(\phi_s) A_3 \quad (2.54)$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned} A_m &= A_1 A_3 \\ C_2 &= 1 \end{aligned}$$

โดยที่ A_m คือ ค่าที่ถูกกำหนดจากค่าตั้งคลื่นที่ส่งผ่านเข้าไปในท่อนำคลื่นของแต่ละโหมดคลื่น จะได้ว่า

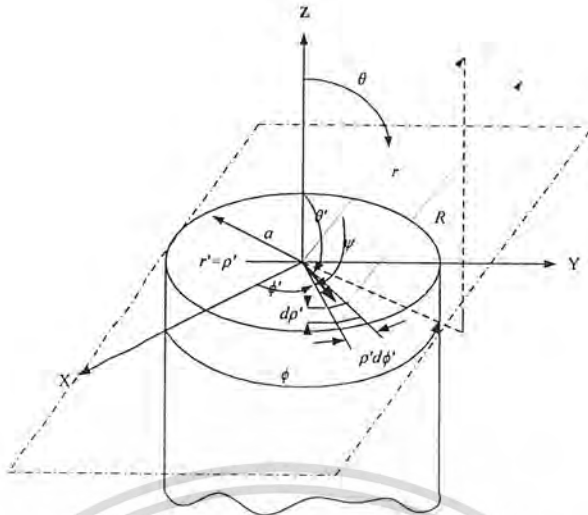
$$F_z^+(\rho, \phi, z) = A_1 J_1\left(\frac{1.8412\rho}{a}\right) \cos(\phi_s) \quad (2.55)$$

จากส่วนประกอบของสนามที่เกิดขึ้น โดยมีโหมดคลื่นเป็นโหมด TE_{11} (Transverse Electric mode) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ของคลื่นในทิศทางแนวแกน z สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_\rho &= -\frac{1}{\epsilon\rho} \frac{\partial F_z}{\partial \phi} & H_\rho &= -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \frac{\partial^2 F_z}{\partial \rho \partial z} \\ E_\phi &= \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial F_z}{\partial \rho} & H_\phi &= -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon\rho} \frac{\partial^2 F_z}{\partial \phi \partial z} \\ E_z &= 0 & H_z &= -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) F_z \end{aligned}$$

เนื่องจากแหล่งกำเนิด (source) ที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่นนั้นเป็นโพรบ (probe) เชิงเส้นไฟฟ้า ดังนั้นส่วนประกอบของสนามที่เกิดขึ้น จะสนใจเฉพาะส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าเท่านั้น เมื่อนำสมการที่ 2.55 แทนลงไปในส่วนประกอบของสนามไฟฟ้า ที่แสดงไว้ข้างต้นจะได้ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 โดยคิดที่มุม ϕ_s จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่มีช่องเปิดแบบวงกลมบนระนาบ $z=0$

$$E_\rho = -\frac{1}{\epsilon\rho} \frac{\partial}{\partial \phi_s} \left[A_{11} J_1 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \cos(\phi_s) \right] \quad (2.56)$$

$$E_\rho = \frac{1}{\epsilon\rho} A_{11} J_1 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \sin(\phi_s) \quad (2.57)$$

$$E_\phi = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[A_{11} J_1 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \cos(\phi_s) \right] \quad (2.58)$$

$$E_\phi = \frac{1}{\epsilon} \frac{1.8412}{a} A_{11} J_1' \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \cos(\phi_s) \quad (2.59)$$

$$E_z = 0 \quad (2.60)$$

ดังนั้น จะมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอก ซึ่งเปรียบเสมือนกับสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวนของตัวสายอากาศได้ดังนี้

$$E_\rho = \frac{1}{\epsilon\rho} A_{11} J_1 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \sin(\phi_s) \quad (2.61)$$

$$E_\phi = \frac{1}{\epsilon} \frac{1.8412}{a} A_{11} J_1' \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \cos(\phi_s) \quad (2.62)$$

$$E_z = 0 \quad (2.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$' = \frac{\partial}{\partial \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right)}$$

2.3.5 สนามที่แพร่กระจายออกจากตัวสายอากาศ (Radiation Field)

จากสนามที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวน เราสามารถหาสนามที่แพร่กระจายออกจากตัวสายอากาศได้ โดยพิจารณาจากสนามที่ระยะไกลของสนามที่แพร่กระจายจากท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่ระนาบ $z=0$

จากส่วนประกอบของสนามที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวน จะพบว่า ส่วนประกอบของสนาม ในแนวแกน z จะมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้น จะพิจารณาเฉพาะส่วนประกอบของสนามที่เหลืออยู่สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_\rho = \frac{1}{\epsilon \rho} A_{11} J_1 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \sin(\phi_s) \quad (2.64)$$

$$E_\phi = \frac{1}{\epsilon} \frac{1.8412}{a} A_{11} J_1' \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \cos(\phi_s) \quad (2.65)$$

ทำการแปลงส่วนประกอบของสนามที่ได้ในสมการที่ 2.64 และ 2.65 ให้อยู่ในระบบพิกัดมุมฉาก (Rectangular coordinate) โดยใช้คุณสมบัติดังนี้

$$E_x = E_\rho \cos(\phi_s) - E_\phi \sin(\phi_s) \quad (2.66)$$

$$E_y = E_\rho \sin(\phi_s) + E_\phi \cos(\phi_s) \quad (2.67)$$

จะได้ว่า

$$E_x = \frac{A_{11}}{\epsilon \rho} \sin(\phi_s) \cos(\phi_s) \times \left\{ \frac{1}{\rho} J_1 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) - \frac{1.8412}{a} J_1' \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \right\} \quad (2.68)$$

จากคุณสมบัติของฟังก์ชันเบสเซลที่แสดงได้ดังนี้

$$\frac{m}{u} J_m(u) = \frac{1}{2} [J_{m-1}(u) + J_{m+1}(u)] \quad (2.69)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{m}{u} \frac{dJ_m(u)}{du} = \frac{1}{2} [J_{m-1}(u) - J_{m+1}(u)] \quad (2.70)$$

จะได้ว่า

$$E_x = \frac{A_{11}}{\mathcal{E}} \frac{1.8412}{2a} J_2 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \sin(2\phi_s) \quad (2.71)$$

ในทำนองเดียวกันกับสำหรับ E_y จะได้ว่า

$$E_y = \frac{A_{11}}{\mathcal{E}} \frac{1.8412}{2a} \left\{ J_0 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) - J_2 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \cos(2\phi_s) \right\} \quad (2.72)$$

จากคุณสมบัติการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) 2 มิติ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$f_i(k_x, k_y) = \iint_{S'} E_n(x, y) e^{jk_x x + jk_y y} dx dy \quad (2.73)$$

เนื่องจากพื้นที่ที่ใช้ในปฏิยานุพันธ์นั้นเป็นพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอก ที่ระนาบ $z=0$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ x &= \rho \cos(\phi_s) \\ y &= \rho \sin(\phi_s) \\ dx dy &= \rho d\rho d\phi_s \end{aligned} \quad (2.74)$$

และจากการสังเกตที่สนามระยะไกล จะกำหนดให้

$$\begin{aligned} k_x &= k_0 \sin(\theta) \cos(\phi) \\ k_y &= k_0 \sin(\theta) \sin(\phi) \end{aligned} \quad (2.75)$$

นำสมการที่ 2.76, 2.77, 2.78 และ 2.79 แทนลงในสมการที่ 2.80 โดยที่

$$E_n(x, y) = E_x \hat{a}_x + E_y \hat{a}_y \quad (2.76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกำหนดให้

$$M = \frac{A_1 1.8412}{\mathcal{E} 2a} \quad (2.77)$$

จะได้ว่า

$$f_t(x, y) = M \left[\int_0^a \int_0^{2\pi} J_2 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \sin(2\phi_s) e^{jk_0 \rho \sin \theta \cos(\phi - \phi_s)} \rho d\phi_s d\rho \hat{a}_x \right. \\ \left. + \int_0^a \int_0^{2\pi} J_0 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) e^{jk_0 \rho \sin \theta \cos(\phi - \phi_s)} \rho d\phi_s d\rho \hat{a}_y \right. \\ \left. - \int_0^a \int_0^{2\pi} J_2 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) \cos(2\phi_s) e^{jk_0 \rho \sin \theta \cos(\phi - \phi_s)} \rho d\phi_s d\rho \hat{a}_y \right] \quad (2.78)$$

จากคุณสมบัติที่แสดงได้ดังนี้

$$e^{jw \cos(\phi - \phi')} = J_0(w) - 2 \left[J_2(w) \cos 2(\phi - \phi') - J_4(w) \cos 4(\phi - \phi') + \dots \right] \\ + 2j \left[J_1(w) \cos 2(\phi - \phi') - J_3(w) \cos 4(\phi - \phi') + \dots \right] \quad (2.79)$$

เมื่อพิจารณาการปฏิยานุพันธ์เทียบกับมุม เมื่อแทนสมการที่ 2.79 ลงในสมการที่ 2.78 จะได้ว่า

$$f_t(x, y) = M \left[-2\pi \sin(2\phi) \int_0^a \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \hat{a}_x \right. \\ \left. + 2\pi \int_0^a \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) J_0(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \hat{a}_y \right. \\ \left. + 2\pi \cos(2\phi) \int_0^a \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \hat{a}_y \right] \quad (2.80)$$

จากรูปแบบของสนามทั้งหมดที่แพร่กระจายโดยการสังเกตที่สนามระยะไกล สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_r = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} \left[\hat{a}_\theta \{ f_x \cos(\phi) + f_y \sin(\phi) \} + \hat{a}_\phi \cos(\theta) \{ f_y \cos(\phi) \right. \\ \left. - f_x \sin(\phi) \} \right] \quad (2.81)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.80 และ 2.81 จะกำหนดให้ f_x เป็นค่าที่อยู่ในพจน์ของ \hat{a}_x และ f_y เป็นค่าที่อยู่ในพจน์ของ \hat{a}_y และให้ E_θ เป็นค่าที่อยู่ในพจน์ของ \hat{a}_θ และ E_ϕ เป็นค่าที่อยู่ในพจน์ของ \hat{a}_ϕ

เมื่อพิจารณาในพจน์ของ E_θ จะได้ว่า

$$E_\theta = jk_0 \frac{e^{jk_0 r}}{2\pi r} M \left[-2\pi \sin(2\phi) \cos(\phi) \int_0^a J_2 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right. \\ \left. + 2\pi \sin(\phi) \int_0^a J_0 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) J_0(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right. \\ \left. + 2\pi \cos(2\phi) \sin(\phi) \int_0^a J_2 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right] \quad (2.82)$$

ถ้ากำหนดให้

$$N = jk_0 \frac{e^{jk_0 r}}{2\pi r} \quad (2.83)$$

และใช้คุณสมบัติที่แสดงได้ดังนี้

$$\sin(x - y) = \sin(x) \cos(y) - \cos(x) \sin(y) \quad (2.84)$$

เมื่อนำสมการ 2.83 และ 2.84 แทนลงในสมการที่ 2.82 จะได้ว่า

$$E_\theta = 2NM\pi \sin(\phi) \left[\int_0^a J_0 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) J_0(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right. \\ \left. - \int_0^a J_2 \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right] \quad (2.85)$$

จากรูปแบบการทำปฏิยานุพันธ์ของเบสเซลฟังก์ชัน ที่แสดงได้ดังนี้

$$\int_0^a J_n(k_1 r) J_n(k_2 r) r dr = \frac{a}{k_1^2 - k_2^2} \left[k_2 J_n(k_1 a) J_{n-1}(k_2 a) \right.$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-k_1 J_{n-1}(k_1 a) J_n(k_2 a) \quad (2.86)$$

และ

$$J_{-n} = (-1)^n J_n(n) \quad (2.87)$$

จะได้ว่า

$$E_\theta = 2NM\pi \sin(\phi) \frac{a^3}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \left[\left\{ -k_0 \sin(\theta) J_0(1.8412) J_1(k_0 a \sin(\theta)) + \frac{1.8412}{a} J_1(1.8412) J_0(k_0 a \sin(\theta)) \right\} - \left\{ k_0 \sin(\theta) J_2(1.8412) J_1(k_0 a \sin(\theta)) - \frac{1.8412}{a} J_1(1.8412) J_2(k_0 a \sin(\theta)) \right\} \right] \quad (2.88)$$

จากสมการที่ 2.69 สามารถเขียนสมการที่ 2.88 ได้ใหม่ดังนี้

$$E_\theta = 2NM\pi \sin(\phi) \frac{2a^2}{(1.8412)(k_0 \sin(\theta))} J_1(1.8412) J_1(k_0 a \sin(\theta)) \quad (2.89)$$

เมื่อแทนค่า N และ M ลงในสมการที่ 2.89 จะได้ว่า

$$E_\theta = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{\epsilon r} A_1 a \sin(\phi) J_1(1.8412) \frac{J_1(k_0 a \sin(\theta))}{k_0 a \sin(\theta)} \quad (2.90)$$

เช่นเดียวกันสำหรับ E_ϕ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_\phi = jk_0 \frac{e^{jk_0 r}}{2\pi r} M \left[2\pi \cos(\phi) \cos(\theta) \int_0^a \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) J_0(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho + 2\pi \cos(\phi) \cos(2\phi) \cos(\theta) \int_0^a \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho + 2\pi \sin(2\phi) \sin(\phi) \cos(\theta) \int_0^a \left(\frac{1.8412 \rho}{a} \right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right] \quad (2.91)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.83 ความสัมพันธ์ที่สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\cos(x-y) = \cos(x)\cos(y) + \sin(x)\sin(y) \quad (2.92)$$

จะได้ว่า

$$E_\phi = 2NM\pi \cos(\phi)\cos(\theta) \left[\int_0^a J_0\left(\frac{1.8412\rho}{a}\right) J_0(k_0\rho\sin(\theta)) \rho d\rho + \int_0^a J_2\left(\frac{1.8412\rho}{a}\right) J_2(k_0\rho\sin(\theta)) \rho d\rho \right] \quad (2.93)$$

จากสมการที่ 2.86 และ 2.87 จะได้ว่า

$$E_\phi = 2NM\pi \cos(\theta)\cos(\phi) \frac{a^3}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \left[\left\{ -k_0 \sin(\theta) J_0(1.8412) \times J_1(k_0 a \sin(\theta)) + \frac{1.8412}{a} J_1(1.8412) J_0(k_0 a \sin(\theta)) \right\} + k_0 \sin(\theta) \times J_2(1.8412) J_1(k_0 a \sin(\theta)) - \frac{1.8412}{a} J_1(1.8412) J_2(k_0 a \sin(\theta)) \right] \quad (2.94)$$

จากสมการที่ 2.70 และใช้คุณสมบัติที่แสดงได้ดังนี้

$$\left. \frac{dJ_n(k_c r)}{dr} \right|_{r=a} = 0 \quad (2.95)$$

โดยที่

$$k_c = \frac{k'_{mn}}{a} \quad (2.96)$$

ซึ่งในกรณีของโหมดคลื่นหลัก TE_{11} ค่าของ k'_{mn} จะมีค่าเท่ากับ 1.8412

ดังนั้น สมการที่ 2.94 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$E_\phi = 2NM\pi \cos(\theta)\cos(\phi) \frac{a^3}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} (1.8412) J_1(1.8412) \times \frac{dJ_1(k_0 a \sin(\theta))}{d(k_0 a \sin(\theta))} \quad (2.97)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่า M และ N ลงในสมการที่ 2.97 จะได้ว่า

$$E_\phi = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{\mathcal{E}r} A_1 a \cos(\theta) \cos(\phi) \frac{(1.8412)^2 J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \times \frac{dJ_1(k_0 a \sin(\theta))}{d(k_0 a \sin(\theta))} \tag{2.98}$$

ดังนั้นสนามที่แพร่กระจายออกจากท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่ระนาบ $z=0$ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_\theta = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{\mathcal{E}r} A_1 a \sin(\phi) J_1(1.8412) \frac{J_1(k_0 a \sin(\theta))}{k_0 a \sin(\theta)} \tag{2.99}$$

$$E_\phi = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{\mathcal{E}r} A_1 a \cos(\theta) \cos(\phi) \frac{(1.8412)^2 J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \times \frac{dJ_1(k_0 a \sin(\theta))}{d(k_0 a \sin(\theta))} \tag{2.100}$$

เนื่องจากโครงงานนี้จะเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการกระจายสนามในกรณี TE₁₁ Mode กับกรณีของ Uniform ซึ่งในการกระจายสนามแบบ Uniform สามารถที่จะพิสูจน์ได้ดังนี้

จากรูปที่ 2.4 เราสามารถหาสนามที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวนได้ โดยใช้วิธีการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ โดยที่สนามบริเวณเหนือช่องเปิดของวงแหวนสามารถกำหนดได้ตามเงื่อนไขดังนี้

$$E_a = \hat{a}_x E_0 \quad \rho' \leq a \tag{2.101}$$

เมื่อ

$$E_0 = \text{ค่าคงที่}$$

โดยที่มีค่า

$$M_s = \begin{cases} -2\hat{n} \times E_a = \hat{a}_x 2E_0 \dots \dots \rho' \leq a \\ 0 \dots \dots \dots \text{elsewhere} \end{cases} \\ J_s = 0 \dots \dots \dots \text{everywhere} \tag{2.102}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการของสนามไฟฟ้า (The total E-fields)

$$E_r \approx 0 \quad (2.103a)$$

$$E_\theta \approx -j \frac{ke^{-jkr}}{4\pi r} (L_\theta + \eta N_\theta) \quad (2.103b)$$

$$E_\phi \approx +j \frac{ke^{-jkr}}{4\pi r} (L_\phi - \eta N_\phi) \quad (2.103c)$$

โดยที่มีค่า

$$N_\theta = \iint_s [J_\rho \cos\theta \cos(\phi - \phi') + J_\phi \cos\theta \sin(\phi - \phi') - J_z \sin\theta] \times e^{+jkr' \cos\varphi} ds' \quad (2.104a)$$

$$N_\phi = \iint_s [-J_\rho \sin(\phi - \phi') + J_\phi \cos(\phi - \phi')] e^{+jkr' \cos\varphi} ds' \quad (2.104b)$$

$$L_\theta = \iint_s [M_\rho \cos\theta \cos(\phi - \phi') + M_\phi \cos\theta \sin(\phi - \phi') - M_z \sin\theta] \times e^{+jkr' \cos\varphi} ds' \quad (2.104c)$$

$$L_\phi = \iint_s [-M_\rho \sin(\phi - \phi') + M_\phi \cos(\phi - \phi')] e^{+jkr' \cos\varphi} ds' \quad (2.104d)$$

เมื่อ $r' \cos\varphi$ และ ds' สามารถเขียนได้ดังนี้

$$r' \cos\varphi = x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi = \rho' \sin\theta \cos(\phi - \phi') \quad (2.105a)$$

$$ds' = dx' dy' = \rho' d\rho' d\phi' \quad (2.105b)$$

ดังนั้น

$$N_\theta = N_\phi = 0 \quad (2.106)$$

$$L_\theta = 2E_0 \cos\theta \cos\phi \int_0^a \rho' \left[\int_0^{2\pi} e^{+jk\rho' \sin\theta \cos(\phi - \phi')} d\phi' \right] d\rho' \quad (2.107)$$

เพราะว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_0^{2\pi} e^{+jk\rho'\sin\theta\cos(\phi-\phi')} d\phi' = 2\pi J_0(k\rho'\sin\theta) \quad (2.108)$$

เพราะฉะนั้นสมการ (2.107) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$L_\theta = 4\pi E_0 \cos\theta \cos\phi \int_0^a J_0(k\rho'\sin\theta) \rho' d\rho' \quad (2.109)$$

เมื่อ $J_0(t)$ คือ ฟังก์ชันเบสเซล ชนิดแรกอันดับศูนย์ ที่มีค่า

$$\begin{aligned} t &= k\rho'\sin\theta \\ dt &= k\sin\theta d\rho' \end{aligned} \quad (2.110a)$$

จากสมการที่ (2.109) จึงเขียนได้เป็น

$$L_\theta = \frac{4\pi E_0 \cos\theta \cos\phi}{(k\sin\theta)^2} \int_0^{k a \sin\theta} J_0(t) dt \quad (2.110b)$$

โดยที่

$$\int_0^\beta z J_0(z) dz = z J_1(z) \Big|_0^\beta = \beta J_1(\beta) \quad (2.111)$$

เมื่อ $J_1(\beta)$ คือฟังก์ชันเบสเซล อันดับที่หนึ่ง ที่ผ่านการอินทิเกรตแล้ว จากสมการที่ (2.110b) เราจึงได้สมการใหม่เป็น

$$L_\theta = 4\pi a^2 E_0 \left\{ \cos\theta \cos\phi \left[\frac{J_1(ka\sin\theta)}{ka\sin\theta} \right] \right\} \quad (2.112)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$L_\phi = -4\pi a^2 E_0 \sin\phi \left[\frac{J_1(ka\sin\theta)}{ka\sin\theta} \right] \quad (2.113)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (2.106), (2.112), และ (2.113) ลงในสมการสนามไฟฟ้า (2.103a) - (2.103c) จึงเขียนได้เป็น

$$E_r = 0 \quad (2.114a)$$

$$E_\theta = j \frac{ka^2 E_0 e^{-jkr}}{r} \left\{ \sin \phi \left[\frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \right\} \quad (2.114b)$$

$$E_\phi = j \frac{ka^2 E_0 e^{-jkr}}{r} \left\{ \cos \theta \cos \phi \left[\frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \right\} \quad (2.114c)$$

และยังสามารถแยกเป็นองค์ประกอบของ E-planes และ H-planes ได้ดังนี้

E-Plane ($\phi = \pi/2$)

$$E_r = E_\phi = 0 \quad (2.115a)$$

$$E_\theta = j \frac{ka^2 E_0 e^{-jkr}}{r} \left[\frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \quad (2.115b)$$

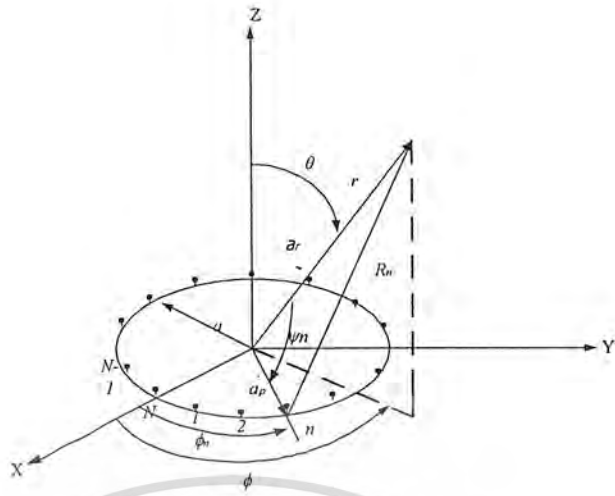
H-Plane ($\phi = 0$)

$$E_r = E_\theta = 0 \quad (2.116a)$$

$$E_\phi = j \frac{ka^2 E_0 e^{-jkr}}{r} \left\{ \cos \theta \left[\frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \right\} \quad (2.116b)$$

การพิจารณาการจัดเรียงแถวลำดับวงกลม (Circular Array) ที่มี N เอลิเมนต์ สามารถพิจารณาได้ ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การจัดเรียงแถวลำดับวงกลมแบบสมมาตรที่มี N เอลิเมนต์

จากรูป

$$E_n(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N a_n \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \tag{2.117}$$

$$R_n = \left(r^2 + a^2 - 2ar \cos \psi \right)^{1/2} \tag{2.117a}$$

เมื่อ $r \gg a$ จะได้ว่า

$$R_n \approx r - a \cos \psi_n = r - a(\hat{a}_\rho \cdot \hat{a}_r) = r - a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) \tag{2.117b}$$

เนื่องจาก

$$\begin{aligned} \hat{a}_\rho \cdot \hat{a}_r &= (\hat{a}_x \cos \phi_n + \hat{a}_y \sin \phi_n) \cdot (\hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta) \\ &= \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) \end{aligned} \tag{2.117c}$$

ดังนั้น

$$E_n(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{n=1}^N a_n e^{+jka \sin \theta \cos(\phi - \phi_n)} \tag{2.118}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$a_n = I_n e^{j\alpha_n} \quad (2.119)$$

$$I_n = \text{แอมพลิจูด...}; \alpha_n = \text{เฟส}, \phi_n = 2\pi \left(\frac{n}{N} \right)$$

ซึ่ง

$$E_n(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jkr}}{r} [AF(\theta, \phi)] \quad (2.120)$$

เมื่อ

$$[AF(\theta, \phi)] = \sum_{n=1}^N I_n e^{j[k a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n + \alpha_n)]} \quad (2.121)$$

จากสมการ 2.105 แสดงอาร์เรย์แฟคเตอร์ของอาร์เรย์วงกลมทั้งหมดบนระนาบ X - Y เพื่อกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักสูงสุด (The peak of main beam) ให้ชี้ไปยังทิศทาง (θ_0, ϕ_0) ซึ่งเฟสสามารถหาค่าออกมาได้ดังนี้

$$\alpha_n = -ka \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n) \quad (2.122)$$

ดังนั้นอาร์เรย์แฟคเตอร์ของสมการ 2.105 สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} AF(\theta, \phi) &= \sum_{n=1}^N I_n e^{jka[\sin \theta \cos(\phi_0 - \phi_n) - \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)]} \\ &= \sum_{n=1}^N I_n e^{jka[\cos \psi - \cos \psi_0]} \end{aligned} \quad (2.123)$$

2.4 การออกแบบด้วยวงจรแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน

เนื่องจากการออกแบบวงจรแบ่งกำลังแบบวิลคินสันเป็นการออกแบบโดยใช้สตรีปไลน์ ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องใช้สมการของไมโครสตรีปในการวิเคราะห์

2.4.1 การหาค่า W/h

การออกแบบไมโครสตรีป สิ่งที่ต้องดูคือ อัตราส่วน W/h ของแผ่นสตรีปที่สอดคล้องกับ Z_0, h และ \mathcal{E}_r ที่ต้องการ ซึ่งการประมาณอัตราส่วน W/h ในเทอมของ Z_0 และ \mathcal{E}_r นั้นสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Wheller ซึ่งพัฒนาโดย Hamerstad อีกครั้ง

เมื่อ $W/h \leq 2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ
$$W/h \cong 4 \left[\left(\frac{1}{2} \right) e^A - e^{-A} \right]^{-1} \quad (2.124)$$

โดยที่
$$A = \pi \left(\frac{Z_0}{120\pi} \right) \left[\sqrt{2}(\epsilon_r + 1) \right] + \left[\frac{(\epsilon_r - 1)}{(\epsilon_r + 1)} \right] \left[0.23 + \left(\frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \right] \quad (2.125)$$

หรือเมื่อ $W/h \geq 2$

$$W/h \cong \frac{\left\{ \epsilon_r - 1 \left[\log(B-1) + 0.39 - \left(\frac{0.61}{\epsilon_r} \right) \right] \right\}}{\epsilon_r \pi} + 2 \left[(B-1) - \log(2B-1) \right] \quad (2.126)$$

โดยที่
$$B = \left(\frac{\pi}{2\sqrt{\epsilon_r}} \right) \left(\frac{120\pi}{Z_0} \right) \quad (2.127)$$

อย่างไรก็ตาม สมการดังกล่าวจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อความหนา t ของแผ่นสไตริปมีค่าน้อยมากจนกระทั่งถือว่าเป็นศูนย์เท่านั้น

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.128)$$

โดยที่ λ_g = ความยาวคลื่นบนแผ่นสไตริป (เมตร)
 λ_0 = ความยาวคลื่นของคลื่นที่เดินทางด้วยความเร็วแสง (เมตร)
 c = ความเร็วแสงในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที

2.4.2 การคำนวณหาโครงสร้าง

ในการสร้างอุปกรณ์ตัวนี้ใช้ แผ่นสับสเตรตที่ใช้ทำจากอีพ็อกซี่ (Epoxy) ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.45 มีความหนา 1.6 มิลลิเมตร ความหนาของแผ่นสับสเตรตน้อยมาก และค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติของตัวสไตริปเท่ากับ 50 โอห์ม ใช้ค่าข้างต้นหาค่าต่างๆ ตามสมการที่กล่าวมา

$$\text{กำหนด } \epsilon_r = 4.45$$

$$h = 1.6 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$Z_0 = 50 \text{ โอห์ม}$$

จากสมการ (2.125)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } A &= \pi \left[\sqrt{2} (4.45 + 1) \right] \left[\frac{50}{120\pi} \right] + \left[\frac{(4.45 - 1)}{(4.45 + 1)} \right] \left[0.23 + \left(\frac{0.11}{4.45} \right) \right] \\ &= 1.536875 \\ W/h &\cong 4 \left[\left(\frac{1}{2} \right) e^{1.536875} - e^{-1.536875} \right]^{-1} = 1.89578 \end{aligned}$$

ซึ่งค่า $1.89578 < 2$ เป็นไปตามเงื่อนไข ดังนั้นได้ว่า

$W = 3.0332$ มิลลิเมตร

คำนวณหาค่า W อีกค่าโดยใช้มิติแคนซ์ลักษณะสมบัติเท่ากับ $\sqrt{2} * Z_0$

นั่นคือ $Z = 50 * 1.414 = 70.71$ โอห์ม

จะได้

$W = 1.604487731$ มิลลิเมตร

2.5 ตัวปรับเฟส (Phase Shifter)

ในตัวกลางใดๆ คลื่นจะเดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน โดยมีความเร็วในสุญญากาศเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที ในสายโคแอกเซียลขนาดต่างๆ กัน ความเร็วของคลื่นที่เดินทางภายในสายแต่ละขนาด คำนวณได้จากสูตร

$$v = \eta c$$

(2.129)

เมื่อ c คือ ความเร็วแสงภายในอากาศ

η คือ มิติแคนซ์คลื่นซึ่งเท่ากับ $\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$

สายโคแอกเซียลแต่ละขนาดจะมีค่ามิติแคนซ์คลื่นต่างกันไปในที่นี้สายโคแอกเซียลที่ใช้คือสายค่าความสูญเสียต่ำ (low loss) ซึ่งมีค่ามิติแคนซ์คลื่นเท่ากับ 0.66

ค่าเฟสทั้งสามค่า ($2\pi, \pi, -\pi$) ที่เราต้องการให้ปรับค่าได้ จะใช้หลักการที่ว่าด้วยความยาวสายที่ต่างกัน คลื่นจะเดินทางไปและเกิดการเลื่อนของเฟสขึ้น (Phase Shifter) กล่าวคือค่าของเฟสในสายที่มีความยาวต่างกัน ถึงแม้ว่าคลื่นเริ่มเดินทางไปพร้อมกันแต่ค่าเฟสที่ได้ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความยาวของสาย

ดังนั้นเราจึงนำค่าเฟสทั้งสามค่ามาคำนวณค่าว่าต้องใช้สายเท่าไร เพื่อให้เกิดการเลื่อนเฟสได้ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi = \beta l \quad (2.130)$$

ϕ	คือ	เฟสที่เลื่อนไปในสาย (เรเดียน)
β	คือ	ค่าคงที่เฟส (Phase Constant) = $2\pi/\lambda_g$
l	คือ	ความยาวสาย (เมตร)
λ_g	คือ	ความคลื่นของคลื่นขณะเดินทางภายในสาย เท่ากับ v/f

$$l = \lambda_g \phi / 2\pi \quad (2.131)$$

กรณีที่ 1 เมื่อต้องการค่าเฟสเท่ากับ 0 หรือ 2π เรเดียน

$$l_1 = \lambda_g \phi / 2\pi = (3 \times 10^8 \times 0.66 \times 2\pi) / (2\pi \times 12.6575 \times 10^9) \\ = 1.564 \text{ cm.}$$

กรณีที่ 2 เมื่อต้องการค่าเฟสเท่ากับ π เรเดียน

$$l_2 = \lambda_g \phi / 2\pi = (3 \times 10^8 \times 0.66 \times \pi) / (2\pi \times 12.6575 \times 10^9) \\ = 0.782 \text{ cm.}$$

กรณีที่ 3 เมื่อต้องการค่าเฟสเท่ากับ $-\pi$ เรเดียน

$$l_3 = \lambda_g \phi / 2\pi = (3 \times 10^8 \times 0.66 \times -\pi) / (2\pi \times 12.6575 \times 10^9) \\ = -0.782 \text{ cm.}$$

จะพบว่าค่า l_1 ที่ทำให้เกิดค่าเฟส 0 หรือ 2π เรเดียน นั้นมีขนาดสั้นเกินไป ดังนั้นเราจึงเพิ่มความยาวสายไปอีก 9 เท่าของ l_1 คือเท่ากับ 13.5 cm. ซึ่งค่าเฟสที่ได้จะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่ต้องการ ในส่วนของ l_2 เราก็จะนำ l_1 บวกกับ 0.782 cm. เราก็จะได้ค่าเฟสเป็น π เรเดียน ตามที่ต้องการ และในส่วนของ l_3 ก็จะนำค่าของ l_1 ลบกับ 0.782 cm. เราก็จะได้ค่าเฟสเป็น $-\pi$ เรเดียน ตามที่ต้องการ ดังนั้นเราจะได้อ่าความยาวของสายดังนี้

ค่าความยาวสายสำหรับเฟส 2π เรเดียน เท่ากับ 13.5 cm.

ค่าความยาวสายสำหรับเฟส π เรเดียน เท่ากับ 14.3 cm

ค่าความยาวสายสำหรับเฟส $-\pi$ เรเดียน เท่ากับ 12.7 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบ

3.1 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ

ในการวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศนั้น จะสนใจในส่วนของค่ารีซีทีและความยาวขององค์ประกอบสายอากาศก่อนเป็นอันดับแรก โดยค่าดังกล่าว จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของคลื่นที่ออกมาจากสายอากาศและค่าสภาพเจาะงทศทางของตัวสายอากาศ ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่จะต้องพิจารณาก่อนเป็นอันดับแรก สิ่งต่อไปที่จะต้องพิจารณาคือ ความยาวของโพรบที่ใช้กับตัวสายอากาศ โดยค่าดังกล่าว จะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ, ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง(Voltage Standing Wave Ratio), ค่าการสูญเสียเนื่องมาจากการย้อนกลับ (Return Loss) และค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน(Bandwidth) ของสายอากาศ เมื่อได้รูปแบบที่แน่นอนสำหรับตัวสายอากาศแล้ว ก็จะนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบวงกลมเพื่อเพิ่มค่าสภาพเจาะงทศทางและอัตราขยายของสายอากาศให้สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้คลื่นสามารถถูกส่งออกไปได้มากขึ้น

3.1.1 การพิจารณาค่ารีซีทีและความกว้างของตัวสายอากาศ

ในการพิจารณาค่ารีซีทีนั้น จะพิจารณาค่าของรีซีทีของตัวสายอากาศที่ทำให้คลื่นที่ออกจากตัวสายอากาศมีเพียงรูปแบบของคลื่นหลักเท่านั้น ในกรณีของตัวสายอากาศรูปแบบของคลื่นหลักคือ TE₁₁ จากบทที่ 2 จะได้ว่ารีซีทีที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ระหว่าง $0.293\lambda < a < 0.486\lambda$

3.1.2 การพิจารณาค่าความยาวโพรบ

ในการพิจารณาค่าความยาวโพรบนั้น จะต้องทำให้เข้าใกล้การเกิดรีโซแนนซ์ (resonance) ให้มากที่สุดเพื่อให้คลื่นที่ส่งออกไปมีพลังงานมากที่สุดก็จะทำให้สามารถส่งไปได้ไกล โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับสายอากาศนั้นมีค่าเท่ากับ 50Ω เพื่อให้คลื่นที่ออกมาจากสายนำสัญญาณซึ่งมีอิมพีแดนซ์ เท่ากับ 50Ω สามารถส่งผ่านสายอากาศออกไปได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นก็ต้องทำให้สายอากาศมีค่า VSWR ที่ดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ทั่วไปสำหรับสายอากาศ คือค่า VSWR ไม่ควรมีค่ามากกว่า 2 และค่าการสูญเสียของการสะท้อนกลับ (return loss) จะต้องมีค่าน้อยกว่า -15 dB ขึ้นไป

ส่วนการคำนวณหาความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานนั้น ทำได้โดยการหาความถี่ที่สูงกว่าและต่ำกว่าความถี่กลางที่มีค่า VSWR ไม่เกิน 2 จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งานได้จาก

$$BW = \frac{f_H - f_L}{f_0} \times 100\% \quad (3.1)$$

ซึ่งค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานควรจะมีค่ามากกว่า 10% ขึ้นไป

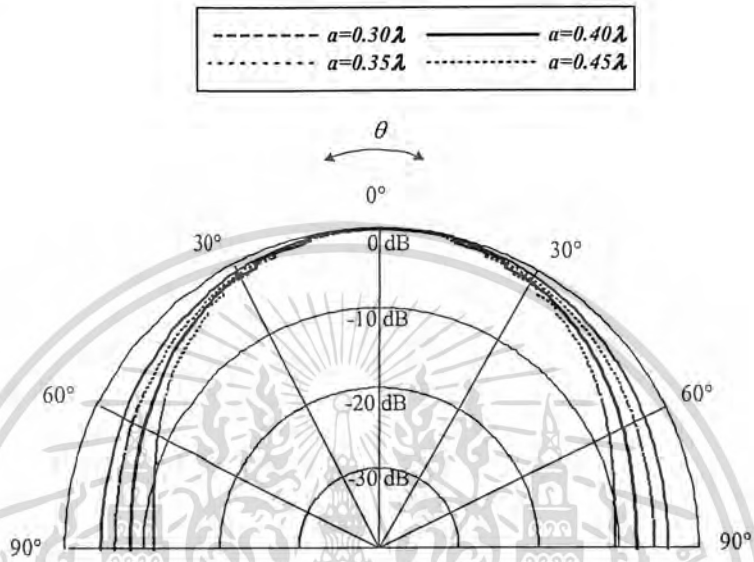
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศ ในกรณียูนิฟอร์ม (Uniform)

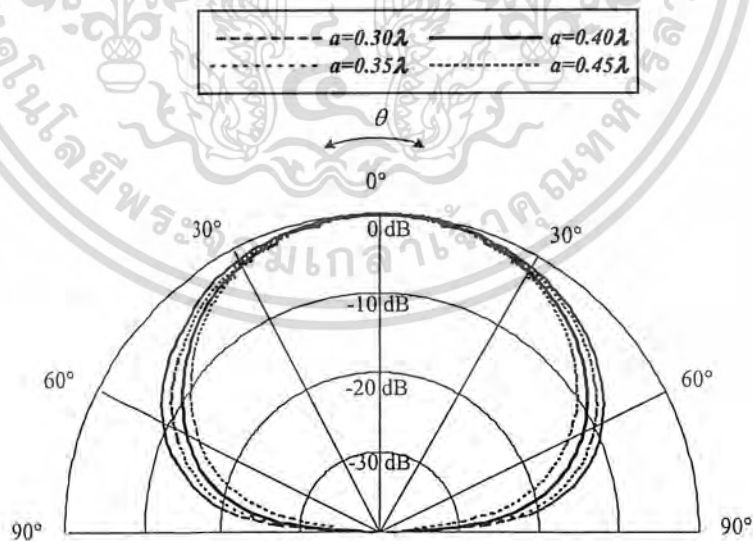
3.2.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเป็นแบบทิศทางเดียว สามารถแสดงได้ดัง

รูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าที่ค่ารัศมีต่างๆกัน คือ ที่ $0.30\lambda, 0.35\lambda, 0.40\lambda, 0.45\lambda$ ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กที่ค่ารัศมีต่างๆกัน

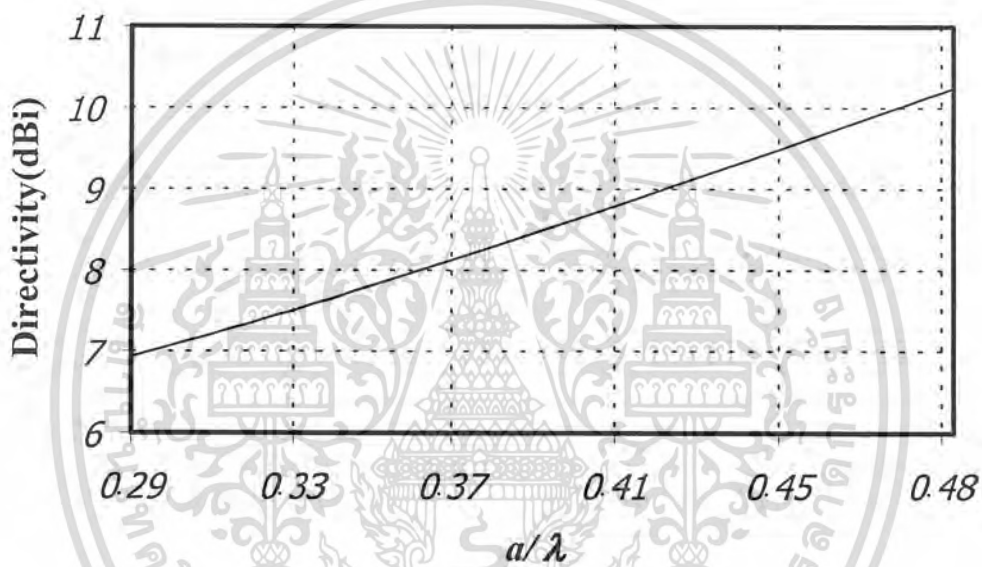
คือ ที่ $0.30\lambda, 0.35\lambda, 0.40\lambda, 0.45\lambda$ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะพบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่น (beam) ใกล้เคียงกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก และเมื่อเพิ่มค่ารัศมีให้มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ ความกว้างของลำคลื่นแคบลงซึ่งก็หมายความว่า การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแรงขึ้นนั่นเอง

3.2.2 การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

จากรูปที่ 3.3 จะพบว่าเมื่อเพิ่มค่ารัศมีให้มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศมีค่ามากขึ้นด้วย

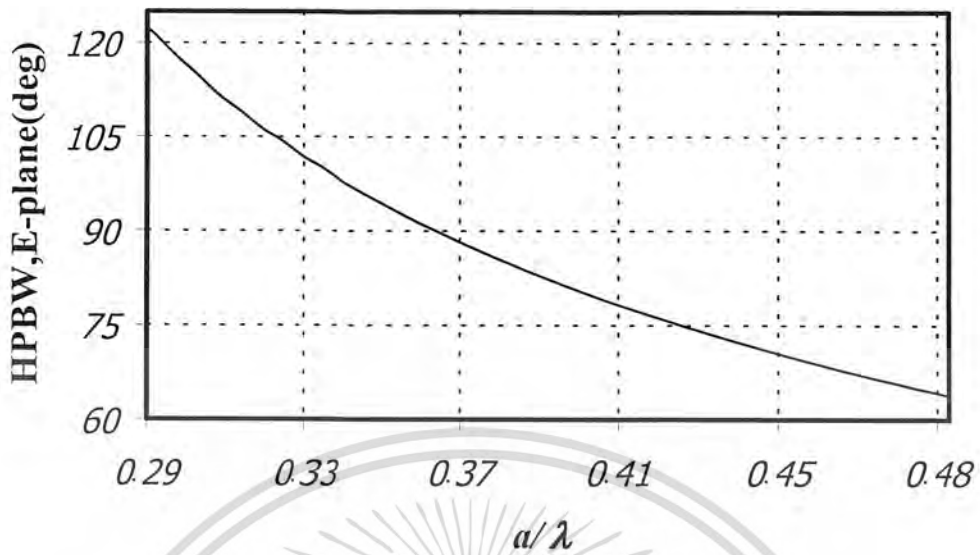


รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับค่ารัศมีของสายอากาศในแต่ละค่าของรัศมี

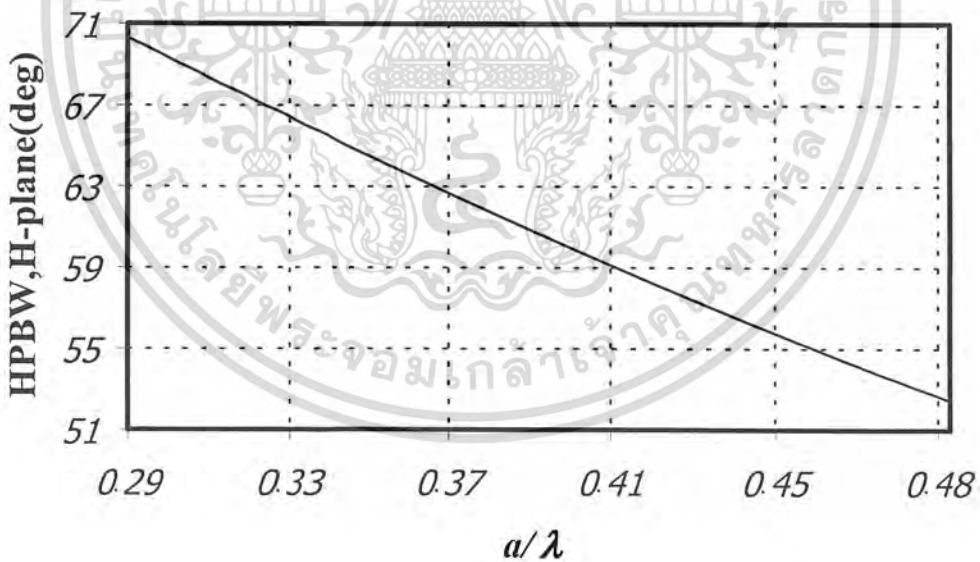
3.2.3 การพิจารณาค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง

สำหรับระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบของสนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่ารัศมีให้มีค่ามากขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



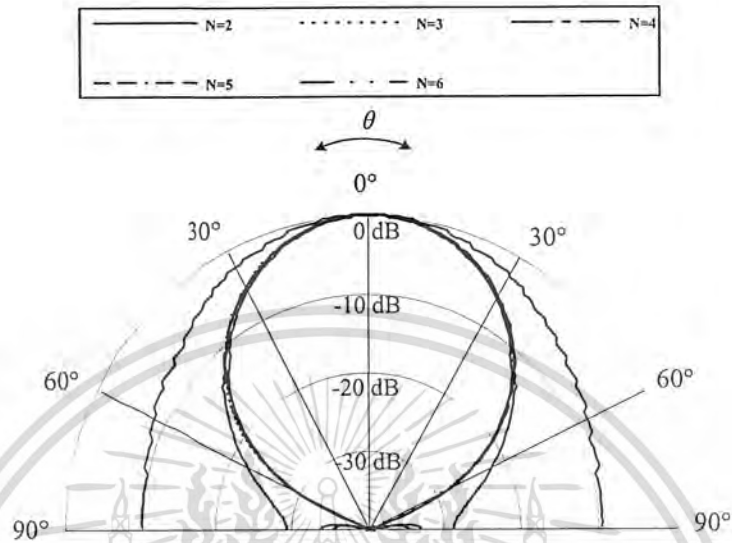
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งกับค่ารัศมีของสายอากาศ ในแต่ละค่าของรัศมีในระนาบของสนามไฟฟ้า



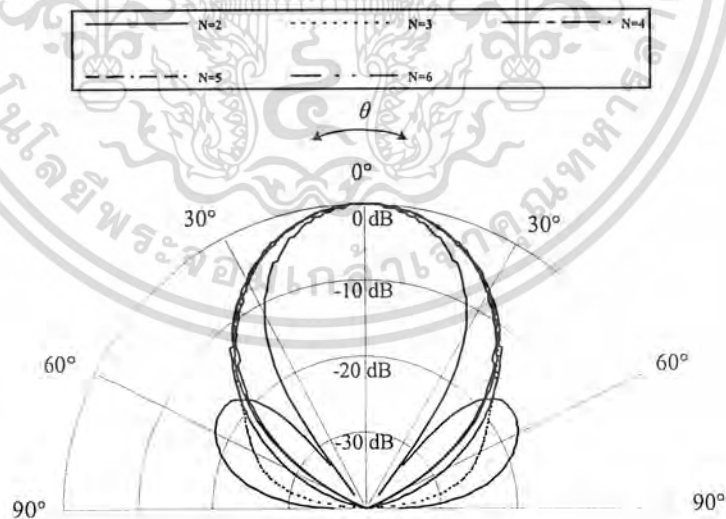
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งกับค่ารัศมีของสายอากาศ ในแต่ละค่าของรัศมีในระนาบของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลม
สามารถแสดงค่าต่างๆได้ดังรูปต่อไปนี้

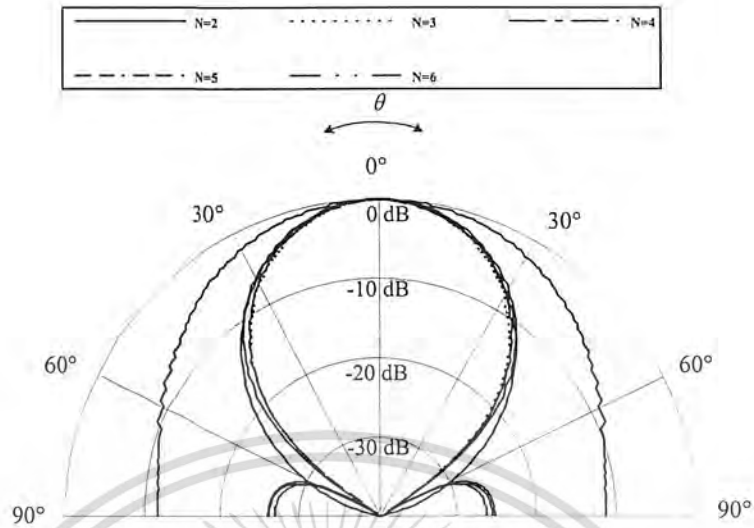


รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.40λ

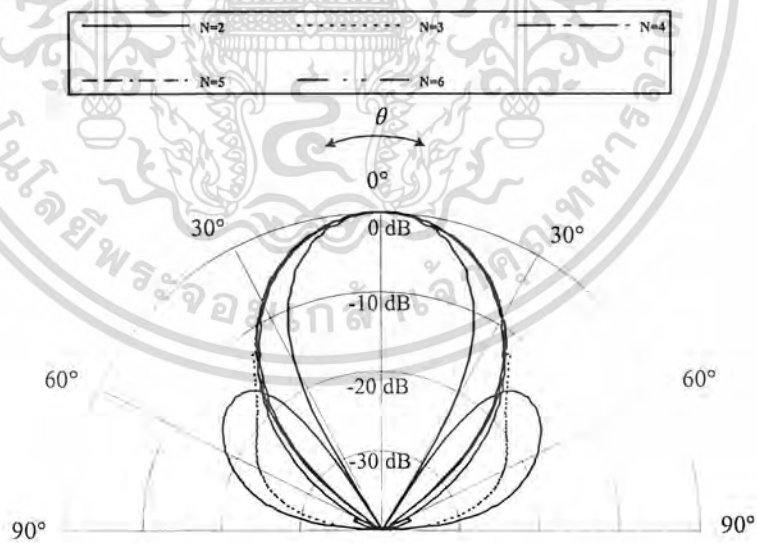


รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.40λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

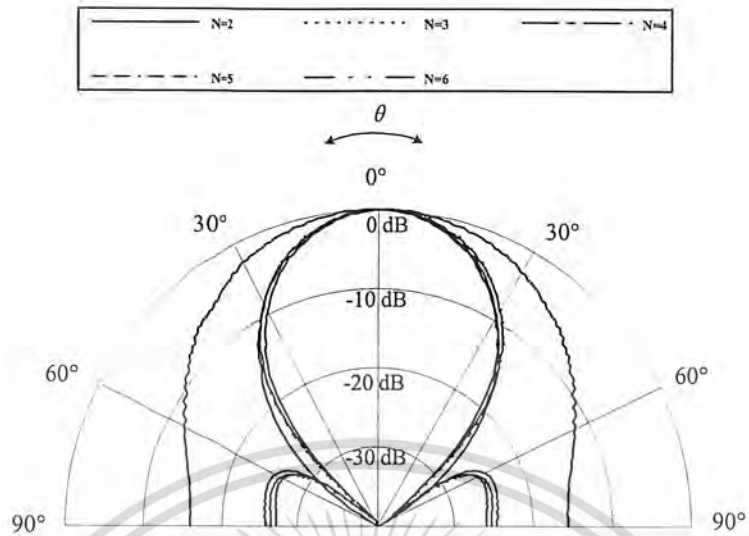


รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.45λ

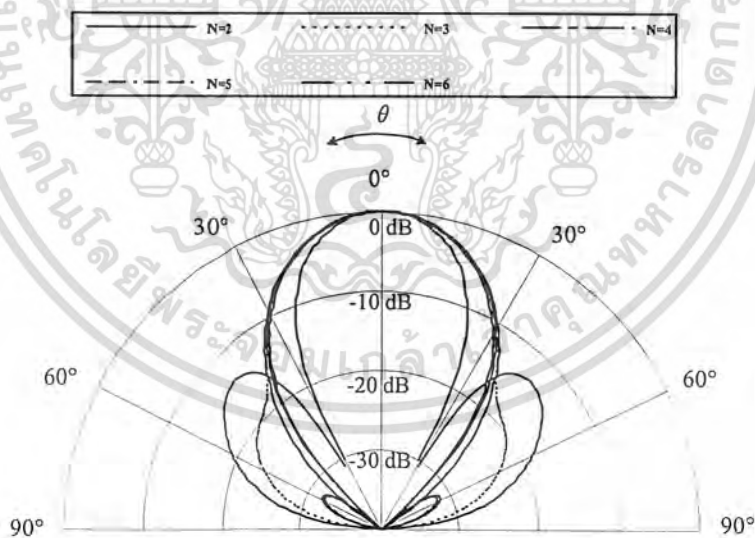


รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.45λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



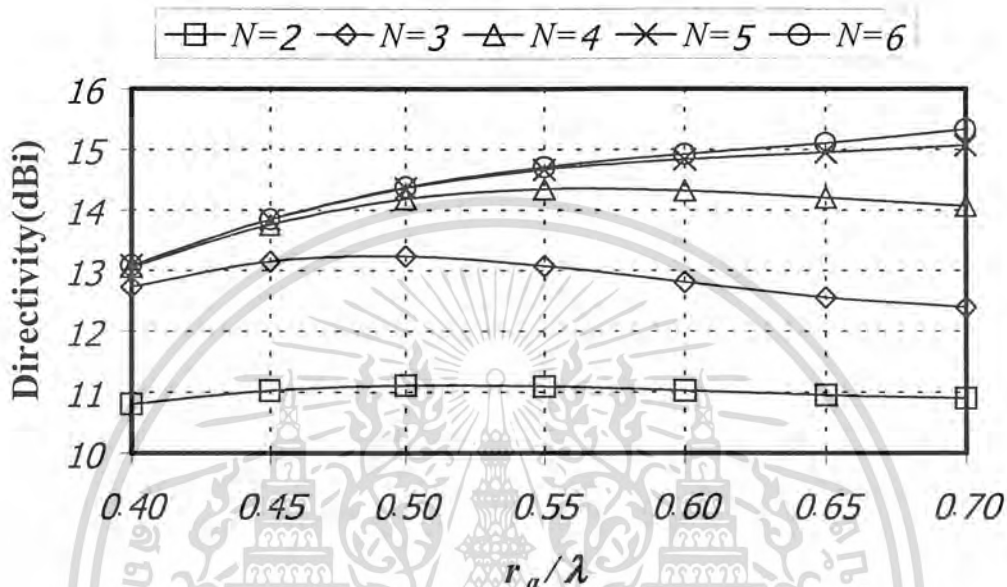
รูปที่ 3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ



รูปที่ 3.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

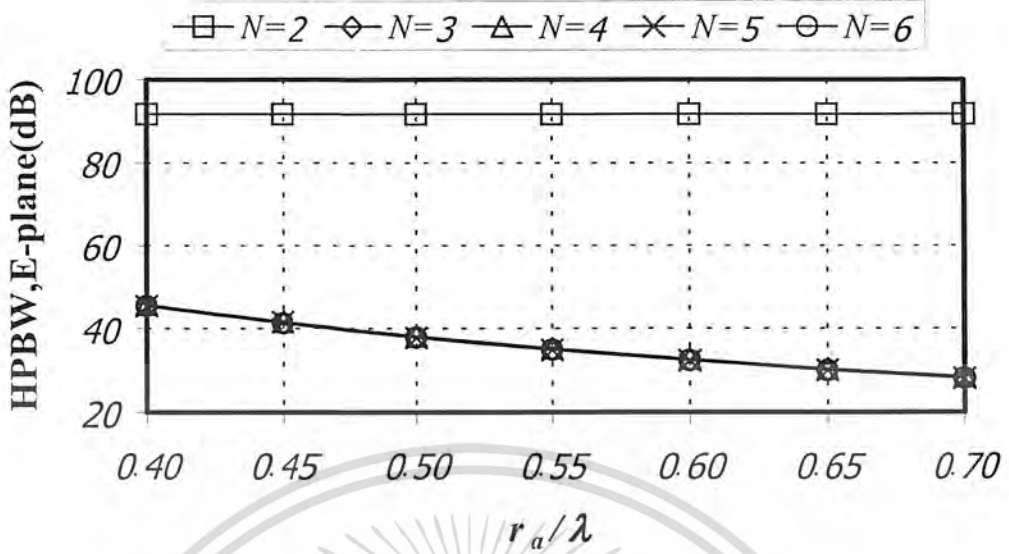
จะพบว่าที่จำนวนสายอากาศค่าหนึ่ง เมื่อเพิ่มค่ารัศมีให้มีความมากขึ้นก็จะทำให้ความกว้างของลำคลื่น (beam) มีขนาดเล็กลง หมายความว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศมีค่ามากขึ้นนั่นเอง แต่ก็จะทำให้ลำคลื่นด้านข้าง (side lobe) มีค่ามากขึ้นเช่นกันซึ่งจะเห็นได้ว่าที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ จะมีลำคลื่นด้านข้างใหญ่กว่าที่รัศมีเท่ากับ 0.45λ และที่ 0.45λ ก็จะมีลำคลื่นด้านข้างที่ใหญ่กว่า 0.40λ เช่นกัน



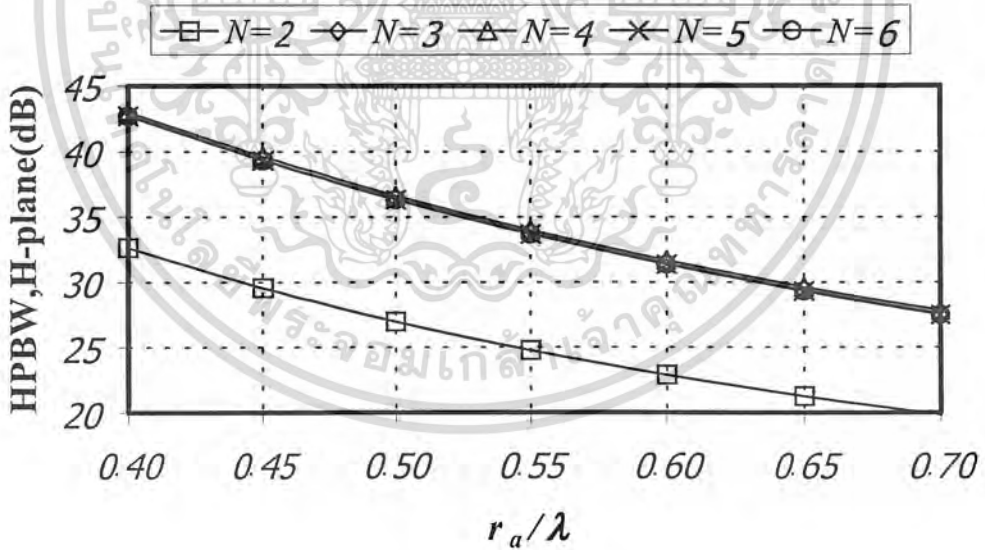
รูปที่ 3.12 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ

จะพบว่าที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2,3 และ 4 องค์ประกอบ เมื่อเพิ่มค่ารัศมีให้มีความมากขึ้นก็จะทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าเพิ่มขึ้นและจะมากที่สุดที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ถึง 0.55λ และจะลดลงเมื่อรัศมี มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากนั้น ส่วนที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 5 และ 6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะ เพิ่มขึ้นตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



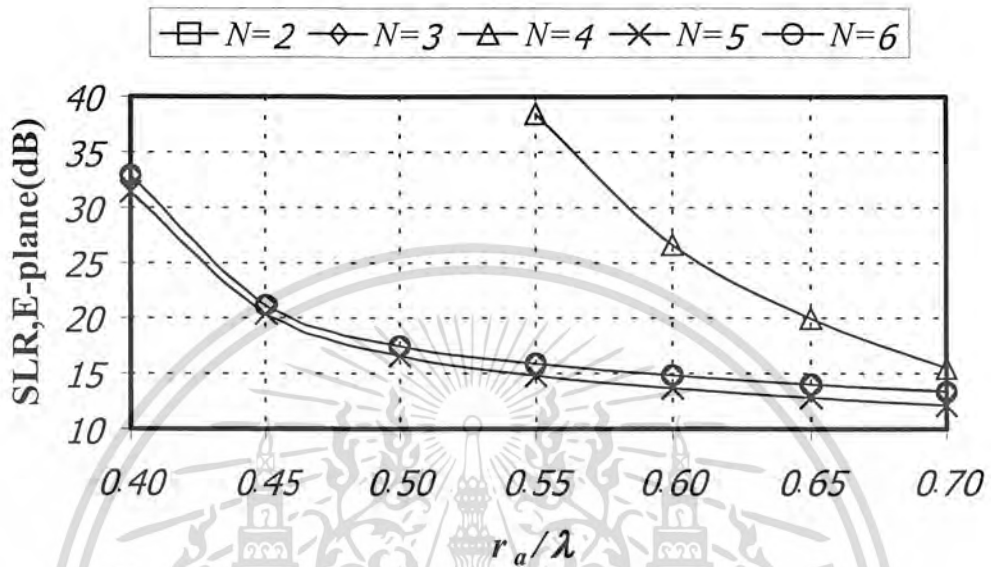
รูปที่ 3.13 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบของสนามไฟฟ้าเมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์กรประกอบ



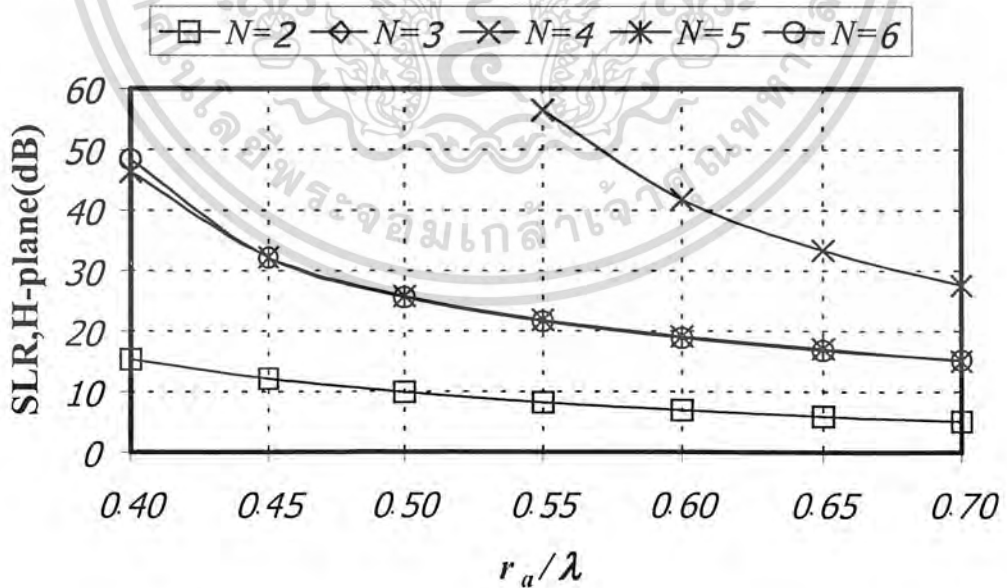
รูปที่ 3.14 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบของสนามแม่เหล็กเมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์กรประกอบ

จะพบว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 3,4,5 และ 6 องค์กรประกอบจะมีค่าเอกสารนี้เท่ากันและจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น ส่วนที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2 องค์กรประกอบ จะมีค่าคงที่เท่าไรก็ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่เปลี่ยนแปลง และในระนาบของสนามของสนามแม่เหล็กที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 3,4,5 และ 6 องค์ประกอบจะมีค่าเท่ากันและจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น ส่วนที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2 องค์ประกอบ จะมีค่าต่างมาเล็กน้อยและจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 3.15 ค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านข้างในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ

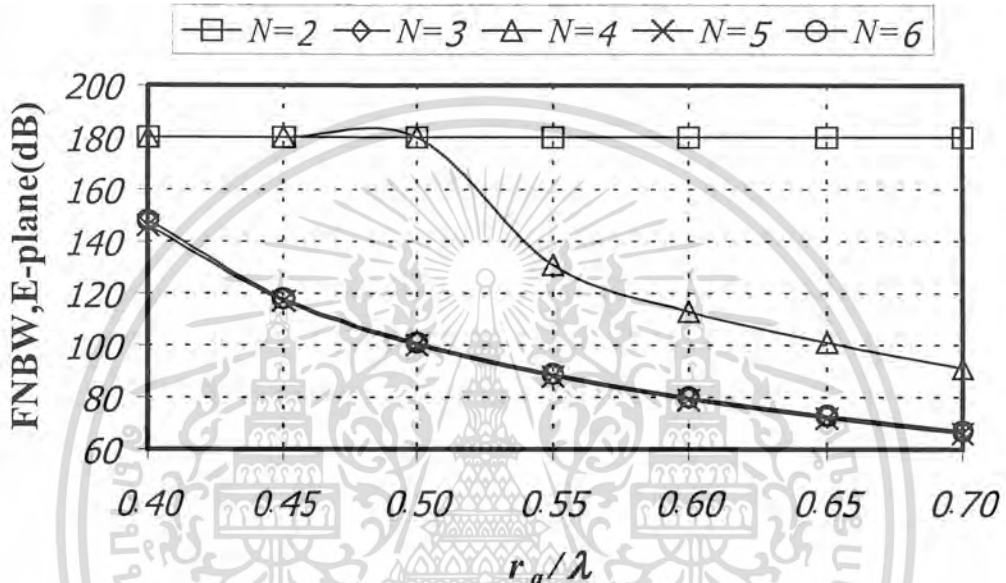


รูปที่ 3.16 ค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านข้างในระนาบของสนามแม่เหล็ก

เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ

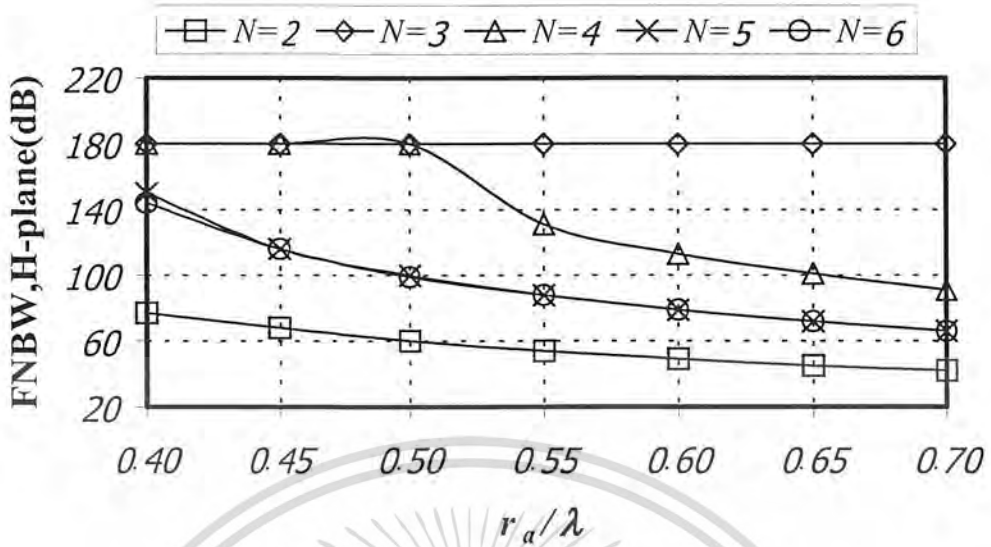
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น มิใช่อยู่เพื่อเผยแพร่ข้อมูลใดๆ โดยนิตยสารวิชาการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2 และ 3 องค์ประกอบ จะไม่มีและที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 4 องค์ประกอบ จะมีค่าตั้งแต่ค่ารัศมี 0.55λ ขึ้นไปและจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้นส่วนที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 5 และ 6 องค์ประกอบจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้นเช่นกันและในระนาบของสนามของสนามแม่เหล็กที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 3 องค์ประกอบ จะไม่มีและที่ 4 องค์ประกอบ จะเหมือนกับกรณีของสนามไฟฟ้าส่วนที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2,5 และ 6 องค์ประกอบจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.17 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์คู่แรกในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรกในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์กรประกอบ

จะพบว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2 และ 3 องค์กรประกอบจะมีค่าอยู่ที่ 180 degree และที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 4,5 และ 6 องค์กรประกอบ จะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของสนามแม่เหล็กที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 3 องค์กรประกอบ จะมีค่าอยู่ที่ 180 degree และที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2,4,5 และ 6 องค์กรประกอบจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น

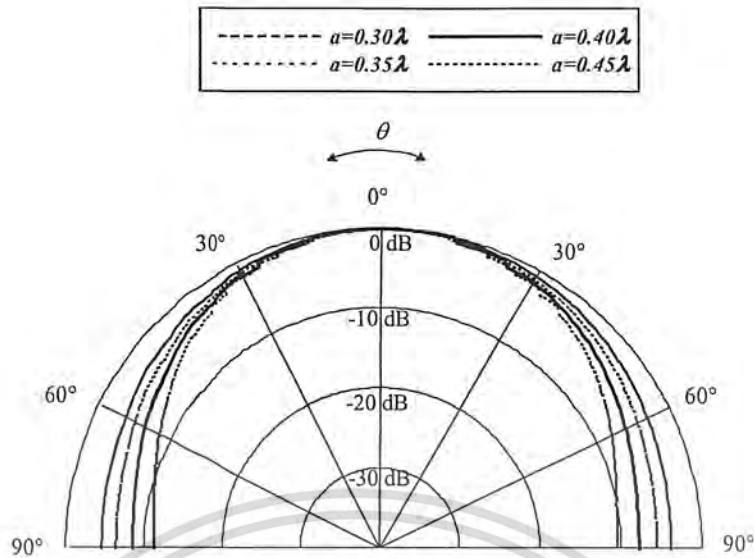
3.3 การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศ ในกรณีโหมด TE_{11} (TE_{11} - Mode)

3.3.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

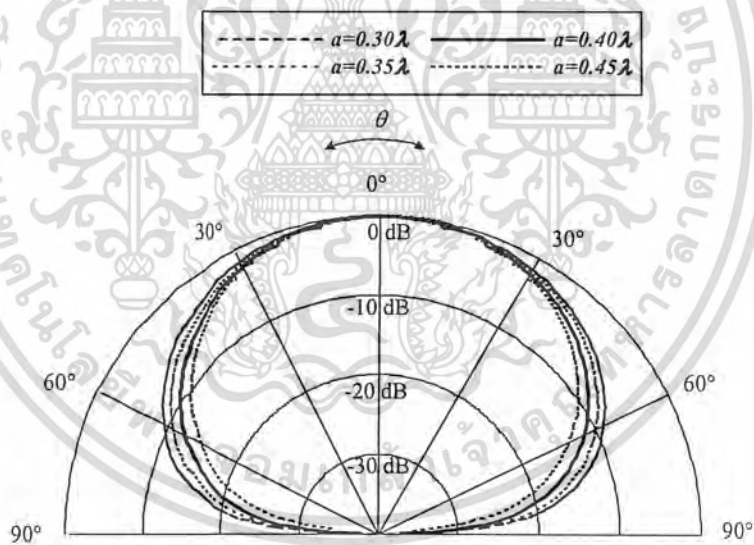
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเป็นแบบทิศทางเดียว สามารถแสดงได้ดัง

รูปที่ 3.19 และ 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้า
ที่ค่ารัศมีต่าง ๆ กันคือ ที่ $0.30\lambda, 0.35\lambda, 0.40\lambda, 0.45\lambda$ ตามลำดับ



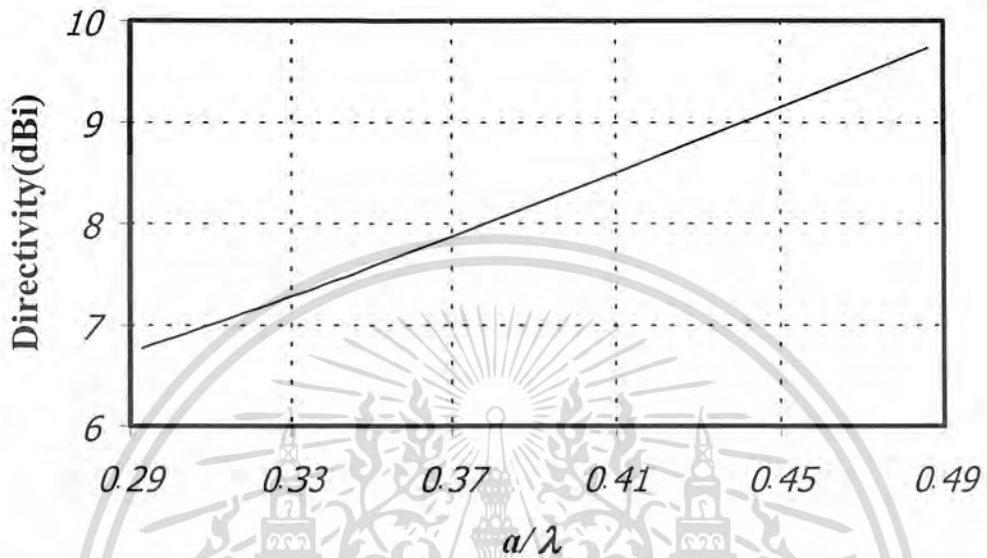
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก
ที่ค่ารัศมีต่าง ๆ กัน คือที่ $0.30\lambda, 0.35\lambda, 0.40\lambda, 0.45\lambda$ ตามลำดับ

เมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะพบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่น (beam) ใกล้เคียงกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก และเมื่อเพิ่มค่ารัศมีให้มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ ความกว้างของลำคลื่นแคบลงซึ่ง

ก็หมายความว่า การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแรงขึ้นนั่นเอง ไม่นอญตาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

จากรูปที่ 3.3 จะพบว่าเมื่อเพิ่มค่ารัศมีให้มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศมีค่ามากขึ้นด้วย

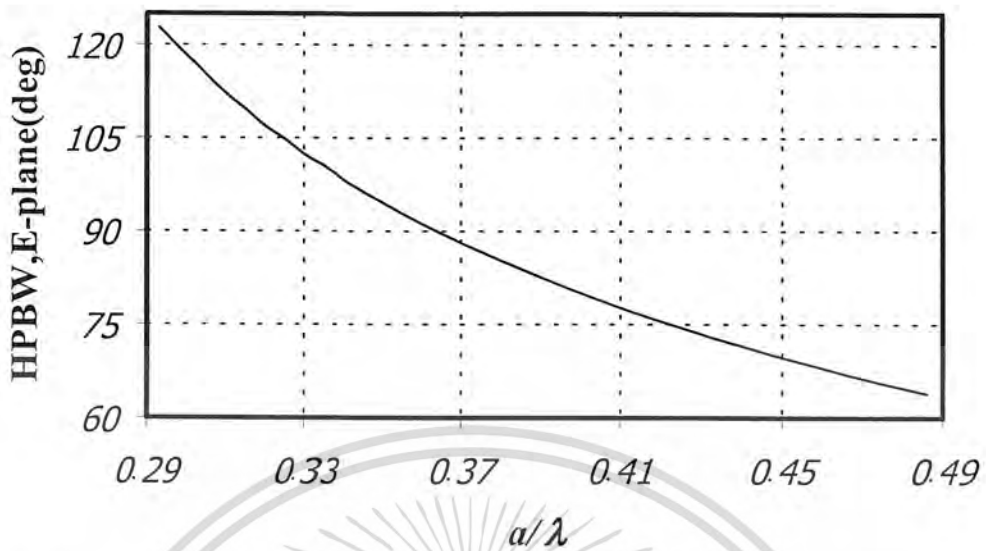


รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับค่ารัศมีของสายอากาศในแต่ละค่าของรัศมี

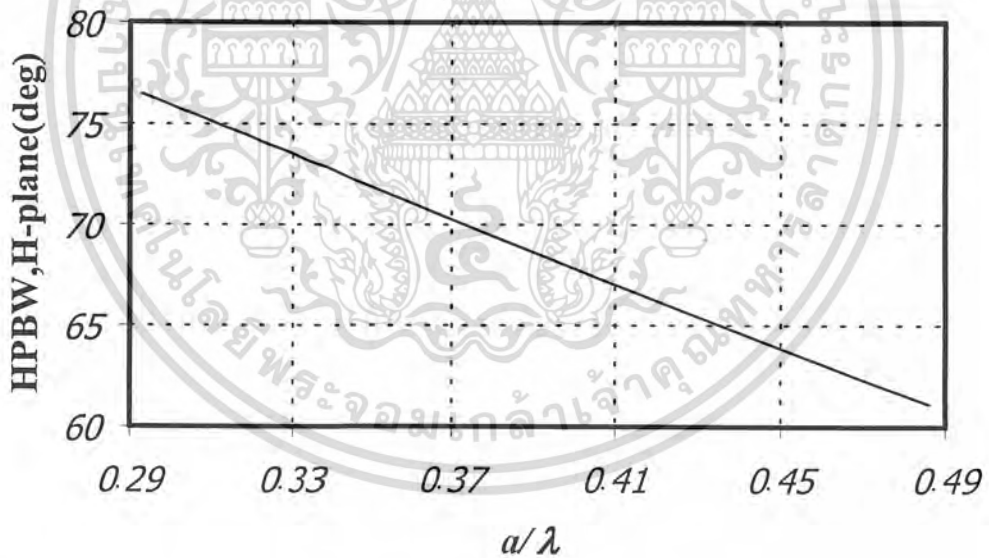
3.3.3 การพิจารณาค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง

สำหรับระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบของสนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่ารัศมีให้มีค่ามากขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.22 และ 3.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



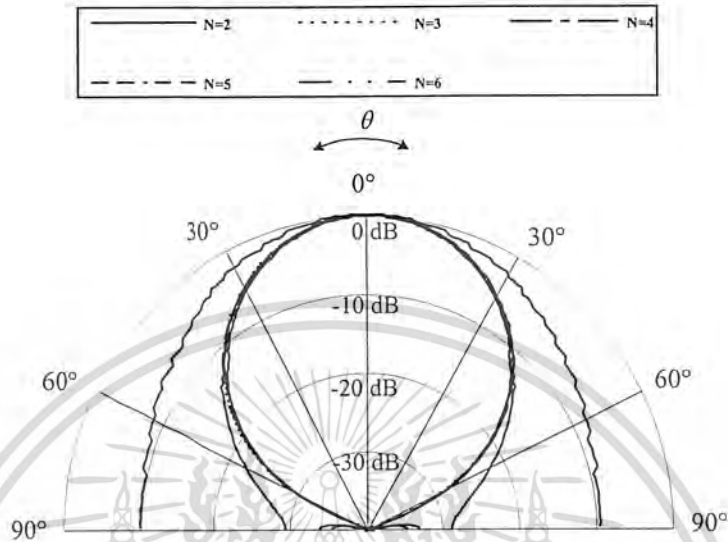
รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งกับค่ารัศมีของสายอากาศ ในแต่ละค่าของรัศมีในระนาบของสนามไฟฟ้า



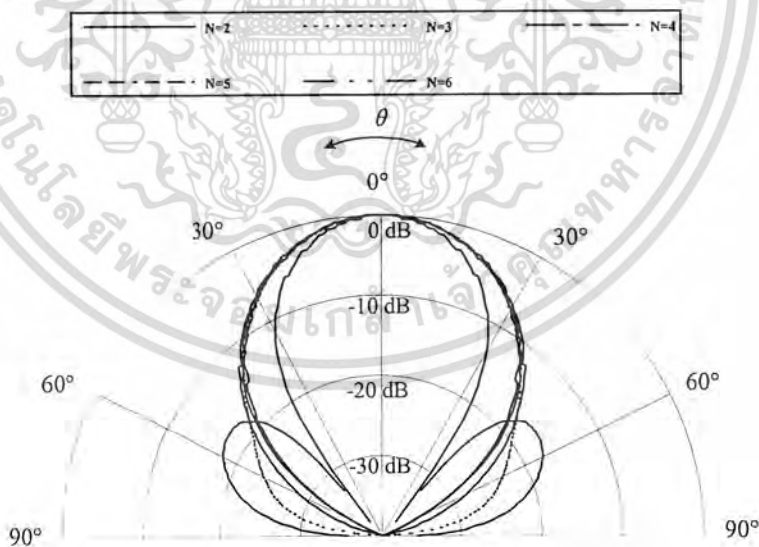
รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งกับค่ารัศมีของสายอากาศ ในแต่ละค่าของรัศมีในระนาบของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลม
สามารถแสดงค่าต่างๆได้ดังรูปต่อไปนี้

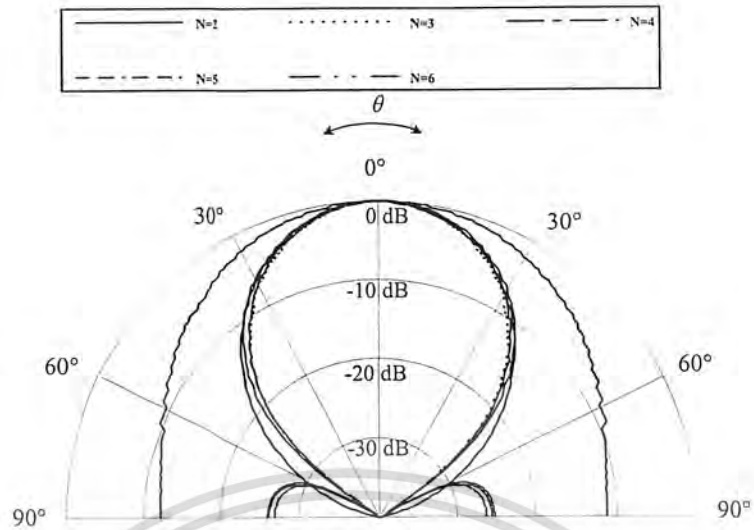


รูปที่ 3.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเมื่อนำมาจัดเรียง
ตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.40λ

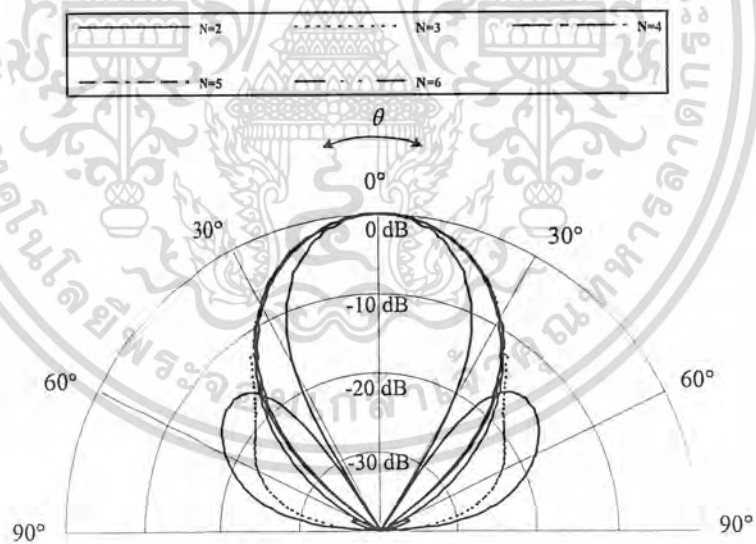


รูปที่ 3.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กเมื่อนำมาจัดเรียง
ตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.40λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

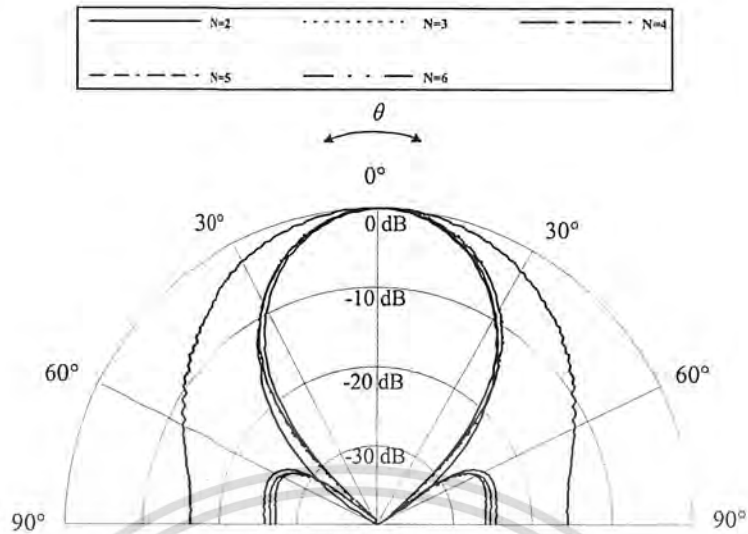


รูปที่ 3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.45λ

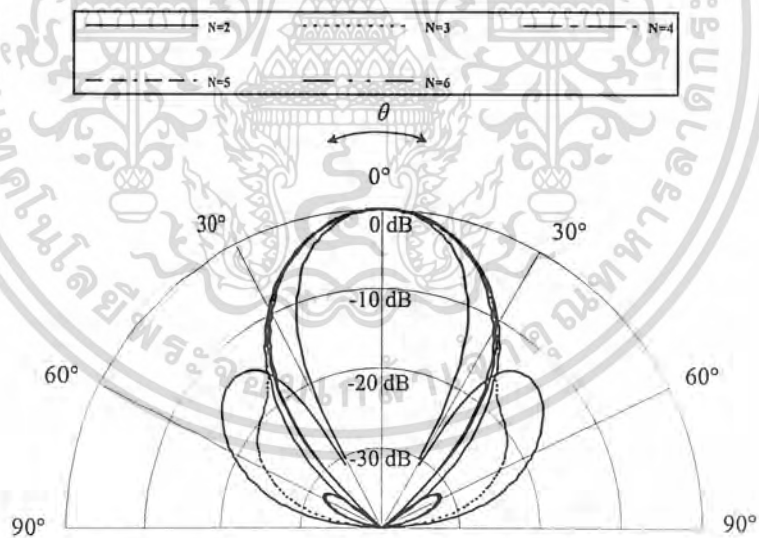


รูปที่ 3.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.45λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



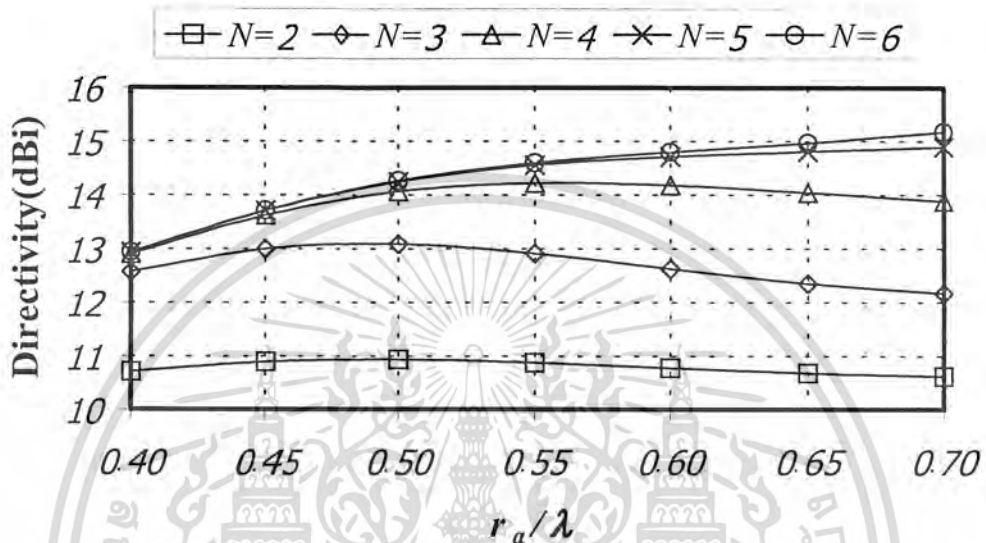
รูปที่ 3.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ



รูปที่ 3.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

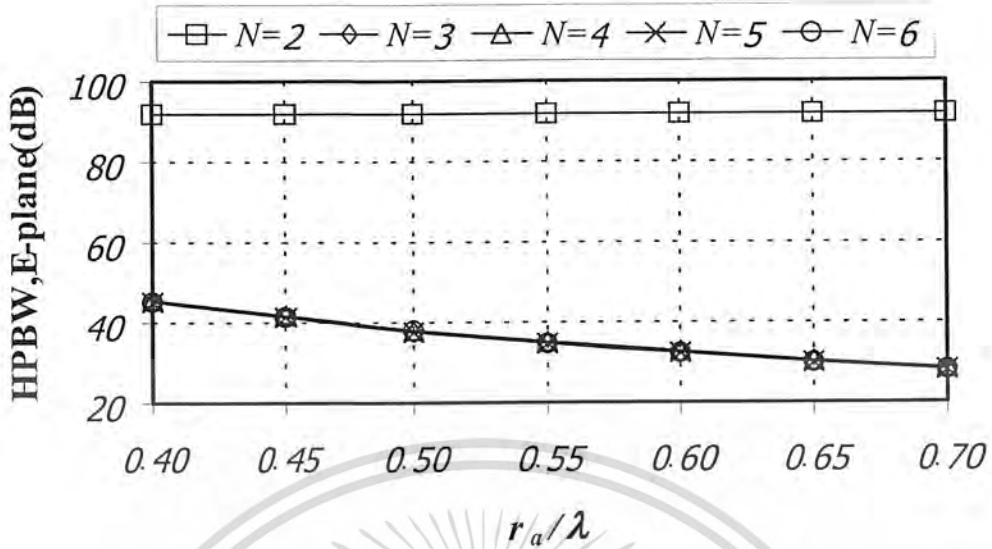
จะพบว่าที่จำนวนสายอากาศค่าหนึ่ง เมื่อเพิ่มค่ารัศมีให้มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ความกว้างของลำคลื่น (beam) มีขนาดเล็กลง หมายความว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศมีค่ามากขึ้นนั่นเอง แต่ก็จะทำให้ลำคลื่นด้านข้าง (side lobe) มีค่ามากขึ้นเช่นกันซึ่งจะเห็นได้ว่าที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ จะมีลำคลื่นด้านข้างใหญ่กว่าที่รัศมีเท่ากับ 0.45λ และที่ 0.45λ ก็จะมีลำคลื่นด้านข้างที่ใหญ่กว่า 0.40λ เช่นกัน



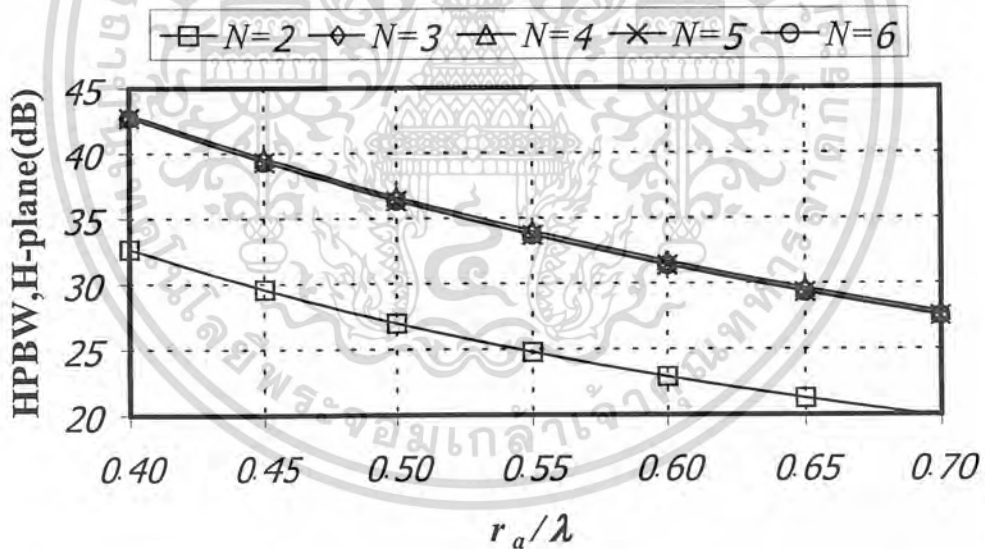
รูปที่ 3.30 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลม ตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ

จะพบว่าที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2,3 และ 4 องค์ประกอบ เมื่อเพิ่มค่ารัศมีให้มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าเพิ่มขึ้นและจะมากที่สุดที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ถึง 0.55λ และจะลดลงเมื่อรัศมี มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากนั้น ส่วนที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 5 และ 6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะ เพิ่มขึ้นตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



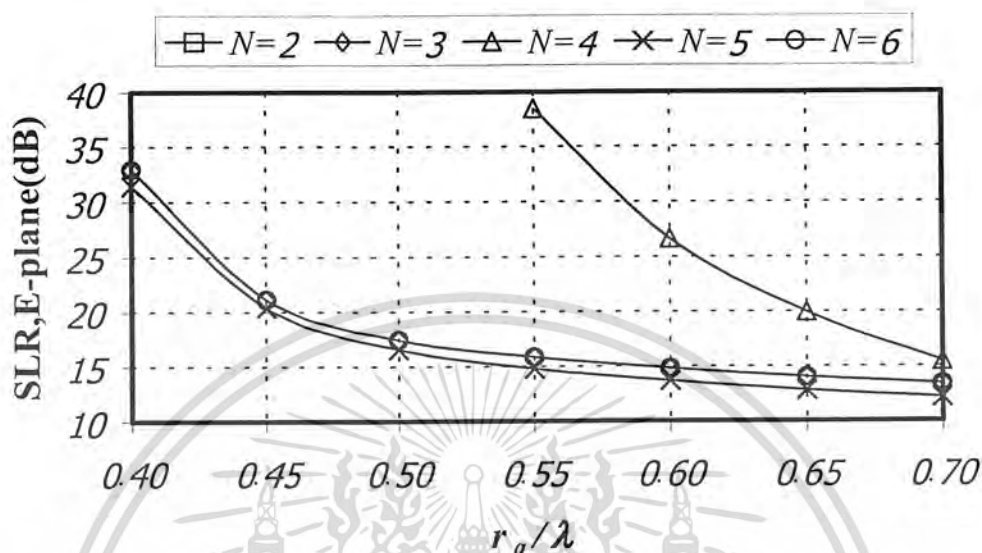
รูปที่ 3.31 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบของสนามไฟฟ้าเมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ



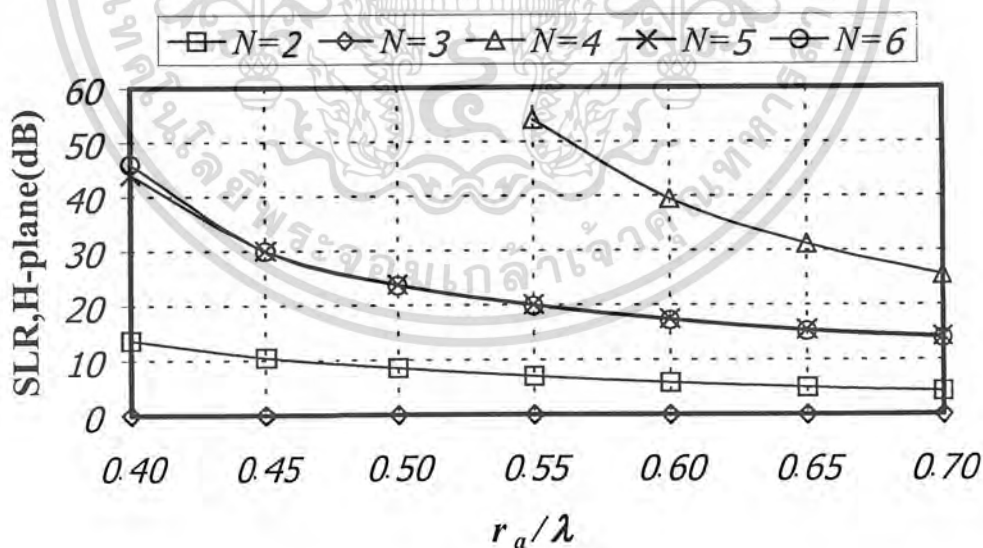
รูปที่ 3.32 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบของสนามแม่เหล็กเมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ

จะพบว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 3,4,5 และ 6 องค์ประกอบจะมีค่าเท่ากันและจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น ส่วนที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2 องค์ประกอบ จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง และในระนาบของสนามของสนามแม่เหล็กที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 3,4,5 และ 6 องค์ประกอบนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อสาธารณะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบจะมีค่าเท่ากันและจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น ส่วนที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2 องค์ประกอบ จะมีค่าต่างมาเล็กน้อยและจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน



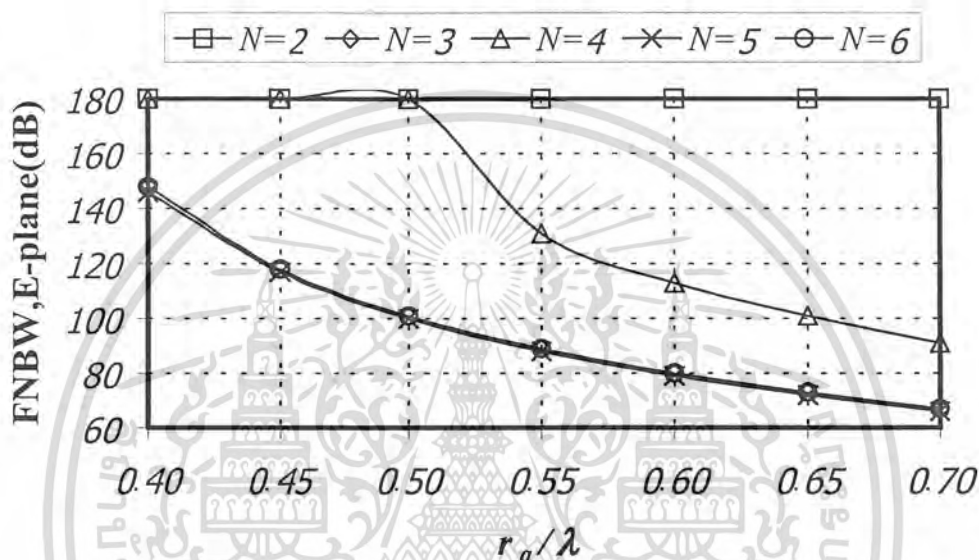
รูปที่ 3.33 ค่าอัตราส่วนของค่าคลื่นหลักต่อค่าคลื่นด้านข้างในระนาบของสนามไฟฟ้า เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.34 ค่าอัตราส่วนของค่าคลื่นหลักต่อค่าคลื่นด้านข้างในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ

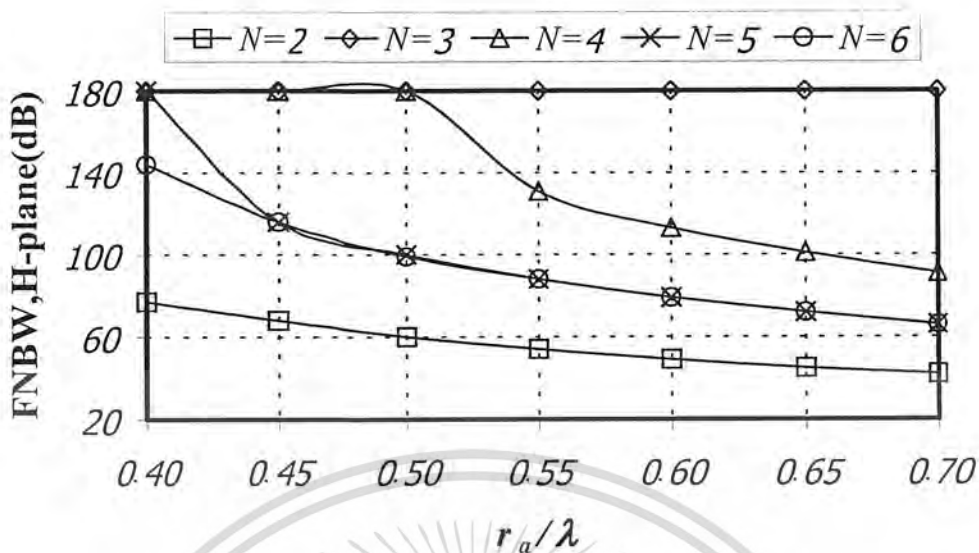
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2 และ 3 องค์ประกอบ จะไม่มีและที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 4 องค์ประกอบ จะมีค่าตั้งแต่ค่ารัศมี 0.55λ ขึ้นไปและจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้นส่วนที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 5 และ 6 องค์ประกอบจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้นเช่นกันและในระนาบของสนามของสนามแม่เหล็กที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 3 องค์ประกอบ จะไม่มีและที่ 4 องค์ประกอบ จะเหมือนกับกรณีของสนามไฟฟ้าส่วนที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2,5 และ 6 องค์ประกอบจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.35 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์คู่แรกในระนาบของสนามไฟฟ้าเมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



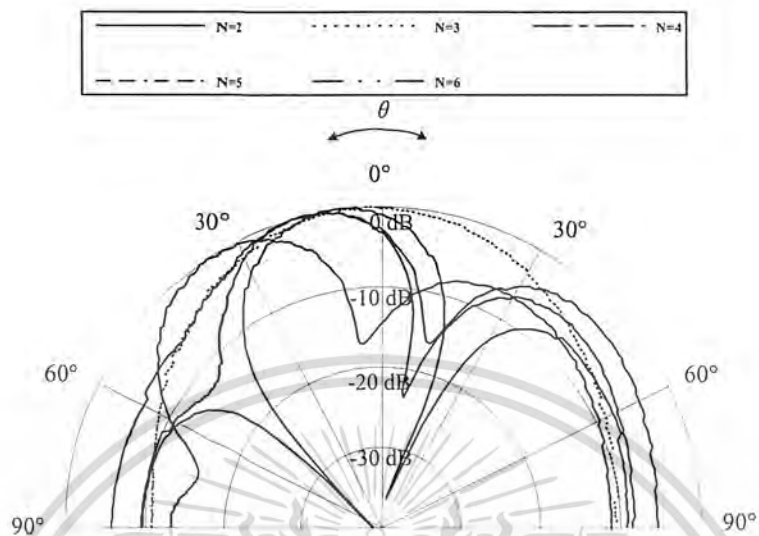
รูปที่ 3.36 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์คู่แรกในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลมตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์กรประกอบ

จะพบว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2 และ 3 องค์กรประกอบจะมีค่าอยู่ที่ 180 degree และที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 4,5 และ 6 องค์กรประกอบ จะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้นในส่วนของสนามแม่เหล็กที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 3 องค์กรประกอบ จะมีค่าอยู่ที่ 180 degree และที่จำนวนสายอากาศเท่ากับ 2,4,5 และ 6 องค์กรประกอบจะมีค่าลดลงตามค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์สายอากาศ ทั้งในกรณียูนิฟอร์ม (Uniform) และกรณี TE_{11} Mode เราจะพบว่าการแพร่กระจายคลื่นของทั้งสองกรณีมีลักษณะที่เหมือนกันจึงเป็นผลให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญของสายอากาศมีลักษณะที่เหมือนกันด้วย ดังนั้นในการวิเคราะห์สายอากาศเราจะไม่สนใจการแพร่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าว่าจะเป็นแบบยูนิฟอร์ม หรือ TE_{11} Mode และเมื่อเราทำการวิเคราะห์สายอากาศในกรณีที่ปรับเฟสเราจึงใช้สมการที่เป็นยูนิฟอร์ม หรือ TE_{11} Mode ก็ได้

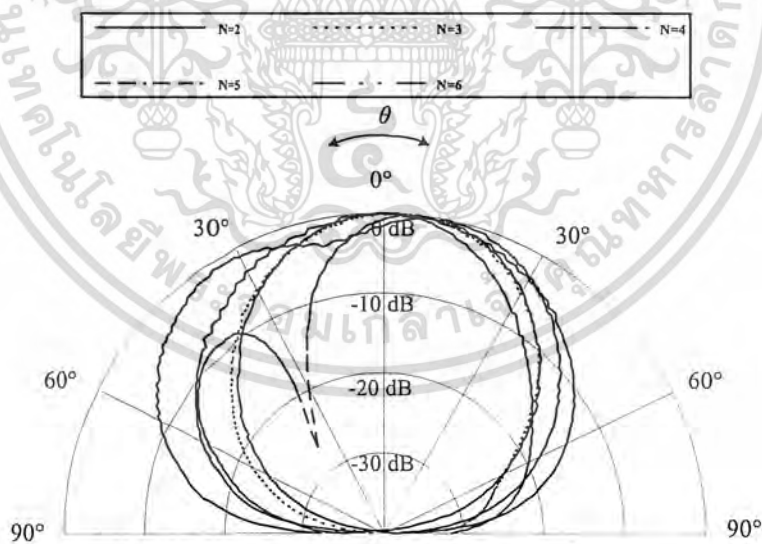
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในกรณีที่ทำกรปรับเฟส



รูปที่ 3.37 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเมื่อนำมาจัดเรียง

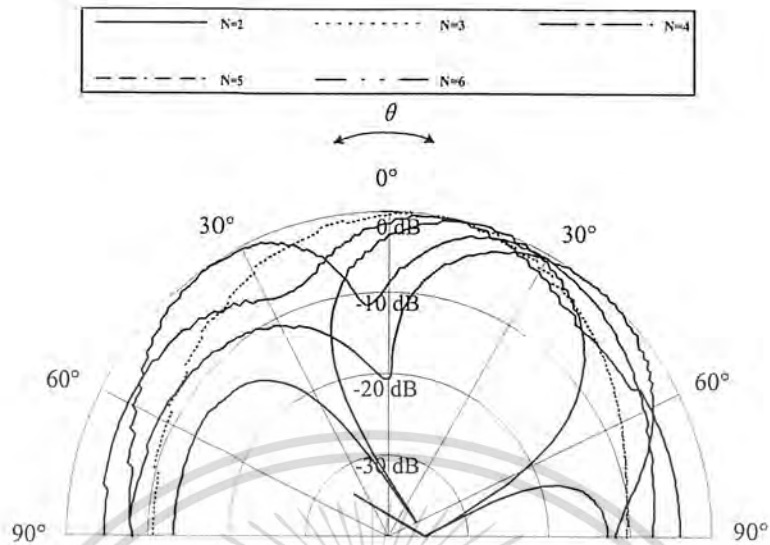
ตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ($\theta_0 = \frac{\pi}{2}, \phi_0 = \frac{\pi}{2}$)



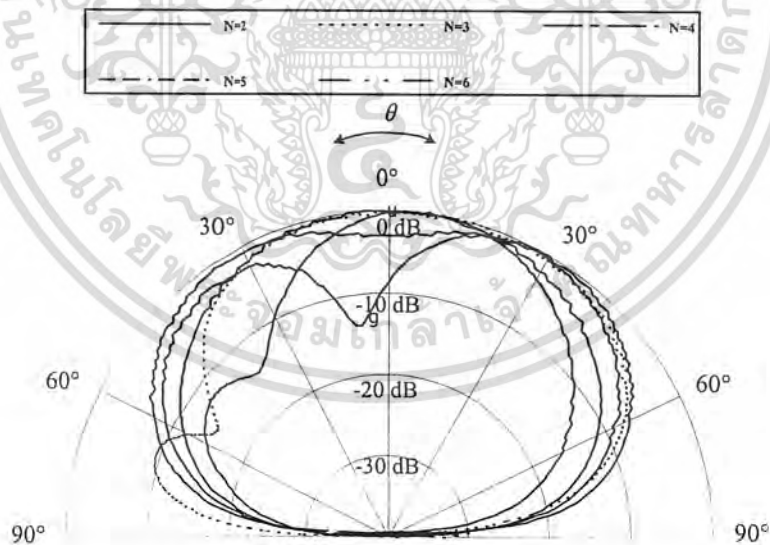
รูปที่ 3.38 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กเมื่อนำมาจัดเรียง

ตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ($\theta_0 = \frac{\pi}{2}, \phi_0 = \frac{\pi}{2}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

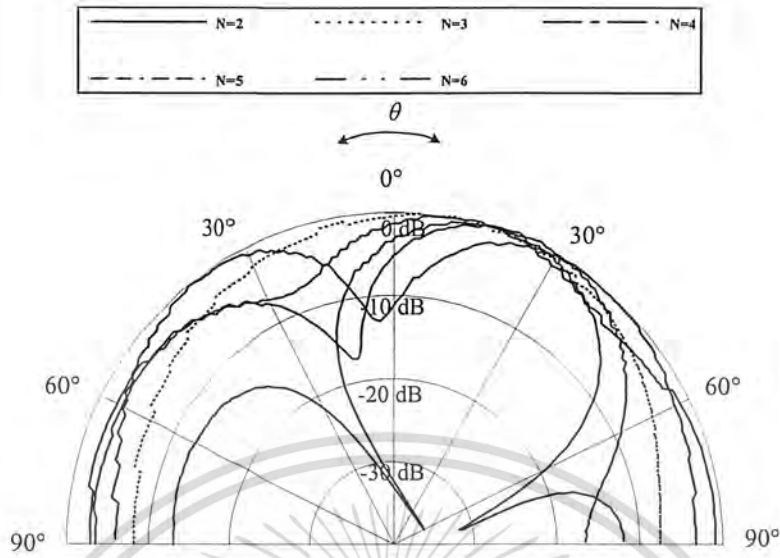


รูปที่ 3.39 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ($\theta_0 = \frac{\pi}{4}, \phi_0 = 0$)

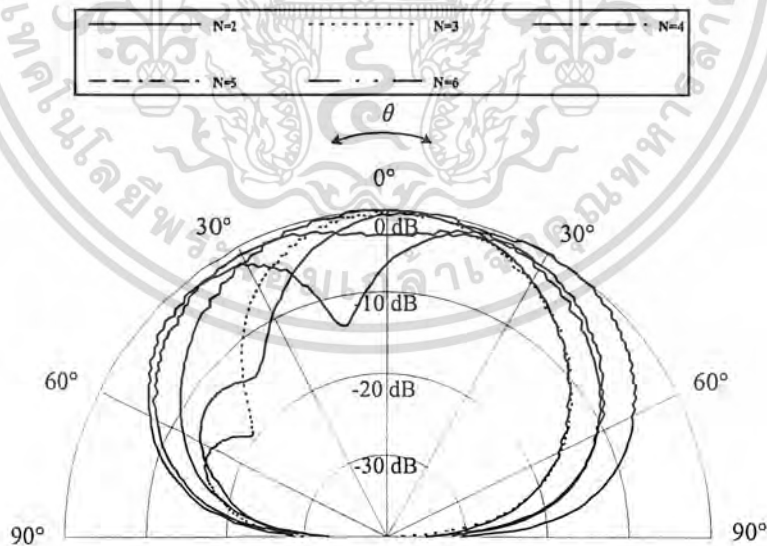


รูปที่ 3.40 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ($\theta_0 = \frac{\pi}{4}, \phi_0 = 0$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.41 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเมื่อนำมาจัดเรียงตั้งแต่ 2 ถึง 6 องค์ประกอบ ที่รัศมีเท่ากับ 0.50λ ($\theta_0 = \frac{\pi}{3}, \phi_0 = 0$)



รูปที่ 3.42 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็กเมื่อนำมาจัดเรียง

เอกสารนี้ เป็นเอกสารที่สังเคราะห์ขึ้นโดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดย ดร. สมเกียรติ วัฒนวิทย์ ที่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะพบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ทำการปรับเฟส และเมื่อเพิ่มค่ารัศมีให้มีความมากขึ้นก็จะทำให้ ความกว้างของลำคลื่นเล็กลงซึ่งก็หมายความว่า การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแรงขึ้นนั่นเอง



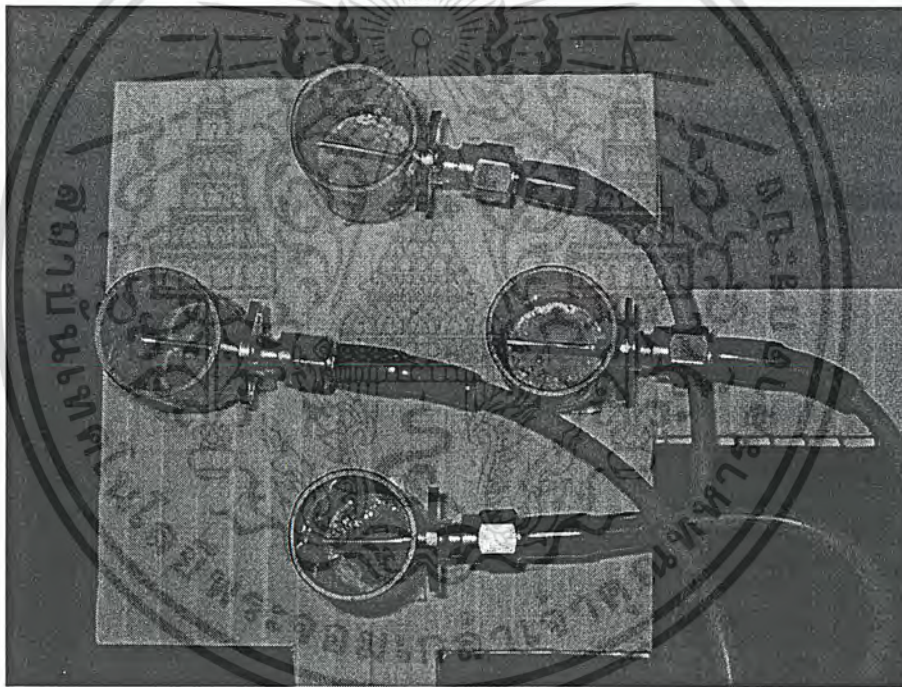
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสร้าง ทดสอบ และผลการทดสอบ

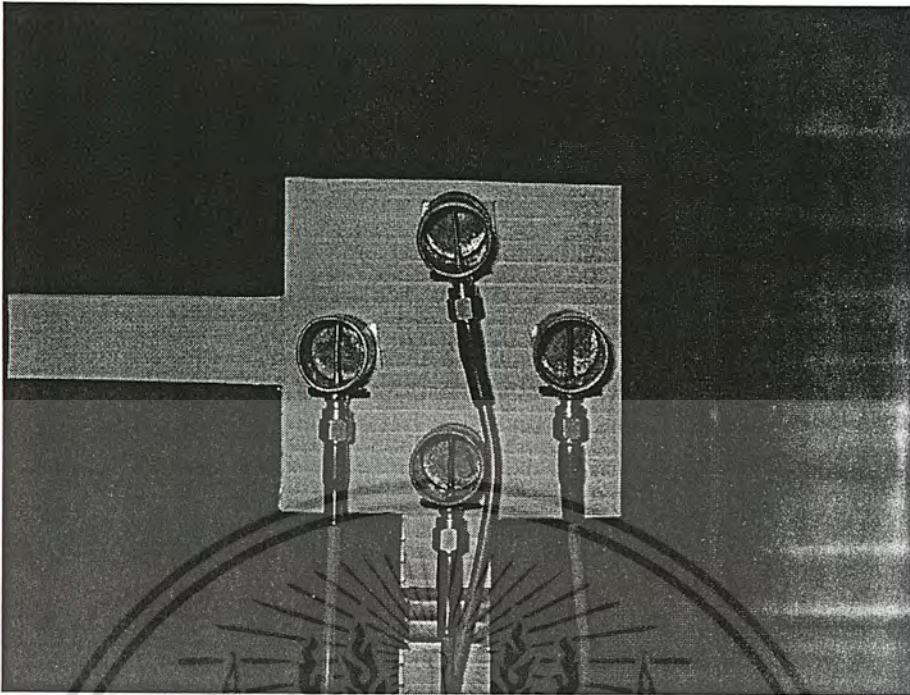
4.1 การสร้าง

จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ได้ทำการสร้างสายอากาศโดยเป็นสายอากาศจากท่อนำคลื่นวงกลมซึ่งมีค่าของรัศมี ของท่อนำคลื่นเท่ากับ 0.85 cm (0.358λ) และค่าความยาวของท่อนำคลื่นเท่ากับ 4 cm (1.687λ) มีค่าความยาวของโพรบเท่ากับ 1.5 cm (0.633λ) โดยทำงานที่ความถี่เท่ากับ 12.6575 GHz จากรูปแบบที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้นำสายอากาศที่ได้สร้างขึ้นไปทำการจัดเรียงเป็นแถวลำดับวงกลม ที่ได้วิเคราะห์ในบทที่ 3 สามารถแสดงรูปแบบการจัดเรียงสายอากาศได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 การจัดเรียงสายอากาศเป็นแถวลำดับวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



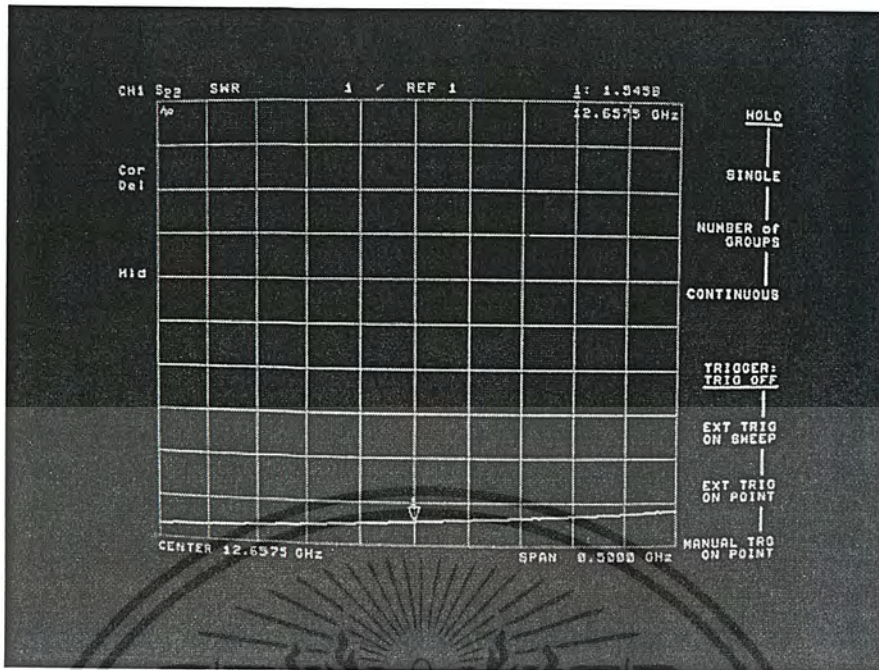
รูปที่ 4.2 การจัดเรียงสายอากาศเป็นแถวลำดับวงกลมที่ปรับเฟส

4.2 การทดสอบและผลการทดสอบ

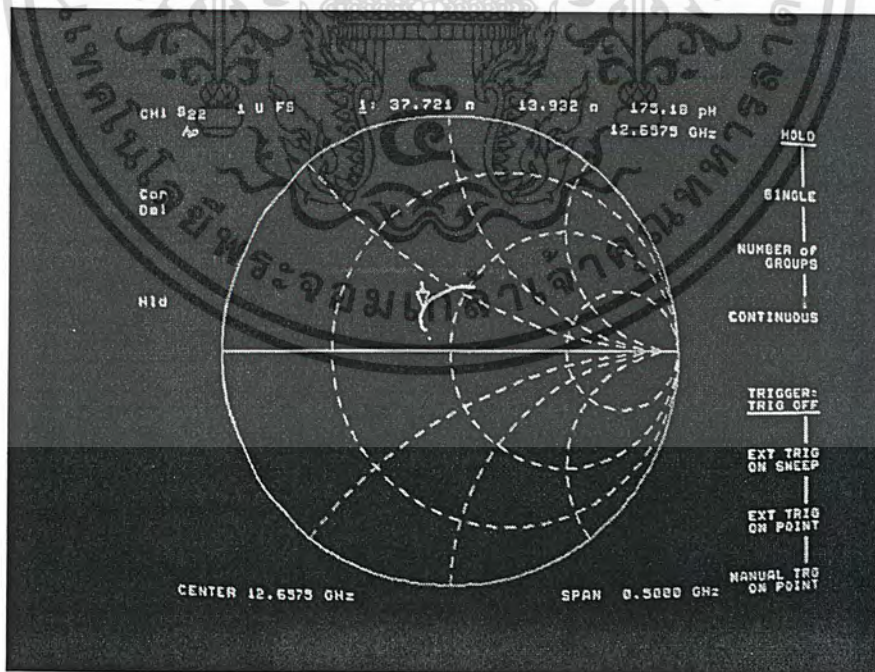
4.2.1 การทดสอบค่า VSWR, Return loss และ Impedance

สามารถแสดงผลการทดสอบและวิธีการทดสอบได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

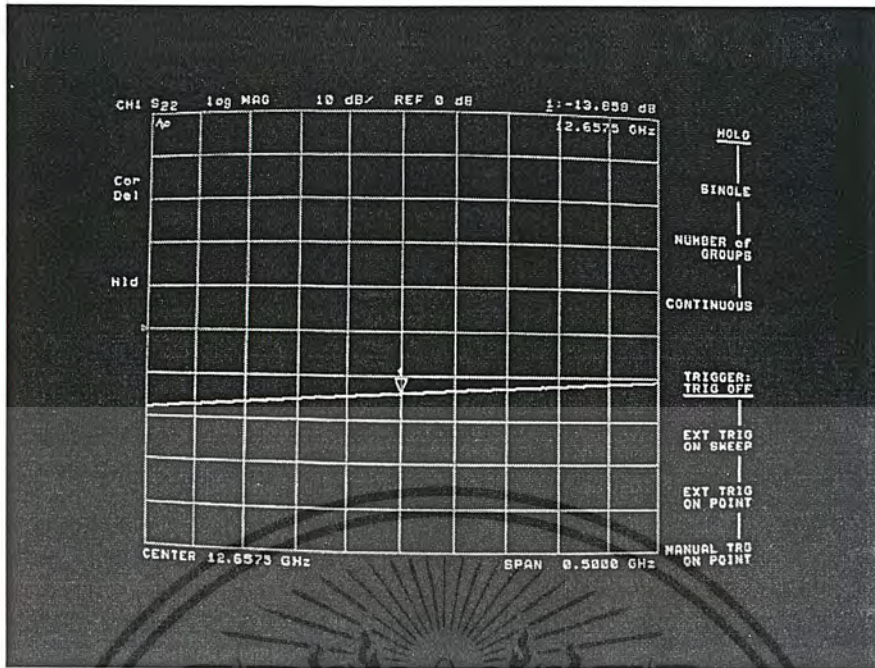


รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบค่า VSWR

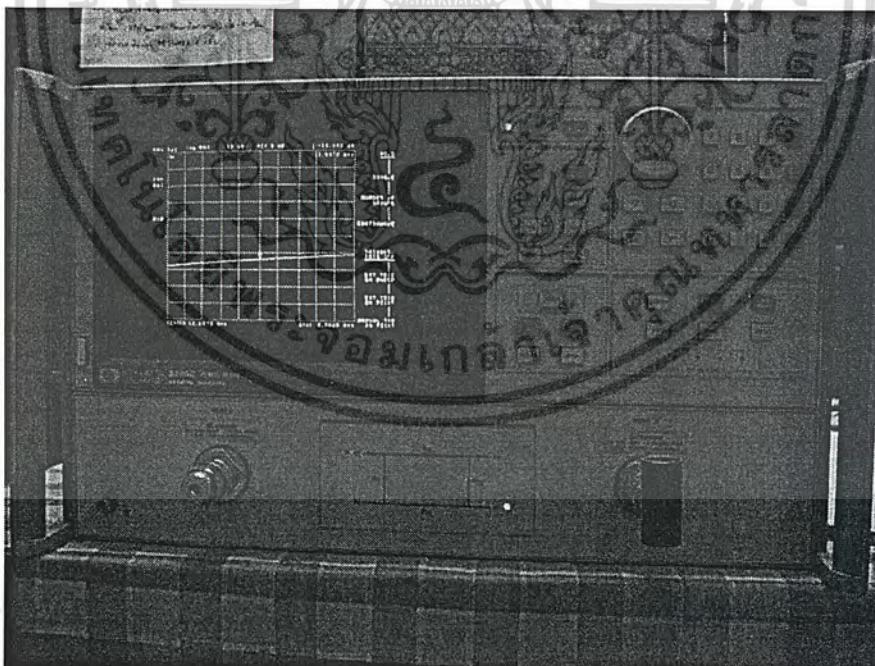


รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่า Impedance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



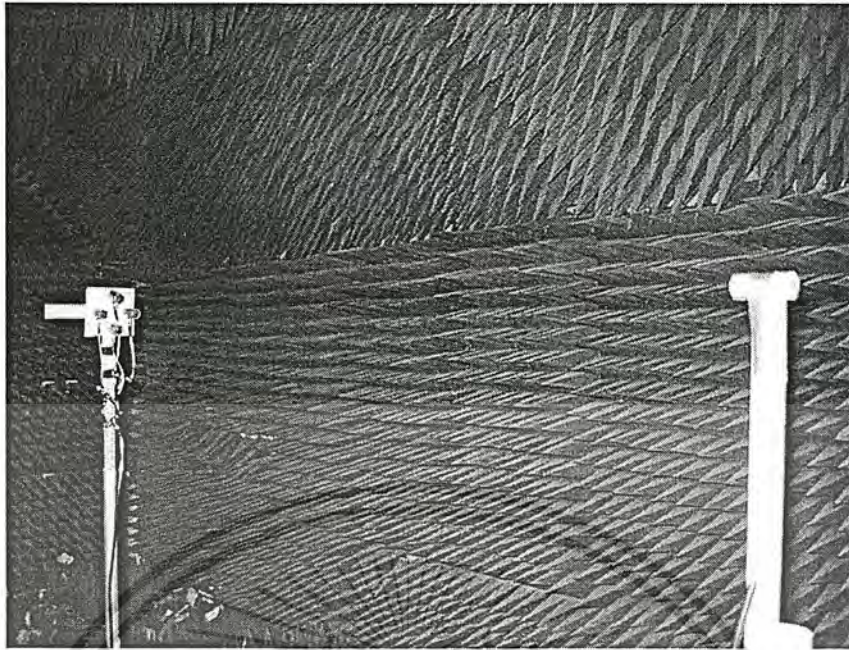
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบค่า Return loss



รูปที่ 4.6 รูปแบบของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ

และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ (Network Analyzer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

เนื่องจากจุดประสงค์ของปริณญาณพนธ์นี้ ต้องการทำสายอากาศแบบแถวลำดับวงกลม ซึ่งก็คือ รูปแบบของการจัดเรียงแถวลำดับที่ใช้สายอากาศ 4 องค์ประกอบ จึงจำเป็นที่จะต้องทำสายอากาศทั้ง 4 องค์ประกอบ ให้มีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกันเพื่อการจัดเรียงที่มีประสิทธิภาพ สามารถแสดงค่าคุณลักษณะของสายอากาศทั้ง 4 องค์ประกอบ ได้ดังตารางต่อไปนี้

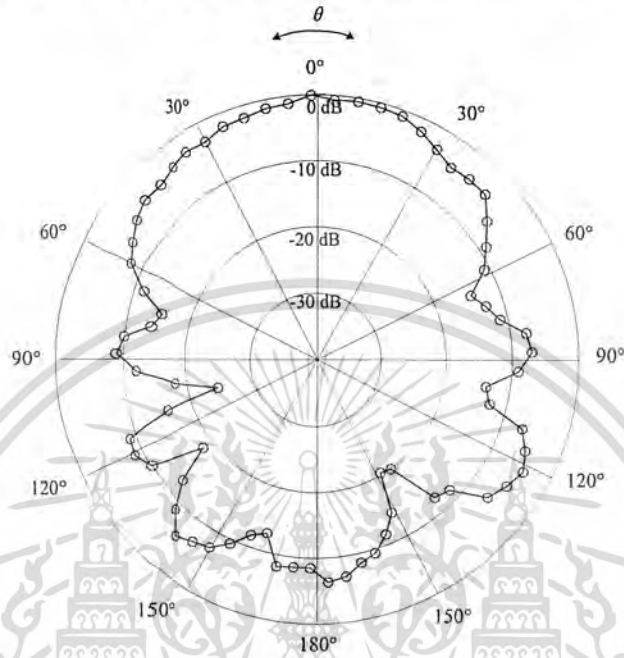
สายอากาศ (ลำดับที่)	VSWR	Impedance (Ω)	Return Loss (dB)	Gain (dBi)
1	1.5473	37.949 + j14.904	-13.357	5.8
2	1.6309	41.281 + j20.682	-12.403	5.8
3	1.6760	40.510 + j21.500	-11.951	5.8
4	1.8180	42.227 + j22.873	-11.896	5.8
จัดเรียง 4 ตัว	1.2704	39.834 - j44.922	-18.927	8.9

ตารางที่ 1 ค่าคุณลักษณะของสายอากาศ

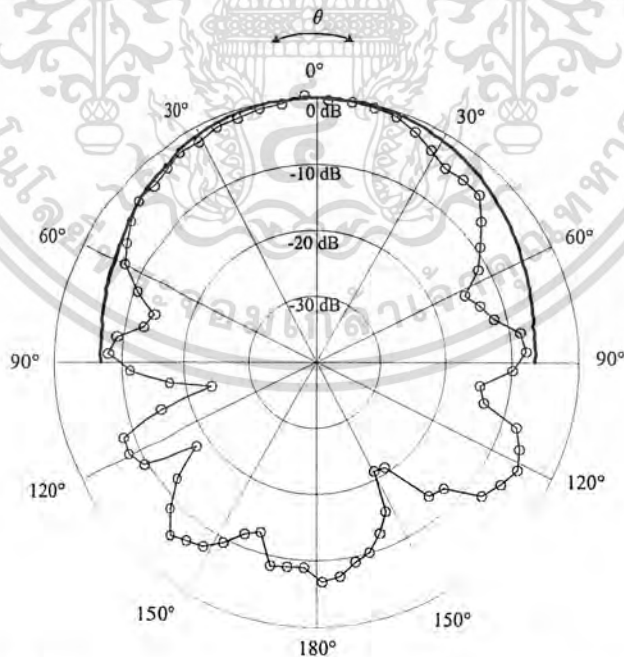
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะเริ่มจากการทดสอบสายอากาศองค์ประกอบเดียวก่อน จากนั้นก็ทำการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับวงกลม และสุดท้ายก็ทำการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับวงกลมที่ปรับเฟส



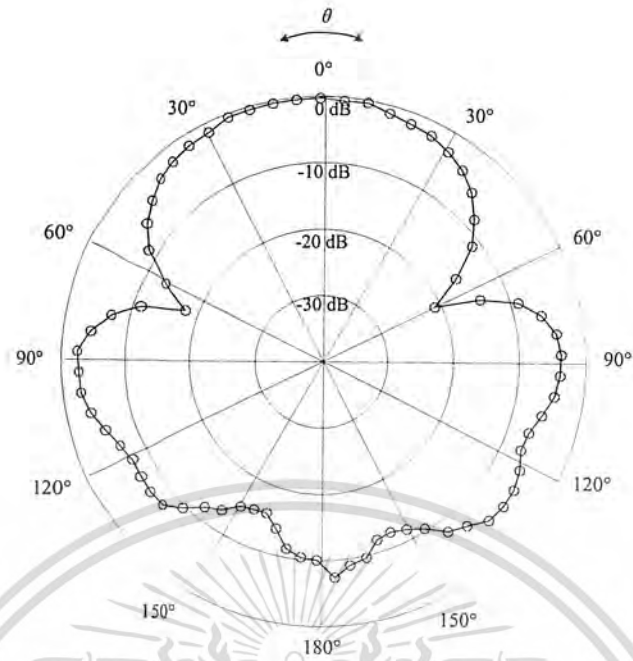
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบสายอากาศ 1 องค์ประกอบ ในระนาบสนามไฟฟ้า



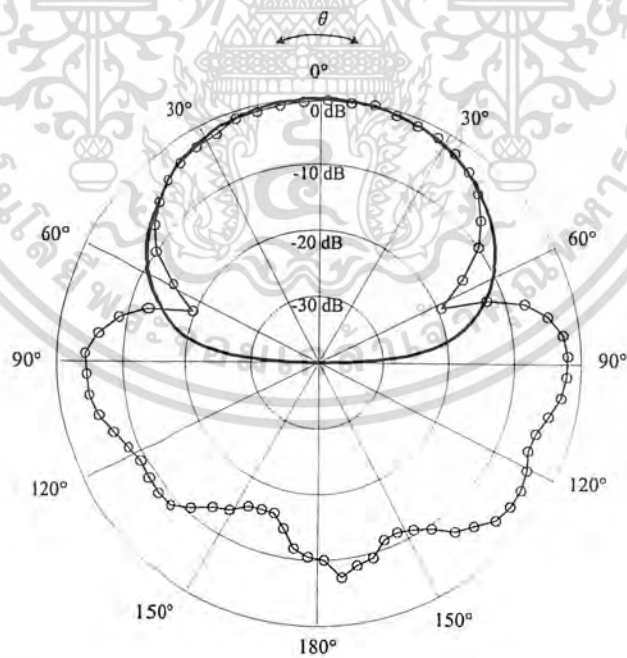
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบสายอากาศ 1 องค์ประกอบ ในระนาบสนามไฟฟ้า

เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



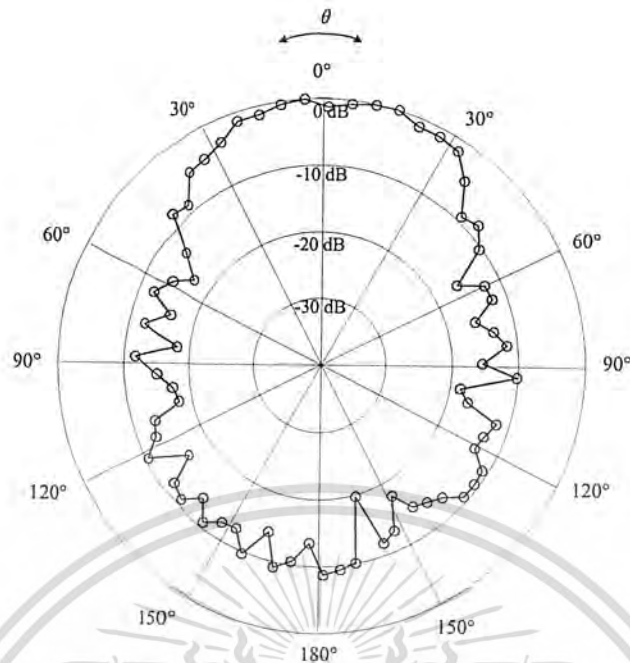
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบสายอากาศ 1 องค์ประกอบ ในระนาบสนามแม่เหล็ก



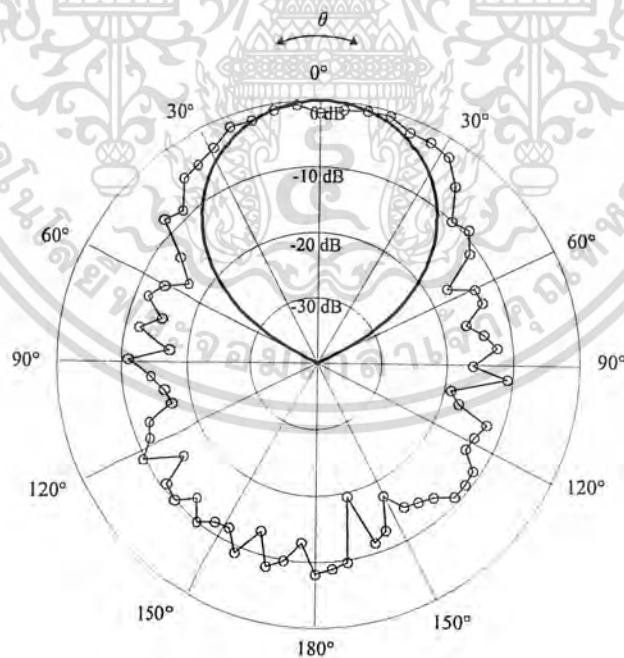
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบสายอากาศ 1 องค์ประกอบ ในระนาบสนามแม่เหล็ก

เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

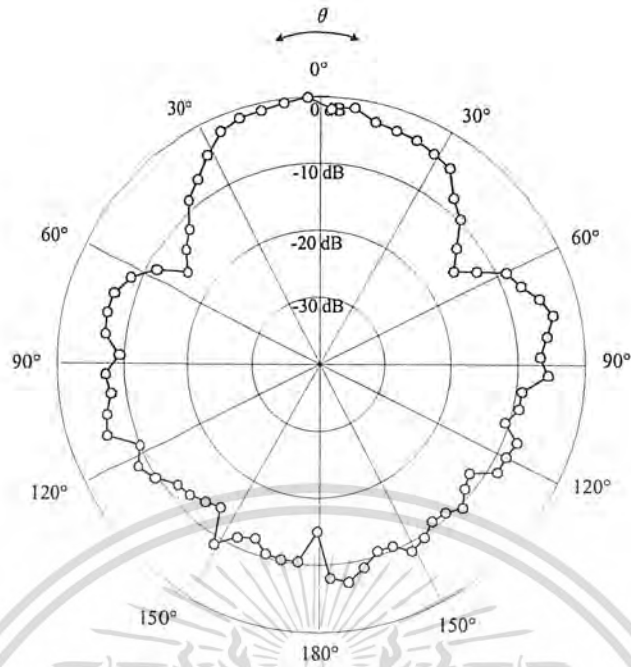


รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแฉวลำดับวงกลม
ในระนาบสนามไฟฟ้า

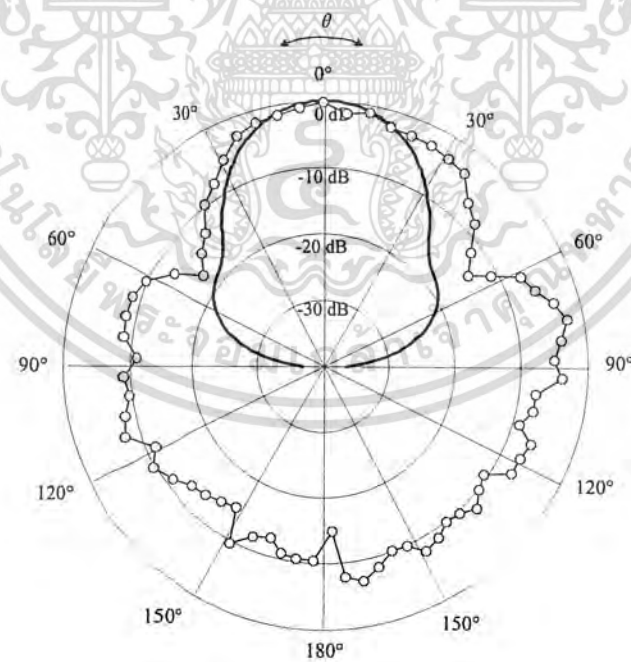


รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแฉวลำดับวงกลม
ในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



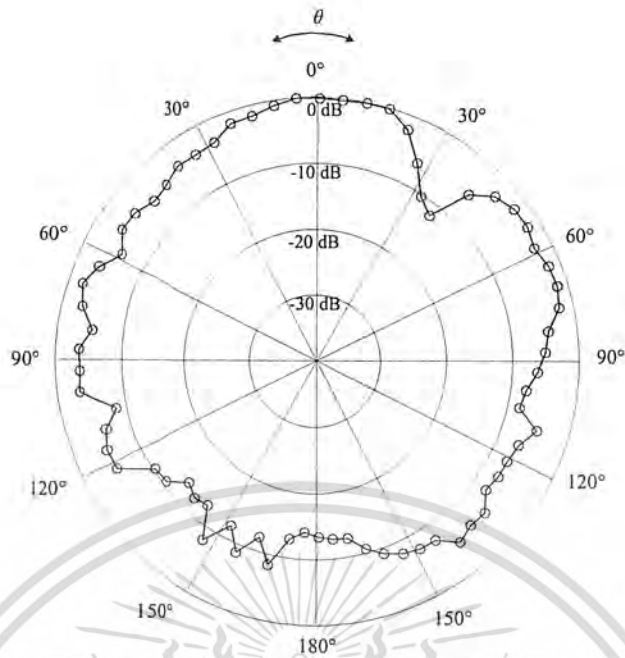
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับวงกลม
ในระนาบสนามแม่เหล็ก



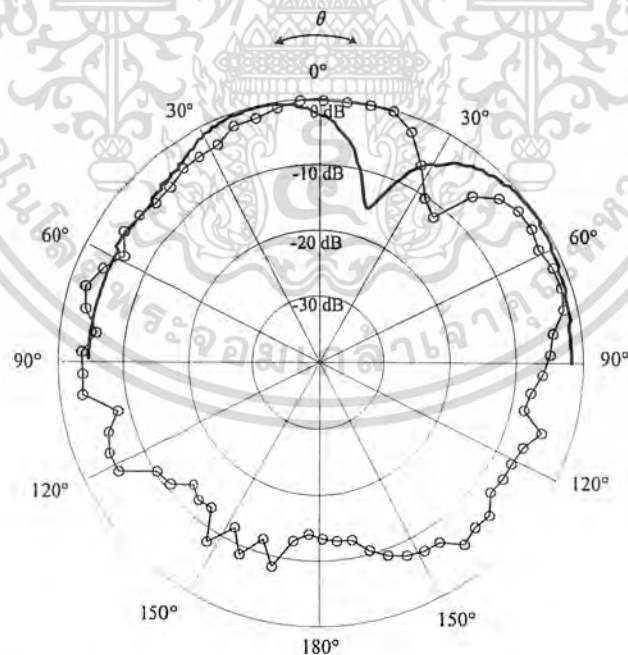
รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับวงกลม

ในระนาบสนามแม่เหล็กเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

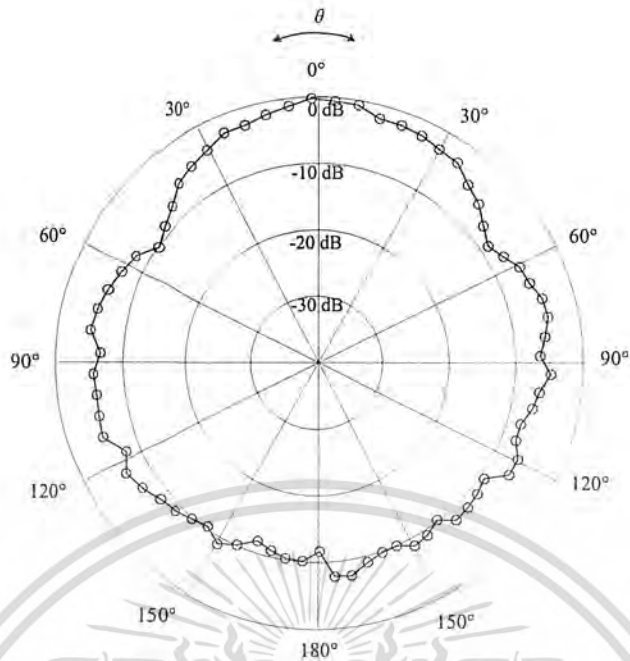


รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับวงกลม
ที่ปรับเฟสในระนาบสนามไฟฟ้า

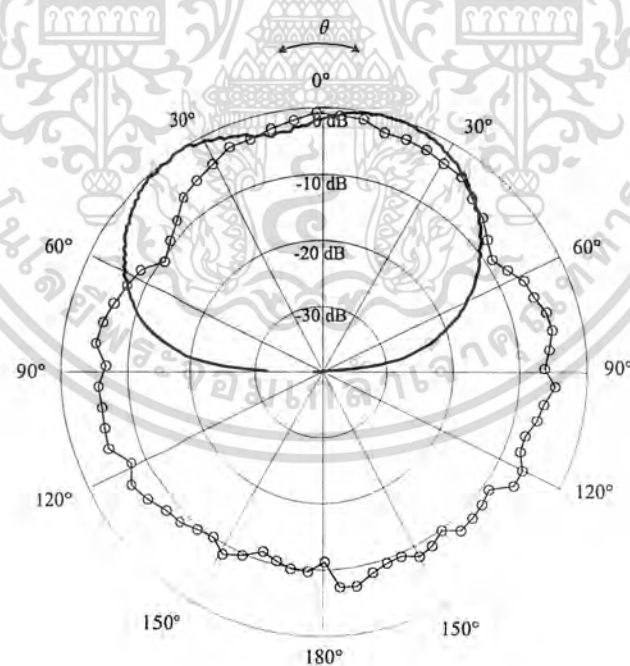


รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับวงกลม
ที่ปรับเฟสในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับวงกลม
ที่ปรับเฟสในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่จัดเรียงแบบแถวลำดับวงกลม
ที่ปรับเฟสในระนาบสนามแม่เหล็กเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่า ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้น มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปแบบที่ได้ทำการวิเคราะห์ นั่นหมายความว่า สายอากาศที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงตามความต้องการที่ได้ออกแบบไว้ ส่วนค่าที่ผิดเพี้ยนไปจากการวิเคราะห์นั้น อาจเกิดจากการไม่สัมพันธ์กัน (match) อย่างแท้จริงระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ รวมถึงตัวต่อ (Connector) ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับสายอากาศ ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจจะทำให้เกิดที่สูญเสีย (Loss) ของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศได้ ทำให้ผลที่ได้ผิดเพี้ยนไปเล็กน้อยไม่สมบูรณ์เหมือนกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้ทำการเสนอสายอากาศจากท่อนำคลื่นวงกลม ซึ่งมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนและราคาถูกสายอากาศที่ออกแบบไว้ จะทำงานที่ความถี่เท่ากับ 12.6575 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ตรงกับความถี่ของดาวเทียมไทยคม โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวทำให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในพื้นที่ที่มีลักษณะแคบ และยาวได้ดี เช่น ทางด่วน อุโมงค์ใต้ดิน หรือทางเดินเชื่อมต่อกภายในอาคาร รูปแบบของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบไว้มีลักษณะดังนี้ คือ เป็นท่อนำคลื่นทรงกระบอกมีคาร์ซีมีเท่ากับ 0.85 cm และมีความยาวของท่อนำคลื่น 4 cm โดยใช้โพรบที่เป็นโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นมีความยาวประมาณ 1.5 cm จากนั้นได้นำรูปแบบสายอากาศที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้นไปทำการจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบวงกลม ซึ่งการจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบวงกลมจะมีผลให้ค่าการชี้ทิศทางมีค่าสูงขึ้นแต่ก็จะเป็นผลให้เกิดลำคลื่นขยับขึ้นมา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศให้เหมาะสม เพื่อควบคุมระดับของลำคลื่นขยับให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม ก็ต้องทำให้ค่าการชี้ทิศทางมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้สามารถส่งคลื่นออกไปได้ไกล ซึ่งจะทำให้สามารถลดจำนวนของการติดตั้งสายอากาศในแต่ละจุดได้ นั้นหมายความว่า ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งลดลงด้วย ดังนั้นปริญญาานิพนธ์นี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างสายอากาศที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดด้วย สำหรับค่าที่ผิดเพี้ยนไปเล็กน้อยที่เกิดขึ้นจากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้น อาจเกิดจากการไม่สัมพันธ์กันอย่างแท้จริงระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด รวมถึงตัวต่อ (Connector) ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับสายอากาศ ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดการสูญเสีย (Loss) ของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศได้ ทำให้ผลที่ได้ผิดเพี้ยนไปเล็กน้อยไม่สมบูรณ์เหมือนกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ แต่ผลทดสอบโดยรวมแสดงให้เห็นว่า สายอากาศที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้ตรงตามความต้องการที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ ซึ่งในโครงการนี้จะใช้โปรแกรมแมทแคท 2001 ในการวิเคราะห์ ซึ่งโปรแกรมในการวิเคราะห์มีดังนี้

1. การวัดค่าสภาพเจาะจงทิศทาง, แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น, ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศในกรณีองค์ประกอบเดียวของยูนิฟอร์ม

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad E0 := 1 \quad \lambda := \frac{c}{f}$$

$$k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad a := m \cdot \lambda \quad \lambda = 0.024 \quad \eta := 120 \pi \quad \ln := 1$$

$$\theta := 90\text{deg}, 90\text{deg} - 0.5\text{deg} \dots -90\text{deg}$$

$$E\theta(\theta, \phi) := j \cdot k \cdot a^2 \cdot E0 \left[\sin(\phi) \cdot \left(\frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)} \right) \right]$$

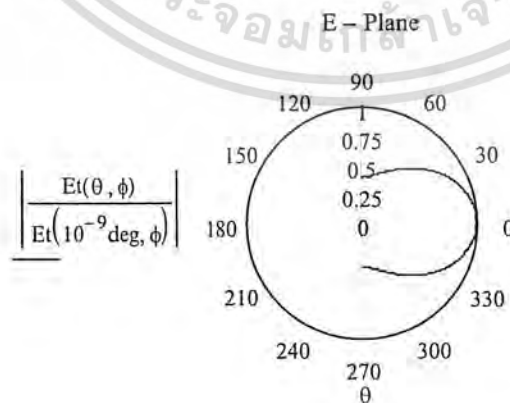
$$E\phi(\theta, \phi) := j \cdot k \cdot a^2 \cdot E0 \left[\cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \left(\frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)} \right) \right]$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E\theta(\theta, \phi)^2 + E\phi(\theta, \phi)^2} \quad U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot (|E_t(\theta, \phi)|)^2$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \cdot \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi$$

$$D(\theta, \phi) := \frac{4\pi \cdot U(\theta, \phi)}{\text{Prad}}$$

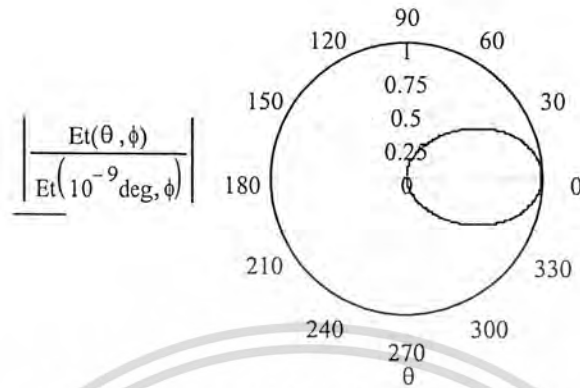
$$\phi := 90\text{deg} \quad m := 0.4$$



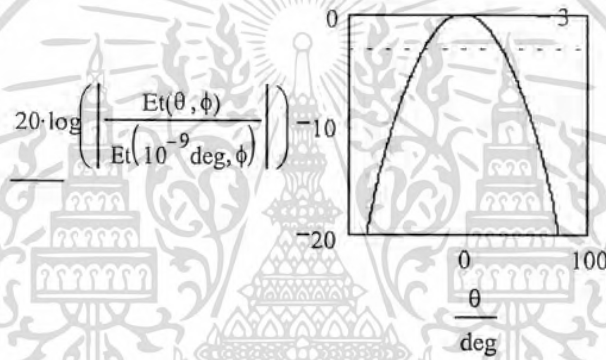
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi := 0\text{deg}$$

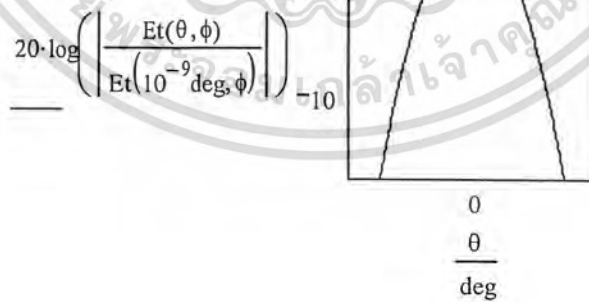
H - Plane



HPBW of E-Plane



HPBW of H-Plane



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดค่าสภาพเจาะจงทิศทาง, แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น, ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลง
 ครึ่งหนึ่งของสายอากาศในกรณีองค์ประกอบเดียว TE_{11} Mode

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad E0 := 1 \quad \lambda := \frac{c}{f}$$

$$k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad a := m \cdot \lambda \quad \lambda = 0.024 \quad \eta := 120 \pi \quad In := 1$$

$$\theta := 90\text{deg}, 90\text{deg} - 0.5\text{deg} \dots -90\text{deg}$$

$$E\theta(\theta, \phi) := j \cdot k \cdot a \cdot J_1(1.841) \cdot E0 \left[\sin(\phi) \cdot \left(\frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)} \right) \right]$$

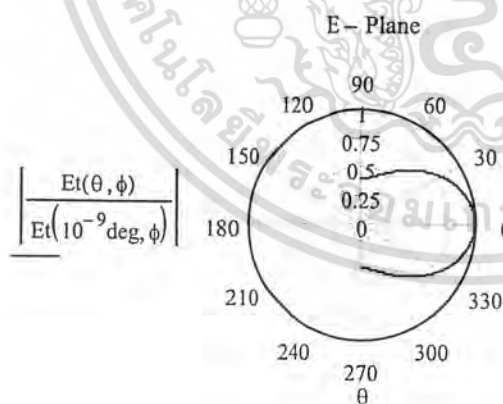
$$E\phi(\theta, \phi) := j \cdot k \cdot a \cdot J_1(1.841) \cdot E0 \left[\cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{J_0(k \cdot a \cdot \sin(\theta)) - \frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)}}{1 - \left[\frac{(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{1.841} \right]^2} \right]$$

$$Et(\theta, \phi) := \sqrt{E\theta(\theta, \phi)^2 + E\phi(\theta, \phi)^2} \quad U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot (|Et(\theta, \phi)|)^2$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \cdot \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi$$

$$D(\theta, \phi) := \frac{4\pi \cdot U(\theta, \phi)}{\text{Prad}}$$

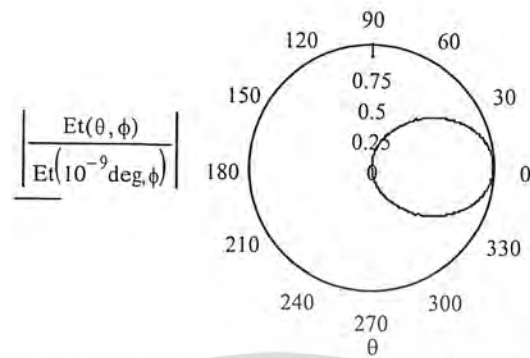
$$\phi := 90\text{deg} \quad m \approx 0.4$$



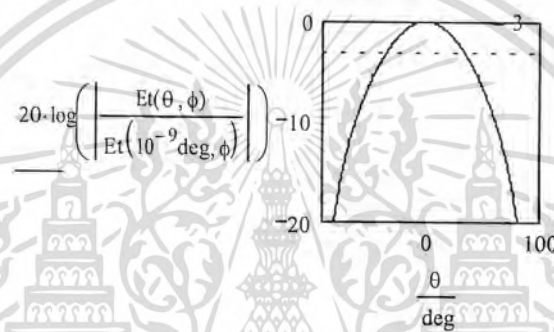
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi := 0\text{deg}$$

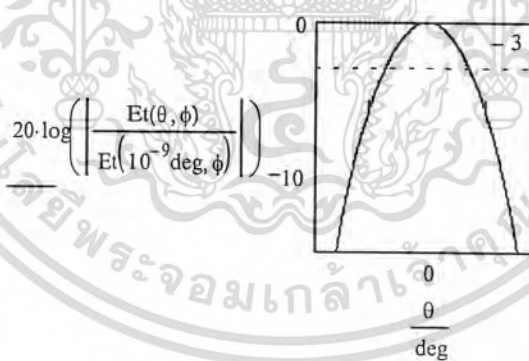
H - Plane



HPBW of E-Plane



HPBW of H-Plane

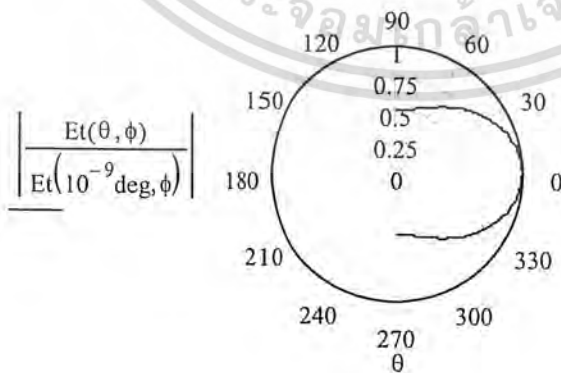


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวัดค่าสภาพเจาะจงทิศทาง, แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น, ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง, ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์กลาง, ค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยของสายอากาศแบบแถวลำดับวงกลมในกรณียูนิฟอร์ม

$$\begin{aligned}
 j &:= \sqrt{-1} & c &:= 3 \cdot 10^8 & f &:= 12.657510^9 & \lambda &:= \frac{c}{f} & k &:= \frac{2\pi}{\lambda} \\
 \lambda &= 0.024 & \eta &:= 120 \cdot \pi & E_0 &:= 1 & r_1 &:= m\lambda & a &:= 0.358\lambda \\
 N &:= 2 & n &:= 1..N & I_n &:= 1 & \theta &:= -90\text{deg}, -90\text{deg} + 1\text{deg}..90\text{deg} \\
 \Phi_n &:= 2\pi \left(\frac{n}{N} \right) & AF(\theta, \phi) &:= \sum_{n=1}^N I_n \cdot e^{j \cdot (k \cdot r_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi - \Phi_n))} \\
 E_\theta(\theta, \phi) &:= j \cdot k \cdot a^2 \cdot E_0 \left[\sin(\phi) \cdot \left(\frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)} \right) \right] \cdot AF(\theta, \phi) \\
 E_\phi(\theta, \phi) &:= j \cdot k \cdot a^2 \cdot E_0 \left[\cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \left(\frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)} \right) \right] \cdot AF(\theta, \phi) \\
 E_t(\theta, \phi) &:= \sqrt{E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2} \\
 \text{Prad} &:= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \cdot \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi & U(\theta, \phi) &:= \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot (|E_t(\theta, \phi)|)^2 \\
 D(\theta, \phi) &:= \frac{4\pi \cdot U(\theta, \phi)}{\text{Prad}} \\
 \phi &:= 90\text{deg} & m &\equiv 0.4
 \end{aligned}$$

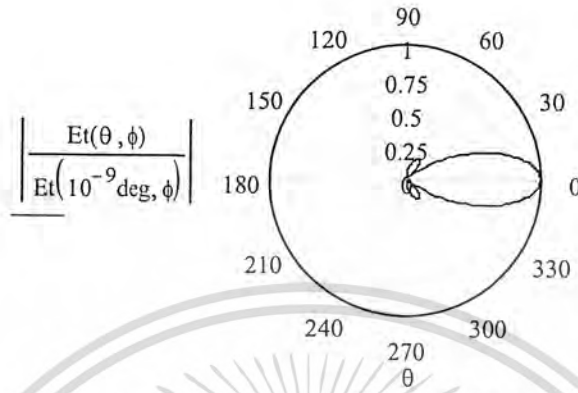
E - Plane



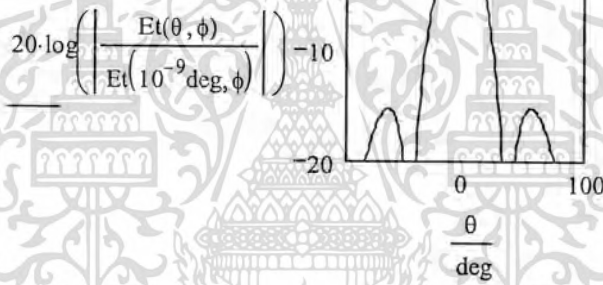
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi := 0\text{deg}$$

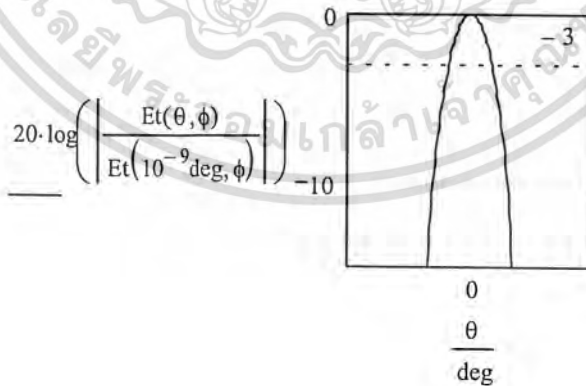
H - Plane



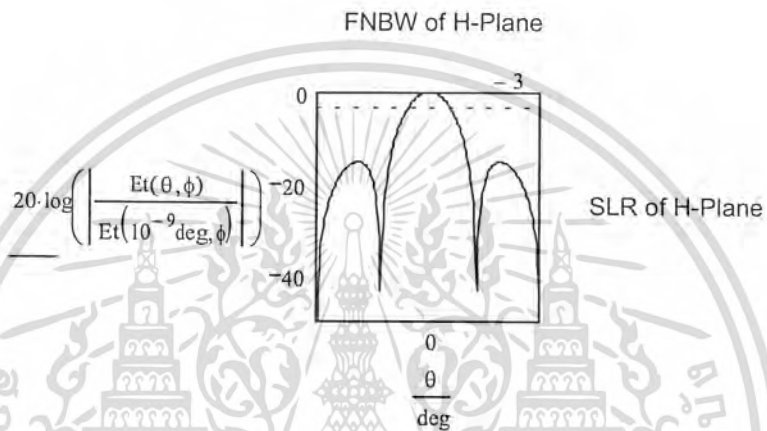
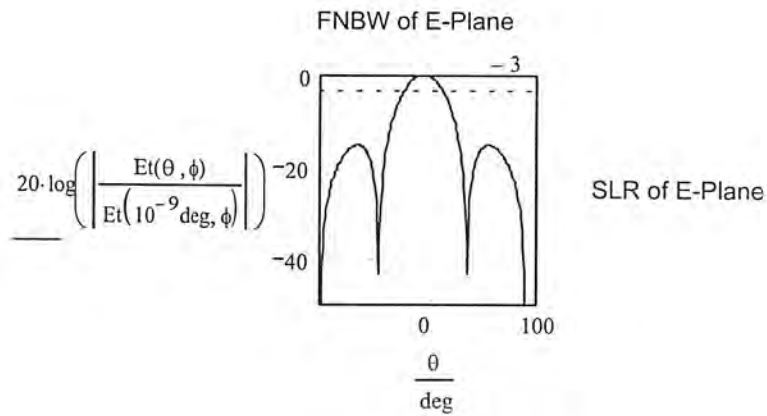
HPBW of E-Plane



HPBW of H-Plane



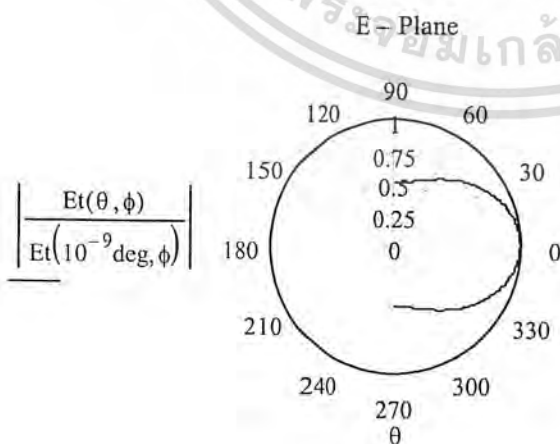
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การวัดค่าสภาพเจาะจงทิศทาง, แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น, ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง, ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์กลางแรก, ค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยของสายอากาศแบบแถวลำดับวงกลมในกรณี TE₁₁ Mode

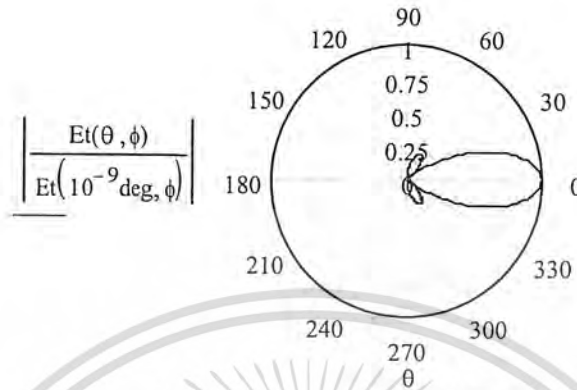
$$\begin{aligned}
 j &:= \sqrt{-1} & c &:= 3 \cdot 10^8 & f &:= 12.657510^9 & \lambda &:= \frac{c}{f} & k &:= \frac{2\pi}{\lambda} \\
 \lambda &= 0.024 & \eta &:= 120\pi & E_0 &:= 1 & r_1 &:= m\lambda & a &:= 0.358\lambda \\
 N &:= 2 & n &:= 1..N & I_n &:= 1 & \theta &:= -90\text{deg}, -90\text{deg} + 1\text{deg}..90\text{deg} \\
 \Phi_n &:= 2\pi \left(\frac{n}{N} \right) & AF(\theta, \phi) &:= \sum_{n=1}^N I_n \cdot e^{j(k \cdot r_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi - \Phi_n))} \\
 E_\theta(\theta, \phi) &:= j \cdot k \cdot a \cdot J_1(1.841) \cdot E_0 \left[\sin(\phi) \cdot \left(\frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)} \right) \right] \cdot AF(\theta, \phi) \\
 E_\phi(\theta, \phi) &:= j \cdot k \cdot a \cdot J_1(1.841) \cdot E_0 \left[\cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \left[\frac{J_0(k \cdot a \cdot \sin(\theta)) - \frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)}}{1 - \left[\frac{(k \cdot a \cdot \sin(\theta))^2}{1.841^2} \right]} \right] \right] \cdot AF(\theta, \phi) \\
 E_t(\theta, \phi) &:= \sqrt{E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2} \\
 \text{Prad} &:= \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} U(\theta, \phi) \cdot \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi & U(\theta, \phi) &:= \frac{1}{2\eta} \cdot (|E_t(\theta, \phi)|)^2 \\
 D(\theta, \phi) &:= \frac{4\pi \cdot U(\theta, \phi)}{\text{Prad}} \\
 \phi &:= 90\text{deg} & m &:= 0.4
 \end{aligned}$$



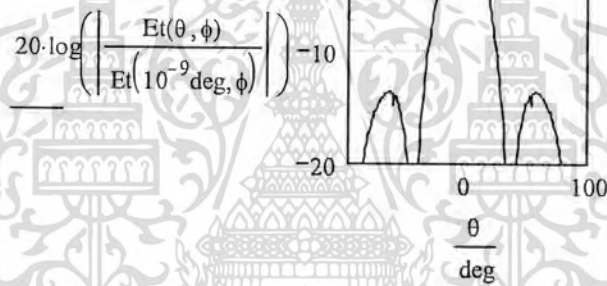
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi := 0\text{deg}$$

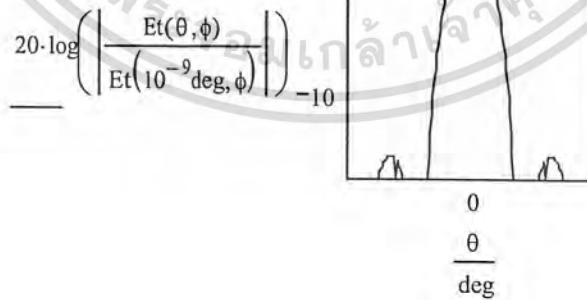
H - Plane



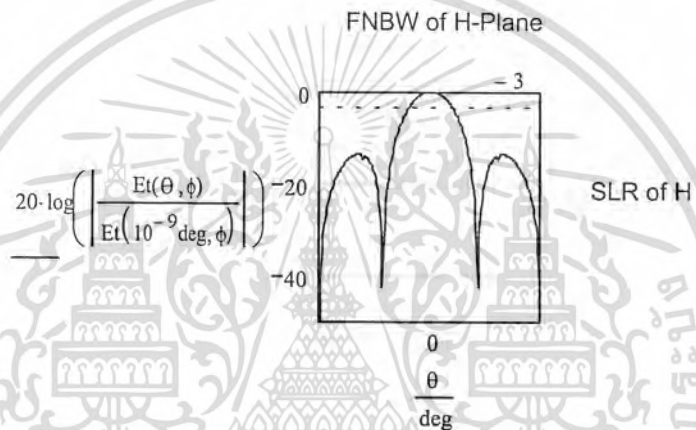
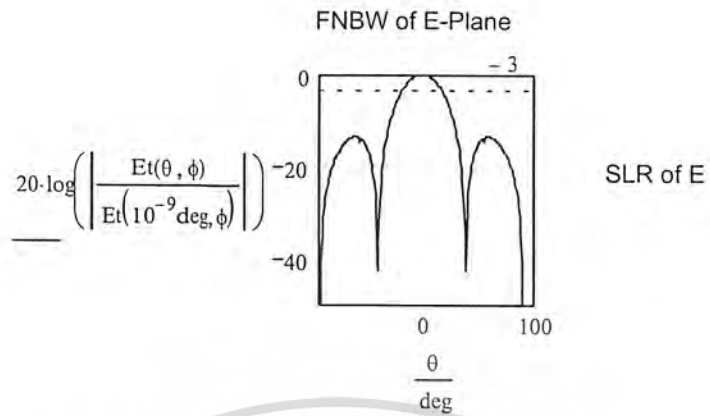
HPBW of E-Plane



HPBW of H-Plane



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การวัดแบบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ปรับเฟสในกรณียูนิฟอร์ม

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\lambda = 0.024 \quad \eta := 120\pi \quad E_0 := 1 \quad r_1 := m\lambda \quad a := 0.358\lambda$$

$$N := 2 \quad n := 1..N \quad I_n := 1 \quad \theta := -90\text{deg}, -90\text{deg} + 1\text{deg}..90\text{deg}$$

$$\Phi(n) := \left[2 \cdot 180 \left(\frac{n}{N} \right) \right] \quad AF(\theta, \phi) := \sum_{n=1}^N I_n \cdot e^{j(k \cdot r_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi - \Phi_n))}$$

$$\theta_0 := 90\text{deg} \quad \phi_0 := 90\text{deg} \quad \alpha(n) := -\pi \cdot \sin(\theta_0) \cdot \cos(\phi_0 - \Phi(n))$$

$$AF(\theta, \phi) := \sum_{n=1}^N I_n \cdot e^{j(k \cdot r_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi - \Phi(n)) + \alpha(n))}$$

$$E_\theta(\theta, \phi) := j \cdot k \cdot a^2 \cdot E_0 \left[\sin(\phi) \cdot \left(\frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)} \right) \right] \cdot AF(\theta, \phi)$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := j \cdot k \cdot a^2 \cdot E_0 \left[\cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \left(\frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)} \right) \right] \cdot AF(\theta, \phi)$$

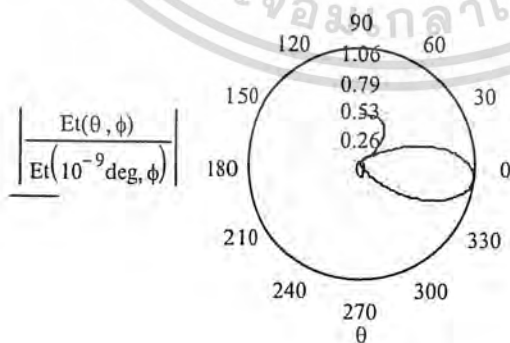
$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2}$$

$$Prad := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \cdot \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad U(\theta, \phi) := \frac{r_1}{2 \cdot \eta} \cdot (|E_t(\theta, \phi)|)^2$$

$$D(\theta, \phi) := \frac{4\pi \cdot U(\theta, \phi)}{Prad}$$

$$\phi := 90\text{deg} \quad m := 0.4$$

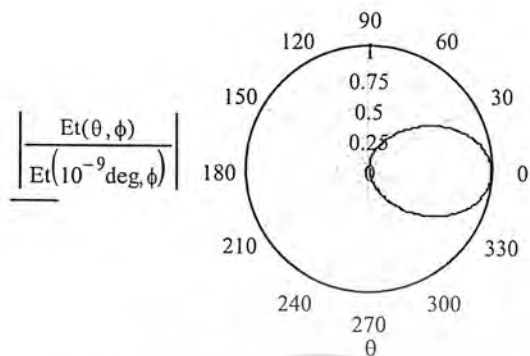
E - Plane



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi := 0\text{deg}$$

H - Plane



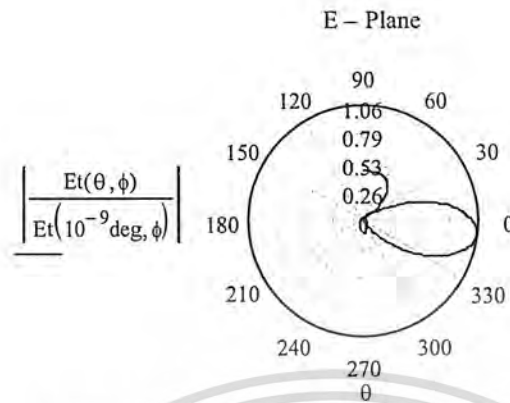
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การวัดแบบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ปรับเฟสในกรณี TE₁₁ Mode

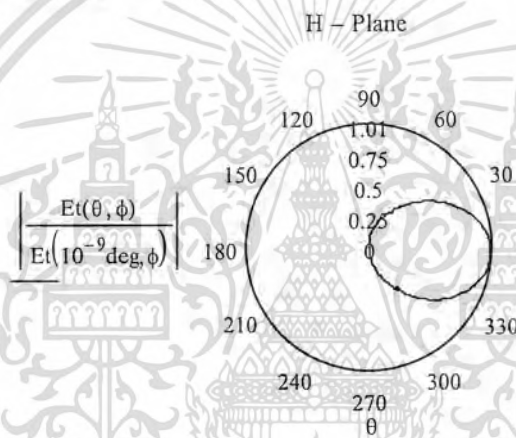
$$\begin{aligned}
 j &:= \sqrt{-1} & c &:= 3 \cdot 10^8 & f &:= 12.6575 \cdot 10^9 & \lambda &:= \frac{c}{f} & k &:= \frac{2\pi}{\lambda} \\
 \lambda &= 0.024 & \eta &:= 120 \pi & E_0 &:= 1 & r_1 &:= m\lambda & a &:= 0.358 \lambda \\
 N &:= 2 & n &:= 1..N & I_n &:= 1 & \theta &:= -90 \text{deg}, -90 \text{deg} + 1 \text{deg}..90 \text{deg} \\
 \Phi(n) &:= \left[2.180 \left(\frac{n}{N} \right) \right] & AF(\theta, \phi) &:= \sum_{n=1}^N I_n \cdot e^{j \cdot (k \cdot r_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi - \Phi_n))} \\
 \theta_0 &:= 90 \text{deg} & \phi_0 &:= 90 \text{deg} & \alpha(n) &:= -\pi \cdot \sin(\theta_0) \cdot \cos(\phi_0 - \Phi(n)) \\
 AF(\theta, \phi) &:= \sum_{n=1}^N I_n \cdot e^{j \cdot (k \cdot r_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi - \Phi(n)) + \alpha(n))} \\
 E\theta(\theta, \phi) &:= j \cdot k \cdot a \cdot J_1(1.841) \cdot E_0 \left[\sin(\phi) \cdot \left(\frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)} \right) \right] \cdot AF(\theta, \phi) \\
 E\phi(\theta, \phi) &:= j \cdot k \cdot a \cdot J_1(1.841) \cdot E_0 \left[\cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{J_0(k \cdot a \cdot \sin(\theta)) - \frac{J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)}}{1 - \left[\frac{(k \cdot a \cdot \sin(\theta))^2}{1.841} \right]^2} \right] \cdot AF(\theta, \phi) \\
 E_t(\theta, \phi) &:= \sqrt{E\theta(\theta, \phi)^2 + E\phi(\theta, \phi)^2} \\
 Prad &:= \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} U(\theta, \phi) \cdot \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi & U(\theta, \phi) &:= \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot (|E_t(\theta, \phi)|)^2 \\
 D(\theta, \phi) &:= \frac{4\pi \cdot U(\theta, \phi)}{Prad}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi := 90\text{deg} \quad m \equiv 0.4$$



$$\phi := 0\text{deg}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับคำแนะนำ และได้รับความช่วยเหลือจากหลายท่านดังนี้

ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ผศ.ดร.สมผล โกศลวิตร

ดร.ชาญชัย ทองโสภากา

คุณไพโรจน์ วุ่นชุ่ม

คุณสุรชาติณี ละมุลตรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R.E. Collin, "Antenna and Radiowave Propagation," McGraw – Hill International Edition, 1985
- [2] C.A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design," 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 1997
- [3] C.A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics," John Wiley & Sons, Inc., 1998
- [4] K.F. Sander and G.A.L.Reed, "Transmission and Propagation of Electromagnetic Waves," Cambridge University Press, 1986
- [5] Robert E. Collin, "Field Theory of Guided Waves," McGraw – Hill Book Company, Inc., 1960



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้