



สายอากาศชนิดวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ
An Elliptical Ring Antenna Excited by a Probe

ตรวจรับแล้ว
[Signature]

โดย
นายชินทร์ วงศ์ป๋อง
นางสาวพฝัน กำจายกลาง
นายมงคล ชีพอุบัติ

มพ. HN
6154ด

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62104
วัน,เดือน,ปี 31 ก.ค. 2549

b..... 11587015
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา
วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาและเพื่อประโยชน์ในการวิจัยและการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศชนิดวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ
An Elliptical Ring Antenna Excited by a Probe



ปรกษณานพนธน์นเป็นส่วนหน่งของการศกษาตามหลกสูตรปรกษณาวศวกรรมศาสตรบณฑต
สาขาวิชาศวกรรมทรคมนาคน
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปการศกษา 2547

เอกสารนเป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพอการศกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใชประยชนดานการค้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทังสิ้น อกทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกคร้งทมีการนำไปใช

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศชนิดวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ

An Elliptical Ring Antenna Excited by a Probe

ผู้จัดทำ

1. นายชนินทร์ วงศ์ป๋อง 45015005

2. นางสาวพาฝัน คำจายกลาง 45015019

3. นายมงคล ชีพอุบัติ 45015024


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร. ชuang ค์ พงศ์เจริญพานิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศชนิดวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ

An Elliptical Ring Antenna Excited by a Probe

โดย นายชนินทร์ วงศ์ป๋อง 45015005

นางสาวพาฝัน กำจายกลาง 45015019

นายมงคล ชีพอบัติ 45015024

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพานิชย์

รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาทฤษฎี การคำนวณ การออกแบบ การสร้าง และการทดสอบสายอากาศชนิดวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ โดยในโครงการนี้จะวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น อันได้แก่ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่น และค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ สำหรับการวิเคราะห์ จะเริ่มจากทฤษฎีท่อนำคลื่นแบบวงรีก่อนจากนั้นก็พิจารณาการป้อนสัญญาณโดยใช้โพรบ และออกแบบโครงสร้างสายอากาศแนวลำดับที่มีการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง สุดท้ายจะวิเคราะห์สายอากาศที่มีโครงสร้างวางบนตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 45, 90 และ 180 องศา ตามลำดับ ซึ่งให้การแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว และจะทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีเพื่อหาเงื่อนไขของสายอากาศที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานต่อไป

ABSTRACT

This project presents the study of calculation, design, fabrication and measurement of an elliptical ring antenna excited by a probe. The radiation characteristics such as radiation pattern, beamwidth and directivity are analyzed. In the analysis, the procedure starts with the study of an elliptical waveguide, and then considers the feeding structure by probe. The array arrangement to radiate bidirectional pattern is investigated. Finally, the antenna configurations can be accomplished the unidirectional pattern by placing near the reflector of the angle of 45, 90 and 180 degrees are analyzed. The results from the investigations of this antenna are compared with the theoretical results to determine the optimum condition for further applications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา วัตถุประสงค์และขอบเขตของปริญญานิพนธ์	1
1.2 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ พื้นฐานของสายอากาศ	4
2.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ	4
2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	4
2.1.2 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง	4
2.1.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครึ่งแรก	4
2.1.4 อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง	4
2.1.5 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	5
2.1.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	5
2.1.7 อัตรายบาย	5
2.1.8 ช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งาน	5
2.2 โครงสร้างของสายอากาศ	6
2.2.1 โครงสร้างสายอากาศวงแหวนวงรี	6
2.2.2 โครงสร้างสายอากาศแบบแฉวลำดับ	7
2.2.3 โครงสร้างสายอากาศแบบวางบนตัวสะท้อนคลื่น	9
2.3 ระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี	9
2.4 สมการคลื่นในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี	11
2.5 สมการที่แพร่กระจายจากสายอากาศ	24
2.5.1 อินทิกรัลการแพร่กระจายคลื่นและฟังก์ชันช่วย	24
2.5.2 ศักย์เวกเตอร์ A อันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าต้นกำเนิด J	24
2.5.3 ศักย์เวกเตอร์ F อันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าต้นกำเนิด M	26
2.5.4 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสต้นกำเนิด J และ M	27
2.5.5 การคำนวณหาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงรี	28
2.5.6 ตัวประกอบแฉวลำดับ	33
2.5.6.1 กรณีวางองค์ประกอบตามแกน x ทั้งหมด N องค์ประกอบ	36
2.5.6.2 กรณีวางองค์ประกอบตามแกน y ทั้งหมด N องค์ประกอบ	37
2.5.6.3 กรณีวางองค์ประกอบกันบนแกน z ทั้งหมด N องค์ประกอบ	38
2.5.7 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม	39
2.5.7.1 กรณีตัวสะท้อนคลื่นทำมุม 45 องศา	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.7.2 กรณีตัวสะท้อนคลื่นทำมุม 90 องศา	41
2.5.7.3 กรณีตัวสะท้อนคลื่นทำมุม 180 องศา	42
2.6 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2	43
2.6.1 การอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าในอวกาศว่าง	44
2.6.2 วิธีแก้ปัญหาเชิงเลขในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเส้นเชิงเลขรุ่นที่ 2	45
บทที่ 3 การวิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบ	47
3.1 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ	47
3.1.1 โครงสร้างของสายอากาศ	47
3.1.2 การพิจารณาความสัมพันธ์แกนหลัก แกนรอง และ ความยาววงแหวนวงรี	48
3.1.3 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	48
3.1.4 การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	49
3.1.5 การพิจารณาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง	50
3.1.6 การพิจารณาค่าความยาวโพรบ	51
3.2 การวิเคราะห์เมื่อนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับ	51
3.2.1 การจัดเรียงตามแนวแกน x	52
3.2.1.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	52
3.2.1.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	52
3.2.1.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง	53
3.2.1.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก	54
3.2.1.5 การวิเคราะห์ลำลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง	55
3.2.2 การจัดเรียงตามแนวแกน y	56
3.2.2.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	56
3.2.2.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	56
3.2.2.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง	57
3.2.2.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก	58
3.2.2.5 การวิเคราะห์ลำลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง	59
3.2.3 การจัดเรียงตามแนวแกน z	60
3.2.3.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	60
3.2.3.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	61
3.2.3.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง	61
3.2.3.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก	62
3.2.3.5 การวิเคราะห์ลำลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 การวิเคราะห์เมื่อนำสายอากาศที่มีโครงสร้างวางบนตัวสะท้อนคลื่น	64
3.3.1 สายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 45 องศา	64
3.3.1.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	64
3.3.1.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	65
3.3.1.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง	65
3.3.1.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก	66
3.3.1.5 การวิเคราะห์ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง	67
3.3.2 สายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 90 องศา	68
3.3.2.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	68
3.3.2.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	69
3.3.2.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง	69
3.3.2.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก	70
3.3.2.5 การวิเคราะห์ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง	71
3.3.3 สายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 180 องศา	72
3.3.3.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	72
3.3.3.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	72
3.3.3.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง	73
3.3.3.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก	74
3.3.3.5 การวิเคราะห์ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง	75
บทที่ 4 การสร้าง ทดสอบ และผลการทดลอง	76
4.1 การสร้างสายอากาศ	76
4.2 การทดสอบและผลการทดสอบ	80
4.2.1 การทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	80
4.2.2 การทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	82
4.2.2.1 สายอากาศวงแหวนวงรีหนึ่งองค์ประกอบ	83
4.2.2.2 สายอากาศวงแหวนวงรีที่วางแบบแถวลำดับเมื่อวางตามแนวแกน x	84
4.2.2.3 สายอากาศวงแหวนวงรีที่วางแบบแถวลำดับเมื่อวางตามแนวแกน y	85
4.2.2.4 สายอากาศวงแหวนวงรีที่วางแบบแถวลำดับเมื่อวางตามแนวแกน z	86
4.2.2.5 สายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 45 องศา	87
4.2.2.6 สายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 90 องศา	88
4.2.2.7 สายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 180 องศา	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงรี	6
รูปที่ 2.2 การจัดวางสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นแบบตามแนวด้านข้าง (Side By Side)	7
รูปที่ 2.3 การจัดวางสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นแบบตามแนวยาว (Collinear)	8
รูปที่ 2.4 การจัดวางสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นแบบหันหน้าเข้าหากัน (Face to Face)	8
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสายอากาศตัวสะท้อนแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงรี	9
รูปที่ 2.6 แสดงระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี	10
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\lambda_c}{a}$ กับ e	22
รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q กับ e	23
รูปที่ 2.9 ผังของการคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายจากต้นกำเนิดไฟฟ้าและแม่เหล็ก	24
รูปที่ 2.10 การกระจายสนามแบบยูนิฟอร์มบนช่องเปิดแบบวงรีในอากาศ	32
รูปที่ 2.11 สายอากาศไดโพล 2 องค์ประกอบที่วางบนแกน z	33
รูปที่ 2.12 สายอากาศไดโพล N องค์ประกอบที่วางบนแกน z	34
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของตัวสะท้อนแบบมุม	39
รูปที่ 2.14 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 45 องศา	40
รูปที่ 2.15 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90 องศา	41
รูปที่ 2.16 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 180 องศา	42
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงรี	47
รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	49
รูปที่ 3.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรี	50
รูปที่ 3.4 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศวงแหวนวงรี ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	50
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	52
รูปที่ 3.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรีเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน x	53
รูปที่ 3.7 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	54
รูปที่ 3.8 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	55
รูปที่ 3.9 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	56
รูปที่ 3.11 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรี เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน y	57
รูปที่ 3.12 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	58
รูปที่ 3.13 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	59
รูปที่ 3.14 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	59
รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	60
รูปที่ 3.16 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรี เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน z	61
รูปที่ 3.17 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	62
รูปที่ 3.18 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	63
รูปที่ 3.19 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	63
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	64
รูปที่ 3.21 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรี วางบนแผ่นสะท้อนทำมุม 45 องศา	65
รูปที่ 3.22 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	66
รูปที่ 3.23 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	67
รูปที่ 3.24 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	67
รูปที่ 3.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.26 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรี วางบนแผ่นสะท้อนทำมุม 90 องศา	69
รูปที่ 3.27 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	70
รูปที่ 3.28 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	71
รูปที่ 3.29 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	71
รูปที่ 3.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	72
รูปที่ 3.31 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรี วางบนแผ่นสะท้อนทำมุม 180 องศา	73
รูปที่ 3.32 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	74
รูปที่ 3.33 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	74
รูปที่ 3.34 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	75
รูปที่ 4.1 สายอากาศชนิดวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ	76
รูปที่ 4.2 สายอากาศที่นำมาเรียงแบบแถวลำดับ 2 องค์ประกอบ	77
รูปที่ 4.3 สายอากาศที่มีโครงสร้างวางบนตัวสะท้อนคลื่น	78
รูปที่ 4.4 การต่อสายอากาศที่จะทำการวัดค่าพารามิเตอร์เข้ากับ Network Analyzer	79
รูปที่ 4.5 การจัดวางสายอากาศวงแหวนวงรีภายในห้องทดสอบ โดยที่สายอากาศทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณ	79
รูปที่ 4.6 การวางสายอากาศสายอากาศวงแหวนวงรี ภายในห้องทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	80
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนวงรี	81
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศวงแหวนวงรี	81
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศวงแหวนวงรี	81
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบสายอากาศวงแหวนวงรีที่มีความยาวของวงแหวน เท่ากับ 0.15λ เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางตามแนวแกน x จำนวน 2 องค์ประกอบ เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	84
รูปที่ 4.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางตามแนวแกน y จำนวน 2 องค์ประกอบ เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	85
รูปที่ 4.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางตามแนวแกน z จำนวน 2 องค์ประกอบ เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	86
รูปที่ 4.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบเดียว เมื่อวางบนตัวสะท้อนคลื่นมุม 45 องศา เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	87
รูปที่ 4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบเดียว เมื่อวางบนตัวสะท้อนคลื่นมุม 90 องศา เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	88
รูปที่ 4.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบเดียว เมื่อวางบนตัวสะท้อนคลื่นมุม 180 องศา เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การหาสมการสนามที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศ เมื่อได้สมการของสนามก็จะนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งอันได้แก่ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ค่าความกว้างลำคลื่น (Half Power Beamwidth) และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ซึ่งค่าเหล่านี้ใช้ในการพิจารณาการออกแบบสร้างสายอากาศแบบวงแหวนวงรี จากนั้นทำการพิจารณาในกรณีแฉก ลำดับเชิงเส้น ลักษณะต่าง ๆ คือ ตามแนวด้านข้าง (Side by Side) ตามแนวยาว (Collinear) และหันหน้าเข้าหากัน (Face to Face) เพื่อให้สายอากาศมีขนาดใหญ่มากขึ้นตามลำดับ จากนั้นพิจารณาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ เพื่อหาระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการจัดเรียงเป็นแฉก ลำดับเชิงเส้น ทั้งนี้เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ใช้งานตามความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่ และอีกวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ โดยการนำสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบมาวางเหนือตัวสะท้อนเพื่อให้มีการแพร่กระจายคลื่นไปด้านหน้าทิศทางเดียว ซึ่งตัวสะท้อนมุม 45, 90 และ 180 องศา โดยพิจารณาเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม ซึ่งนำค่าพารามิเตอร์มาใช้ในการพิจารณาการออกแบบสร้างสายอากาศแบบวงแหวนวงรีวางใกล้ตัวสะท้อนหรือแผ่นตัวนำ โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์การคำนวณ ได้ทำการออกแบบ และสร้างสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบป้อนสัญญาณขึ้นที่ความถี่ 1.9 GHz เพื่อทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลจากการทดสอบและผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ สำหรับการประยุกต์ใช้งานของสายอากาศแบบสองทิศทางนั้นเหมาะสำหรับระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ที่ให้บริการพื้นที่ที่มีลักษณะแคบและตามแนวยาว เช่น บนทางด่วน อุโมงรถไฟฟ้าใต้ดิน สำหรับสายอากาศแบบทิศทางเดียวกันเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับระบบจุดต่อจุด เช่น ใช้ติดต่อกันระหว่างตึกในหน่วยงาน

1.2 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์

บทที่ 1 จะกล่าวถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ ขอบเขตของปริญญานิพนธ์นี้ ซึ่งเป็นเนื้อหาโดยรวมที่ได้รวบรวมไว้ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีและหลักการของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบไฟฟ้า ซึ่งได้อธิบายถึงโครงสร้างของสายอากาศ ตลอดจนวิธีการหาสมการแพร่กระจายคลื่น โดยใช้วิธีศีกษ์เวกเตอร์ ในกรณีแฉก ลำดับเชิงเส้น และหลักการหลักการของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ และโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเส้นรุ่นที่ 2

บทที่ 3 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ สายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ ซึ่งเป็นสายอากาศแบบสองทิศทาง เป็นการแสดงขบวนการวิเคราะห์เพื่อที่จะสามารถนำไปออกแบบสายอากาศที่ต้องการ โดยแสดงผลที่ได้เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศองค์ประกอบเดียวกัน จากนั้นเป็นการแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในกรณีจัดสายอากาศแฉก ลำดับเชิงเส้น และนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาจัดเรียงสายอากาศเชิงเส้น และการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วย แสดงกระบวนการวิเคราะห์สายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ โดยนำผลที่ได้จากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์มาพิจารณาหาขนาดและระยะห่างของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม และโดยการพิจารณาของการวิเคราะห์สายอากาศอักษทฤษฎีที่ได้จากบทที่ 2

บทที่ 4 เป็นขั้นตอนการสร้าง การทดสอบ และแสดงผลที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลทั้งหมด ตลอดจนวิจารณ์ และเสนอแนะแนวทางสำหรับการพัฒนาสายอากาศต่อไป

สุดท้ายเป็นภาคผนวกที่รวบรวมข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องในปฏิญานีพนธ์นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับสายอากาศ ซึ่งใช้พิจารณาสายอากาศรวมถึงสมการทางคณิตศาสตร์ ที่เกี่ยวกับการพิจารณาคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ เช่น พารามิเตอร์ (Parameter) พื้นฐานของสายอากาศ โครงสร้างสายอากาศ ระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี (Elliptic Cylindrical Coordinates) การใช้ศักย์เวกเตอร์ในการหาสมการสนาม (\vec{E}, \vec{H}) ที่แผ่กระจายของสายอากาศ ตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) สายอากาศตัวสะท้อนแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบไฟฟ้า และโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 เป็นต้น

2.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ (Essential Antenna Parameters)

เมื่อกล่าวถึงสายอากาศ สิ่งที่ต้องพิจารณาก็คือ คุณสมบัติหรือพารามิเตอร์ (Parameter) ของสายอากาศ ซึ่งจะเป็นตัวบอกให้ทราบคุณสมบัติและคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งที่จะพิจารณาประกอบด้วย

2.1.1 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น คือ รูปกราฟหรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงความเข้มของสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของทิศทางหรือมุม โดยรูปกราฟนี้แบ่งเป็น กราฟเชิงเส้นมุมฉาก (Linear Plot) และกราฟวงกลม (Polar Plot) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แอมพลิจูด (Amplitude) ของกำลังงาน (Power) หรือ สนาม (Field) กับทิศทาง (Direction) ของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของมุมในหน่วยองศา (Degree) หรือเรเดียน (Radian)

2.1.2 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กึ่งกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam width: HPBW)

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด โดยจะวัดในหน่วยองศา (Degree)

2.1.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กึ่งกำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam width: FNBW)

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าลดลงเป็นศูนย์ โดยจะวัดในหน่วยองศา

2.1.4 อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio: SLR)

คือ อัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

$$SLR = \text{Main lobe level (dB)} - \text{Side lobe level (dB)} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คือกำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน (ตลอดพื้นผิวทรงกลม) แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มการแผ่กระจายคลื่นกับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล ได้ดังนี้

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2 \cdot \eta} \cdot \left[|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ E_θ, E_ϕ คือ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าในระยะไกล

η คือ อินทริเนติกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง มีค่าประมาณ $120\pi \Omega$

2.1.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางต่างๆ เทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_0 (dBi) = 10 \cdot \log \left(\frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ U_{\max} คือ ค่าสูงสุดของความเข้มการแผ่กระจายคลื่น

P_{rad} คือ กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (2.4)$$

2.1.7 อัตราขยาย (Gain)

คือความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทาง โดยคุณประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วยประสิทธิภาพของสายอากาศ จะประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ ประสิทธิภาพของตัวนำและประสิทธิภาพของฉนวน

$$Gain = \text{Efficiency of antenna} \times \text{Directivity} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.5)$$

$$Gain(dBi) = \text{Efficiency}(dB) + \text{Directivity}(dBi) \quad (2.6)$$

2.1.8 ช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth : Δf)

คือ ช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด หรือช่วงความถี่ที่สายอากาศยังคงมีคุณสมบัติต่างๆ อยู่ในช่วงที่ใช้งานได้เหมือนกับที่ออกแบบไว้ที่ความถี่กลาง

$$\Delta f (Hz) = f_H (Hz) - f_L (Hz) \quad (2.7)$$

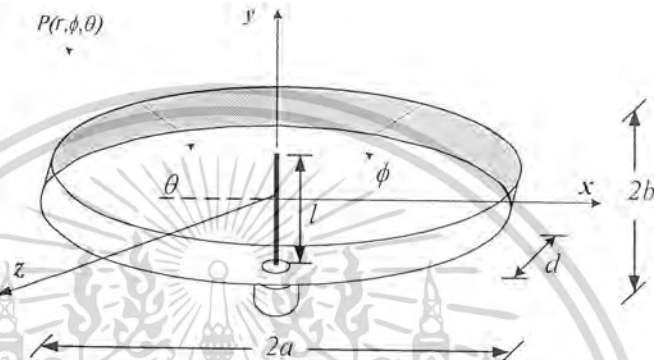
$$\Delta f (\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100\% \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างสายอากาศ

2.2.1 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงรี

โครงสร้างสายอากาศวงแหวนแบบวงรีกระตุ้นโดยโพรบประกอบด้วยโพรบความยาว l วางในทิศทางแกน y ล้อมรอบด้วยวงแหวนวงรีที่มีความยาวครึ่งแกนหลักเป็น a และมีความยาวครึ่งแกนรองเป็น b โดยปากวงแหวนวงรีวางอยู่บนระนาบ $z = -\frac{d}{2}$ และ $z = \frac{d}{2}$ ตามลำดับ เมื่อ d คือความยาวของวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ

ท่อนำคลื่นที่มีหน้าตัดเป็นวงรีการพิจารณาจะใช้พิกัดทรงกระบอกวงรี (u, v, z) มาพิจารณาแกนหลัก (Major axis : a) และแกนรอง (Minor axis : b) โดยจะมีพื้นที่หน้าตัดอยู่บนระนาบ $z = 0$

คุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่นแบบวงแหวนวงรี ท่อนำคลื่นแบบวงแหวนวงรีเป็นท่อนำสัญญาณในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยคุณสมบัติทั่วไปของท่อนำคลื่นแบบวงแหวนวงรีนั้น จะประพฤติตัวเหมือนกรองความถี่สูง (High Pass Filter) โดยที่ท่อนำคลื่นแบบวงแหวนวงรีจะยอมให้ความถี่สูงกว่าความถี่ตัดผ่าน (Cut off Frequency : f_c) ผ่านได้เท่านั้น โดยที่ $(f_{TE_{11}} < f < f_{TE_{21}})$ ซึ่งความถี่ตัดผ่านนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของท่อนำคลื่นซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากตาราง NCW's (Tables of Normalized Cutoff Wave numbers of Elliptic Cross Section Resonators) จากสมการ

$$f_{e(m,n)} = \frac{h_{e(m,n)} C}{2\pi c \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (2.9)$$

$$f_{o(m,n)} = \frac{h_{o(m,n)} C}{2\pi c \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (2.10)$$

$$h_{e(m,n)} = \gamma_{e(m,n)} k_{(m,n)} \frac{e}{(1-e)} \quad (2.11)$$

$$h_{o(m,n)} = \gamma_{o(m,n)} k_{(m,n)} \frac{e}{(1-e)} \quad (2.12)$$

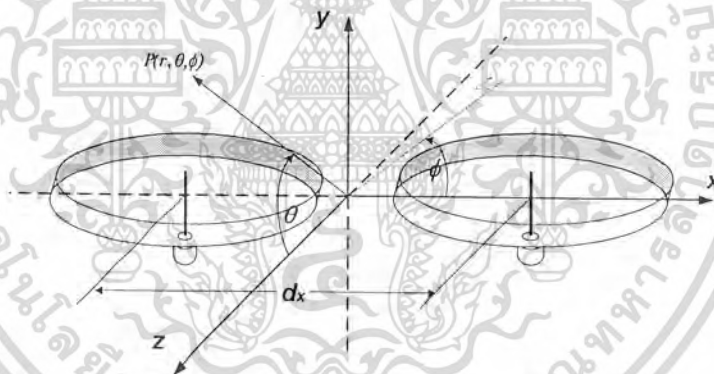
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$f_{e(m,n)}$	คือ ความถี่คัทออฟของโหมดหลัก (มีหน่วยเป็น Hz)
	$f_{o(m,n)}$	คือ ความถี่คัทออฟของโหมดรอง (มีหน่วยเป็น Hz)
	C	คือ ความเร็วของการเดินทางของคลื่นในอากาศ (มีหน่วยเป็น cm)
	c	คือ ความยาวของโฟกัส (Focal length) (มีหน่วยเป็น cm)
	μ_r	คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) สัมพัทธ์ของวัสดุ
	ϵ_r	คือ ค่าความซึมซาบ (Permeability) สัมพัทธ์ของวัสดุ
	e	คือ ความรีของวงรี (Eccentricity)

2.2.2 โครงสร้างของสายอากาศแบบแถวลำดับ

การเพิ่มขนาดของสายอากาศให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น โดยการนำสายอากาศวงแหวนวงรีที่ทำการพิจารณาทำการจัดเรียงแบบแถวลำดับ จากโครงสร้างที่แสดงเราพิจารณากรณีการจัดเรียงแบบเชิงเส้น ทั้ง 3 แนวคือ แนวแกน x แกน y และแกน z

1). การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นในแนวแกน x (แบบ Side By Side)

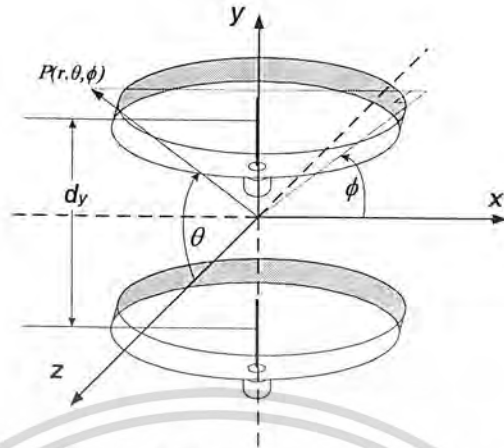


รูปที่ 2.2 การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นแบบตามแนวด้านข้าง (Side By Side)

จากรูปเป็นการจัดเรียงสายอากาศจำนวน 2 องค์ประกอบเป็นการเพิ่มขนาดในแกน x โดยค่า dx คือระยะห่างระหว่างองค์ประกอบทั้ง 2 ตัว เมื่อโพรบชี้ในทิศแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

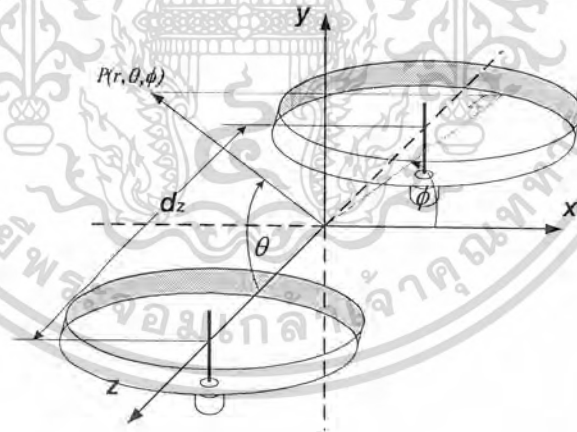
2.) การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นในแนวแกน y (แบบ Collinear)



รูปที่ 2.3 การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นแบบ ตามแนวยาว (Collinear)

จากรูปเป็นการจัดเรียงสายอากาศจำนวน 2 องค์ประกอบเป็นการเพิ่มขนาดในแกน y โดยค่า dy ก็คือระยะห่างระหว่างองค์ประกอบทั้ง 2 ตัว เมื่อโพรบชี้ในทิศแกน y เช่นเดียวกัน

3.) การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นในแนวแกน z (แบบ Face to Face)



รูปที่ 2.4 การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นแบบหันหน้าเข้าหากัน (Face to Face)

จากรูปเป็นการจัดเรียงสายอากาศจำนวน 2 องค์ประกอบเป็นการเพิ่มขนาดในแกน z นั่นคือสนามเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งคู่ โดยค่า dz คือระยะห่างระหว่างองค์ประกอบทั้ง 2 ตัว เมื่อโพรบชี้ในทิศแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 โครงสร้างสายอากาศแบบวางบนตัวสะท้อนคลื่น

โครงสร้างของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ ซึ่งในโครงงานนี้ผู้วิจัยต้องการนำเสนอสายอากาศแบบทิศทางเดียวที่มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูง สามารถทำได้โดยนำสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ โดยนำสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมเกิดจากแผ่นสะท้อนสองแผ่นมีความยาว l_c ความสูง h ทำมุมกัน α ที่มีความกว้างที่ยาวที่สุดของตัวสะท้อนเท่ากับ D_n ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวสะท้อนกับวงแหวนวงรีเท่ากับ s ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งในโครงงานนี้ในการกำหนดหาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม และตัวป้อนสัญญาณแบบวงแหวนจะพิจารณาให้ตัวสะท้อนมีขนาด l_c , h และ D_n เป็นอนันต์ และทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับวงแหวนเป็นค่าต่างๆ เพื่อหาระยะที่เหมาะสม ซึ่งสายอากาศจะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม และนอกจากนี้ยังได้ทำการพิจารณาในกรณีที่ตัวสะท้อนทำมุมขนาดต่าง ๆ กัน ในปริยายานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงมุมสะท้อนที่แผ่นสะท้อนทำมุมกับวงแหวนสามมุมคือ 45, 90 และ 180 องศา

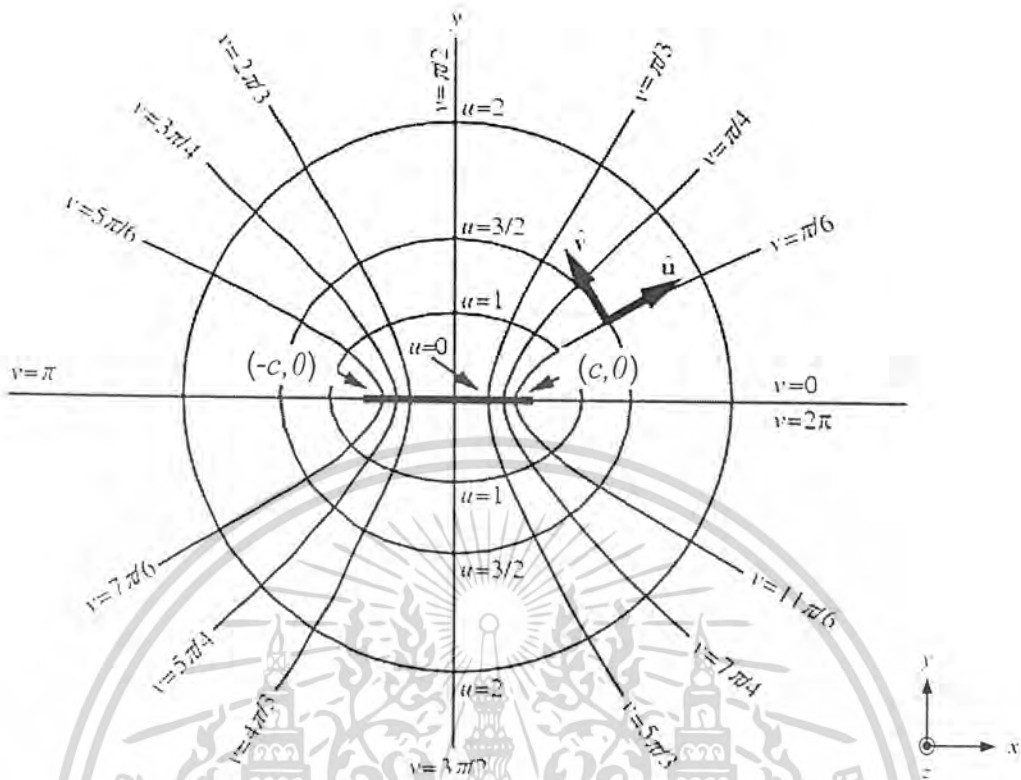


รูปที่ 2.5 โครงสร้างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยสายอากาศแบบวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ

2.3 ระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี (Elliptic Cylindrical Coordinates)

ในการวิเคราะห์สมการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงรีนี้ ระบบพิกัดที่ใช้ในการวิเคราะห์จะต้องใช้ระบบพิกัดทรงกระบอกวงรีในการวิเคราะห์ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึงระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี และรวมถึงการแปลงพิกัดจากพิกัดทรงกระบอกวงรี (Elliptic Cylindrical Coordinates) มาเป็นพิกัดฉาก (Cartesian Coordinates) ด้วย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี (Elliptic Cylindrical Coordinates)

ระบบพิกัดทรงกระบอกวงรีประกอบด้วยองค์ประกอบตัวแปร (u, v, z) โดยที่ u เป็นค่าความยาว เหมือนเป็นรัศมีของวงรี ซึ่งเป็นเซตของวงรีที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันที่จุดกำเนิด องค์ประกอบที่ตั้งฉากกับ u คือ v โดย v เป็นค่ามุม เป็นเซตของไฮเพอร์โบล่าที่มีจุดโฟกัสร่วมกัน ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี และระบบพิกัดฉาก $F(u, v, z) \rightarrow F(x, y, z)$

$$x = c \cosh u \cos v \quad (2.13)$$

$$y = c \sinh u \sin v \quad (2.14)$$

$$z = z \quad (2.15)$$

เมื่อ $u \in [0, \infty), v \in [0, 2\pi)$ และ $z \in (-\infty, \infty)$

u หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$u = \cosh^{-1}\left(\frac{a}{c}\right) \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ c คือ ความยาวครึ่งโฟกัสของวงรี ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความยาวครึ่งแกนหลัก (a) และความยาวครึ่งแกนรอง (b) คือ

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

ในการคำนวณพิกัดทรงกระบอกวงรีเพื่อความสะดวกจะกำหนดพารามิเตอร์ความรี (Eccentricity: e) เพื่อแสดงคุณสมบัติของวงรี โดย e มีสมการคือ

$$e = \frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{1}{AR^2}} \quad (2.17)$$

เมื่อ AR คือ อัตราส่วนแกน (Axial Ratio) ได้จากอัตราส่วนของความยาวแกนหลักต่อความยาวแกนรอง ดังนั้นสมการที่ (2.16) จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$u = \cosh^{-1}\left(\frac{1}{e}\right) \quad (2.18)$$

สร้างความสัมพันธ์กับระบบพิกัดฉากได้ดังนี้

$$\frac{x^2}{a^2 \cosh^2 u} + \frac{y^2}{a^2 \sinh^2 u} = 1 \quad (2.19)$$

$$\frac{x^2}{a^2 \cos^2 v} - \frac{y^2}{a^2 \sin^2 v} = 1 \quad (2.20)$$

สเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) ของพิกัดทรงกระบอกวงรี

$$h_u = c \sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v} \quad (2.21)$$

$$h_v = c \sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v} \quad (2.22)$$

$$h_z = 1 \quad (2.23)$$

สามารถสร้างความสัมพันธ์ของการหาอนุพันธ์ได้

$$dx = h_u du = c \sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v} du \quad (2.24)$$

$$dy = h_v dv = c \sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v} dv \quad (2.25)$$

$$dz = h_z dz = dz \quad (2.26)$$

2.4 สมการคลื่นในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี

การศึกษาสมการคลื่นในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี จะทำให้เข้าใจถึงคุณลักษณะของคลื่นที่เดินทางอยู่ในวงแหวนวงรีของสายอากาศ

จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell)

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{J} \quad (2.27)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.28)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad (2.29)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ \bar{E} คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

\bar{H} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

\bar{D} คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้า

\bar{B} คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

โดยสนามจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นฮาร์มอนิก ซึ่งแสดงได้ด้วยฟังก์ชัน $e^{i\omega t}$ และเนื่องจากคลื่นเดินทางในทิศทาง z สนามจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะ z เป็นฟังก์ชัน $e^{\gamma z}$

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (2.31)$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (2.32)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (2.33)$$

เมื่อ ϵ σ และ μ เป็นค่าสเกลพอยมไฟฟ้า ความนำไฟฟ้า และความซึมซาบแม่เหล็กของตัวกลางตามลำดับจาก สมการที่ (2.27) สามารถหาความสัมพันธ์ในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรีได้จากสมการ

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{1}{h_u h_v h_z} \begin{vmatrix} h_u \hat{a}_u & h_v \hat{a}_v & h_z \hat{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial u} & \frac{\partial}{\partial v} & \frac{\partial}{\partial z} \\ h_u H_u & h_v H_v & h_z H_z \end{vmatrix} \quad (2.34)$$

ค่าแฟกเตอร์ประกอบ (Scale Factor) ในพิกัดทรงกระบอกวงรี จากสมการที่ (2.20) ถึงสมการที่ (2.22) จัดรูปด้านซ้ายมือของสมการที่ (2.34) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \nabla \times \bar{H} = & \frac{1}{h_u h_z} \left[\frac{\partial}{\partial v} (h_z H_z) - \frac{\partial}{\partial z} (h_v H_v) \right] \hat{a}_u + \frac{1}{h_v h_z} \left[\frac{\partial}{\partial z} (h_u H_u) - \frac{\partial}{\partial u} (h_z H_z) \right] \hat{a}_v \\ & + \frac{1}{h_u h_v} \left[\frac{\partial}{\partial u} (h_v H_v) - \frac{\partial}{\partial v} (h_u H_u) \right] \hat{a}_z \end{aligned} \quad (2.35)$$

จัดรูปด้านขวามือของสมการที่ (2.27)

$$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{J} = \epsilon \frac{\partial}{\partial t} (E_u \hat{a}_u + E_v \hat{a}_v + E_z \hat{a}_z) + \sigma (E_u \hat{a}_u + E_v \hat{a}_v + E_z \hat{a}_z) \quad (2.36)$$

จากสมการที่ (2.27) สมการที่ (2.35) และสมการที่ (2.36)

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \right) \left(\frac{\partial H_z}{\partial v} - \frac{\partial}{\partial z} \left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v} \right) H_v \right) - \left(\sigma E_u + \epsilon \frac{\partial E_u}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.37)$$

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \right) \left(\frac{\partial}{\partial z} \left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v} \right) H_u - \frac{\partial H_z}{\partial u} \right) - \left(\sigma E_v + \epsilon \frac{\partial E_v}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\left(\frac{\partial}{\partial u}\left(\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)H_v\right) - \frac{\partial}{\partial v}\left(\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)H_u\right)\right) - \left(\sigma E_z + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t}\right) = 0 \quad (2.39)$$

จากสมการที่ (2.28) ในทำนองเดียวกันจะได้

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\left(\frac{\partial E_z}{\partial v} - \frac{\partial}{\partial z}\left(\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)E_v\right)\right) + \mu \frac{\partial H_u}{\partial t} = 0 \quad (2.40)$$

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\left(\frac{\partial}{\partial z}\left(\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)E_u\right) - \frac{\partial E_z}{\partial u}\right) + \mu \frac{\partial H_v}{\partial t} = 0 \quad (2.41)$$

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\left(\frac{\partial}{\partial v}\left(\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)E_v\right) - \frac{\partial}{\partial u}\left(\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)E_u\right)\right) + \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = 0 \quad (2.42)$$

ในการคำนวณสำหรับตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย $\sigma = 0$ ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยค่าคงที่ของการลดทอนและค่าคงที่ของเฟส $\gamma = \alpha + j\beta$ ในกรณีทีคลื่นไม่มี การลดทอนเมื่อเดินทาง $\alpha = 0$ เนื่องจาก $\frac{\partial}{\partial t} \equiv j\omega$ และ $\frac{\partial}{\partial z} \equiv -\gamma \equiv -j\beta$ ดังนั้นสมการที่ (2.40) ถึงสมการที่ (2.42) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\left(\frac{\partial H_z}{\partial v} + (j\beta)\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)H_v\right) - (j\omega\varepsilon)E_u = 0 \quad (2.43)$$

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\left((-j\beta)\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)H_u - \frac{\partial H_z}{\partial u}\right) - (j\omega\varepsilon)E_v = 0 \quad (2.44)$$

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\left(\frac{\partial}{\partial u}\left(\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)H_v\right) - \frac{\partial}{\partial v}\left(\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)H_u\right)\right) - (j\omega\varepsilon)E_z = 0 \quad (2.45)$$

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\left(\frac{\partial E_z}{\partial v} + (j\beta)\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)E_v\right) + j\omega\mu H_u = 0 \quad (2.46)$$

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\left(\frac{\partial}{\partial z}\left(\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)E_u\right) - \frac{\partial E_z}{\partial u}\right) + j\omega\mu H_v = 0 \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \right) \left(\frac{\partial}{\partial u} \left((c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) E_v \right) - \frac{\partial}{\partial v} \left((c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) E_u \right) \right) + j\omega\mu H_z = 0 \quad (2.48)$$

จากสมการที่ (2.44)

$$\frac{\partial}{\partial u} \left((c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) H_v \right) - \frac{\partial}{\partial v} \left((c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) H_u \right) - (c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) (j\omega\epsilon) E_z = 0 \quad (2.49)$$

จากสมการที่ (2.48)

$$\frac{\partial}{\partial u} \left((c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) E_v \right) - \frac{\partial}{\partial v} \left((c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) E_u \right) = (-j\omega\mu) (c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) H_z \quad (2.50)$$

จากสมการที่ (2.49)

$$H_v = \frac{(-j\beta) E_u - \left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \right) \frac{\partial E_z}{\partial u}}{(-j\omega\mu)} \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial H_v}{\partial z} = \left(\frac{-\beta^2}{j\omega\mu} \right) E_u - \left(\frac{\beta}{(-\omega\mu) c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \right) \frac{\partial E_z}{\partial u}$$

แทนสมการที่ (2.51) ลงในสมการที่ (2.43)

$$\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \right) \frac{\partial H_z}{\partial v} - \left(\frac{\beta^2}{j\omega\mu} \right) E_u - \left(\frac{1}{\omega\mu} \right) \left(\frac{\beta}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \right) \frac{\partial E_z}{\partial u} = (j\omega\epsilon) E_u \quad (2.52)$$

คูณสมการที่ (2.50) ด้วย $(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})(-j\omega\mu)$

$$(-j\omega\mu) \frac{\partial H_z}{\partial v} - (j\beta) \frac{\partial E_z}{\partial v} = (c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) (\omega^2 \epsilon \mu) E_u + (c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) (-\beta^2) E_u$$

$$(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) (\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2) E_u = (-j\omega\mu) \frac{\partial}{\partial v} H_z - (j\beta) \frac{\partial E_z}{\partial v} \quad (2.53)$$

จากสมการที่ (2.43)

$$H_u = \left(\frac{1}{(-j\omega\mu) (c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})} \right) \left(\frac{\partial E_z}{\partial v} - \frac{\partial}{\partial z} \left((c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) E_v \right) \right) \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial H_u}{\partial z} = \left(\frac{1}{(-j\omega\mu) (c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})} \right) \left(\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial E_z}{\partial v} \right) - \frac{1}{(-j\omega\mu)} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left((c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) E_v \right) \right) \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial H_u}{\partial z} = \left(\frac{1}{(-j\omega\mu)(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})} \right) \left((-j\beta) \frac{\partial E_z}{\partial v} - \frac{(-\beta^2)}{(-j\omega\mu)} \left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v} \right) E_v \right) \quad (2.56)$$

จากสมการที่ (2.38)

$$\frac{\partial H_u}{\partial z} = \left(\frac{1}{(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})} \right) \frac{\partial H_z}{\partial u} + (j\omega\varepsilon) E_v \quad (2.57)$$

จากสมการ (2.51) และสมการที่ (2.52)

$$\left(\frac{1}{(-j\omega\mu)(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})} \right) \left((-j\beta) \frac{\partial E_z}{\partial v} - \frac{(-\beta^2)}{(-j\omega\mu)} E_v \right) - \left(\frac{1}{(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})} \right) \frac{\partial H_z}{\partial u} = (j\omega\varepsilon) E_v \quad (2.58)$$

คูณสมการที่ (2.58) ด้วย $(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})(-j\omega\mu)$

$$(-j\beta) \frac{\partial E_z}{\partial v} - \beta^2 (c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) E_v + (j\omega\mu) \frac{\partial H_z}{\partial u} = (c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})(\omega^2 \varepsilon \mu) E_v \quad (2.59)$$

$$(-j\beta) \frac{\partial E_z}{\partial v} + (j\omega\mu) \frac{\partial H_z}{\partial u} = (c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})(\omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2) E_v \quad (2.60)$$

จากสมการที่ (2.47)

$$(-j\beta) H_u - \left(\frac{1}{(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})} \right) \frac{\partial H_z}{\partial u} = (j\omega\varepsilon) E_v \quad (2.61)$$

จากสมการที่ (2.49)

$$(-j\omega\mu) H_u = \left(\frac{1}{(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})} \right) \frac{\partial E_z}{\partial v} + j\beta E_v \quad (2.62)$$

นำสมการที่ (2.61) คูณด้วย $(j\beta)(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})$

$$(\beta^2)(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}) H_u = (j\beta) \frac{\partial H_z}{\partial u} + (j\beta)(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})(j\omega\varepsilon) E_v \quad (2.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (2.62) คูณด้วย $(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})$ ($j\omega\varepsilon$)

$$(\omega^2\varepsilon\mu)(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})H_u = (j\omega\varepsilon)\frac{\partial E_z}{\partial v} + (j\beta)(j\omega\varepsilon)(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})E_v \quad (2.64)$$

นำสมการที่ (2.64) ลบด้วยสมการที่ (2.63)

$$(\omega^2\varepsilon\mu - \beta^2)(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})H_u = (j\omega\varepsilon)\frac{\partial E_z}{\partial v} - (j\beta)\frac{\partial H_z}{\partial u} \quad (2.65)$$

นำสมการที่ (2.43) คูณด้วย $j\beta$

$$(j\beta)\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\frac{\partial H_z}{\partial v} - (j\beta)(j\omega\varepsilon)E_u = \beta^2 H_v \quad (2.66)$$

นำสมการที่ (2.47) คูณด้วย $j\omega\varepsilon$

$$(j\omega\varepsilon)(-j\beta)E_u - (j\omega\varepsilon)\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\frac{\partial E_z}{\partial u} = (\omega^2\varepsilon\mu)H_v \quad (2.67)$$

นำสมการที่ (2.66) ลบด้วยสมการที่ (2.67)

$$(j\beta)\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\frac{\partial H_z}{\partial v} + (j\omega\varepsilon)\left(\frac{1}{c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}\right)\frac{\partial E_z}{\partial u} = (\beta^2 - \omega^2\varepsilon\mu)H_v \quad (2.68)$$

คูณสมการที่ (2.68) ด้วย $(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})$

$$-(\omega^2\varepsilon\mu - \beta^2)(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})H_v = (j\beta)\frac{\partial H_z}{\partial v} + (j\omega\varepsilon)\frac{\partial E_z}{\partial u} \quad (2.69)$$

สรุปว่าสามารถหาค่าประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรีได้จากสมการที่ (2.49), (2.50), (2.53), (2.60), (2.65) และสมการที่ (2.69)

$$(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})(j\omega\varepsilon)E_z = \frac{\partial}{\partial u}\left((c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})H_v\right) - \frac{\partial}{\partial v}\left((c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})H_u\right) \quad (2.70)$$

$$(-j\omega\mu)(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})H_z = \frac{\partial}{\partial u}\left((c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})E_v\right) - \frac{\partial}{\partial v}\left((c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})E_u\right) \quad (2.71)$$

$$(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})(\omega^2\varepsilon\mu - \beta^2)E_u = (-j\omega\mu)\frac{\partial H_z}{\partial v} - (j\beta)\frac{\partial E_z}{\partial v} \quad (2.72)$$

$$(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})(\omega^2\varepsilon\mu - \beta^2)E_v = -(j\beta)\frac{\partial E_z}{\partial v} + (j\omega\mu)\frac{\partial H_z}{\partial u} \quad (2.73)$$

$$(\omega^2\varepsilon\mu - \beta^2)(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})H_u = (j\omega\varepsilon)\frac{\partial E_z}{\partial v} - (j\beta)\frac{\partial H_z}{\partial u} \quad (2.74)$$

$$-(\omega^2\varepsilon\mu - \beta^2)(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})H_v = (j\beta)\frac{\partial H_z}{\partial v} + (j\omega\varepsilon)\frac{\partial E_z}{\partial u} \quad (2.75)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.49)

$$\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)(j\omega\varepsilon)E_z = \frac{\partial}{\partial u}\left(\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)H_v\right) - \frac{\partial}{\partial v}\left(\left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)H_u\right) \quad (2.76)$$

แทนสมการที่ (2.65) และสมการที่ (2.69) ลงในสมการที่ (2.49) แล้วคูณด้วย

$$\begin{aligned} & (\omega^2\varepsilon\mu - \beta^2) \left(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right) \\ & (\omega^2\varepsilon\mu - \beta^2)(c^2)(\sinh^2 u + \sin^2 v)E_z = \frac{\partial^2 E_z}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial v^2} \end{aligned} \quad (2.77)$$

จากสมการที่ (2.19) และสมการที่ (2.20) จัดรูปสมการใหม่

$$\sinh^2 u = \frac{1}{2}[\cosh(2u) - 1] \quad (1.78)$$

$$\sin^2 v = \frac{1}{2}[1 - \cos(2v)] \quad (2.79)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial v^2} = (\omega^2\varepsilon\mu - \beta^2)(c^2)[\cosh(2u) + \cos(2v)]E_z \quad (2.80)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial v^2} = (\omega^2\varepsilon\mu - \beta^2)(c^2)[\cosh(2u) + \cos(2v)]H_z \quad (2.81)$$

นอกจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในองค์ประกอบต่างๆ จะหาได้จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell) แล้วยังสามารถใช้สมการ Helmholtz ร่วมกับวิธีแยกตัวแปรหาค่าได้ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ จากสมการ Helmholtz

$$\nabla^2\psi + k^2\psi = 0 \quad (2.82)$$

สมการลาปลาเซียน (Laplacian) ในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรีมีสมการเป็น

$$\nabla^2 = \frac{1}{c^2(\sinh^2 u + \sin^2 v)}\left(\frac{\partial^2}{\partial u^2} + \frac{\partial^2}{\partial v^2}\right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.83)$$

ดังนั้นจะได้สมการดิฟเฟอเรนเชียล Helmholtz เป็น

$$\frac{1}{(\sinh^2 u + \sin^2 v)}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial u^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial v^2}\right) + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} + k^2\psi = 0 \quad (2.84)$$

เมื่อใช้หลักการแยกตัวแปรจะได้

$$\psi(u, v, z) = U(u)V(v)Z(z) \quad (2.85)$$

ดังนั้นสมการดิฟเฟอเรนเชียล Helmholtz จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{Z}{(\sinh^2 u + \sin^2 v)} \left(V \frac{d^2 U}{du^2} + U \frac{d^2 V}{dv^2} \right) + UV \frac{d^2 Z}{dz^2} + k^2 UVZ = 0 \quad (2.86)$$

หารด้วย UVZ จะได้

$$\frac{1}{(\sinh^2 u + \sin^2 v)} \left(\frac{1}{U} \frac{d^2 U}{du^2} + \frac{1}{V} \frac{d^2 V}{dv^2} \right) + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} + k^2 = 0 \quad (2.87)$$

แยกส่วนที่เป็น Z

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -(k^2 + h^2) \quad (2.88)$$

$$\frac{1}{(\sinh^2 u + \sin^2 v)} \left(\frac{1}{U} \frac{d^2 U}{du^2} + \frac{1}{V} \frac{d^2 V}{dv^2} \right) = h^2 \quad (2.89)$$

ดังนั้น

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} = -(k^2 + h^2)Z \quad (2.90)$$

ซึ่งมีผลเฉลยคือ

$$Z(z) = A_{km} \cos(\sqrt{k^2 + h^2} z) + B_{km} \sin(\sqrt{k^2 + h^2} z) \quad (2.91)$$

จากสมการที่ (2.74)

$$\left(\frac{1}{U} \frac{d^2 U}{du^2} - h^2 \sinh^2 u \right) + \left(\frac{1}{V} \frac{d^2 V}{dv^2} - h^2 \sin^2 v \right) = 0 \quad (2.92)$$

สามารถแยกตัวแปรได้เป็น

$$\left(\frac{1}{U} \frac{d^2 U}{du^2} - h^2 \sinh^2 u \right) = G \quad (2.93)$$

$$G + \left(\frac{1}{V} \frac{d^2 V}{dv^2} - h^2 \sin^2 v \right) = 0 \quad (2.94)$$

ดังนั้น

$$\frac{d^2 U}{du^2} - (G + h^2 \sinh^2 u)U = 0 \quad (2.95)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d^2V}{dv^2} + (G - h^2 \sin^2 v)V = 0 \quad (2.96)$$

จากสมการที่ (2.19) และสมการที่ (2.20) แทนในสมการที่ (2.95) และสมการที่ (2.96) เมื่อจัดกลุ่มใหม่ จะได้

$$\frac{d^2U}{du^2} - [(G - \frac{1}{2}h^2) + \frac{1}{2}h^2 \cosh(2u)]U = 0 \quad (2.97)$$

$$\frac{d^2V}{dv^2} + [(G - \frac{1}{2}h^2) + \frac{1}{2}h^2 \cos(2v)]V = 0 \quad (2.98)$$

กำหนดให้ $a' \equiv G - \frac{h^2}{2}$ และ $q \equiv -\frac{h^2}{4}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{d^2V}{dv^2} + [a' - 2q \cos(2v)]V = 0 \quad (2.99)$$

$$\frac{d^2U}{du^2} - [a' - 2q \cosh(2u)]U = 0 \quad (2.100)$$

สมการที่ (2.99) เรียกว่าสมการอนุพันธ์ของแมททิว(Mathieu Differential Equation) และสมการที่ (2.100) เรียกว่าสมการอนุพันธ์โมดิฟายด์ของแมททิว (Modified Mathieu Differential Equation) ซึ่งผลเฉลยของสมการจะเป็นฟังก์ชันของแมททิว (Mathieu Equation) แสดงได้ดังนี้

$$V = C_1 ce(q, v) + S_1 se(q, v) \quad (2.101)$$

$$U = C_2 Ce(q, v) + S_2 Se(q, v) \quad (2.102)$$

จากสมการที่ (2.19) และสมการที่ (2.20) สามารถเขียนสมการที่ (2.80) และสมการที่ (2.81) ให้อยู่ในรูปใหม่ได้ว่า

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial v^2} + (\omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2) c^2 [\cosh(2u) - \cos(2v)] \psi = 0 \quad (2.103)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.99) บวกด้วยสมการที่ (2.100) จะได้สมการ Helmholtz ในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรีเป็น

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial v^2} + 2q [\cosh(2u) - \cos(2v)] \psi = 0 \quad (2.104)$$

เมื่อ ψ คือ ผลเฉลยทั่วไปของสมการคลื่นในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี

Q คือ Separate Parameter

หากำ q ได้จากสมการที่ (2.88) และสมการที่ (2.89)

$$q = \frac{c^2}{4} (\omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2) = \frac{a^2 e^2}{4} (\omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2) \quad (2.105)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ $\omega\sqrt{\epsilon\mu}$ คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในช่องว่างอิสระ $= \frac{2\pi}{\lambda_0}$
 a คือ ความยาวครึ่งแกนหลัก และ e คือ Eccentricity ของท่อนำคลื่นวงรี
 β คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่น $= \frac{2\pi}{\lambda_g}$

ดังนั้น

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial v^2} + \frac{c^2 k_c^2}{2} [\cosh(2u) - \cos(2v)] \psi = 0 \quad (2.106)$$

- เมื่อ c คือ ความยาวครึ่งหนึ่งของโฟกัส ($c = ae$)
 k_c คือ ค่าเลขคลื่นตัด (Cutoff wave number) $k_c^2 = (\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2)$

ถ้าพิจารณาอันดับ (Order) ของโหมดสามารถเขียน (2.106) ที่แสดงรูปอันดับ (Order) ของโหมดเป็น

$$\frac{\partial^2 \psi_m}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \psi_m}{\partial v^2} + \frac{c^2 k_{cm}^2}{2} (\cosh 2u - \cos 2v) \psi_m = 0 \quad (2.107)$$

ผลเฉลยของสมการที่ (2.108) เป็นพจน์ฟังก์ชันที่เรียกว่า ฟังก์ชันของเมทิว (Mathieu Equation) โดยแสดงได้ดังนี้

$$\psi_m(u, v, z) = \begin{bmatrix} ce_m(q, v) Ce_m(q, u) \\ se_m(q, v) Se_m(q, u) \end{bmatrix} e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.108)$$

- เมื่อ ψ_m คือ ผลเฉลยทั่วไปของสมการคลื่นในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี
 m คือ อันดับ (Order) ของฟังก์ชัน Mathieu

โดยที่ฟังก์ชันของเมทิว (Mathieu Equation) ประกอบด้วยฟังก์ชันต่างๆ มีชื่อเรียกดังต่อไปนี้

- (1) $ce_m(q, v)$ คือ Ordinary even Mathieu function หรือ Ordinary cosine Mathieu function
- (2) $se_m(q, v)$ คือ Ordinary odd Mathieu function หรือ Ordinary sine Mathieu function
- (3) $Ce_m(q, u)$ คือ Modified even Mathieu function หรือ Cosine modified Mathieu function
- (4) $Se_m(q, u)$ คือ Modified odd Mathieu function หรือ Sine modified Mathieu function

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางภายในท่อนำคลื่นวงรีจะประกอบด้วยคลื่นโหมด TM และ TE ในกรณีคลื่นโหมด TM เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในทิศแกนตามยาว (Longitudinal Component) จะได้ว่า $H_z = 0, E_z = \psi_m$ และสำหรับกรณีคลื่นโหมด TE เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในทิศแกนตามยาว จะได้ว่า $E_z = 0, H_z = \psi_m$

จากสมการที่ (2.93) พบว่า E_z และ H_z มีรูปแบบที่ต่างกัน 2 แบบ ซึ่งสอดคล้องกับโหมดคู่หรือโหมดคี่ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่นวงรีทั้งหมด ประกอบด้วยคลื่น 4 โหมดที่ต่างกัน มีชื่อเรียกว่า TM_c, TM_s, TE_c และ TE_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left. \begin{array}{l} E_z \\ H_z \end{array} \right\} = K [C e_m(q, u) c e_m(q, v) + S e_m(q, u) s e_m(q, v)] e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.110)$$

โหมด TE ให้ $E_z = 0$

$$H_z = K [C e_m(q, u) c e_m(q, v) + S e_m(q, u) s e_m(q, v)] e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.111)$$

$$H_u = -\frac{\beta}{\omega \mu} E_v = -K \frac{j\beta}{(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})(\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2)} [C e'_m(q, u) c e_m(q, v) + S e'_m(q, u) s e_m(q, v)] e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.112)$$

$$H_v = \frac{\beta}{\omega \mu} E_u = -K \frac{j\beta}{(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})(\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2)} [C e_m(q, u) c e'_m(q, v) + S e_m(q, u) s e'_m(q, v)] e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.113)$$

โหมด TM ให้ $H_z = 0$

$$E_z = K [C e_m(q, u) c e_m(q, v) + S e_m(q, u) s e_m(q, v)] e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.114)$$

$$E_u = \frac{\beta}{\omega \epsilon} H_v = -K \frac{j\beta}{(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})(\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2)} [C e'_m(q, u) c e_m(q, v) + S e'_m(q, u) s e_m(q, v)] e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.115)$$

$$E_v = \frac{\beta}{\omega \epsilon} H_u = -K \frac{j\beta}{(c\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v})(\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2)} [C e_m(q, u) c e'_m(q, v) + S e_m(q, u) s e'_m(q, v)] e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.116)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่จำนวนเชิงซ้อน

จากสมการที่ (2.108) และสมการที่ (2.111) พบว่าจะสอดคล้องกับเงื่อนไขค่าขอบเขตที่เป็นผนังวงแหวน $E_v = 0$ ที่ $u = u_0$ คือ

$$\text{โหมด TM} \quad C e_m(q, u_0) = 0 \text{ (คู่)}, \quad S e_m(q, u_0) = 0 \text{ (คี่)} \quad (2.117)$$

$$\text{โหมด TE} \quad C e'_m(q, u_0) = 0 \text{ (คู่)}, \quad S e'_m(q, u_0) = 0 \text{ (คี่)} \quad (2.118)$$

เมื่อ u_0 คือค่า Radial Mathieu Function ของวงรีจากสมการที่ (2.92) พบว่า q มีความสัมพันธ์กับค่าเลขคลื่นตัด ซึ่งค่า q ที่ได้จะแตกต่างกันสำหรับแต่ละค่ารากของสมการที่ (2.101) และสมการที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.102) ตัวห้อย n จะบอกถึงลำดับค่ารากแบบพาราเมตริก ซึ่งจะใช้ในการกำหนดโหมด สูตรที่ใช้ในการหาค่าความยาวคลื่นตัดของโหมด TE และ TM สำหรับท่อนำคลื่นแบบวงรี มีสมการคือ

$$\lambda_c = \frac{\pi a e}{\sqrt{q}} \tag{2.119}$$

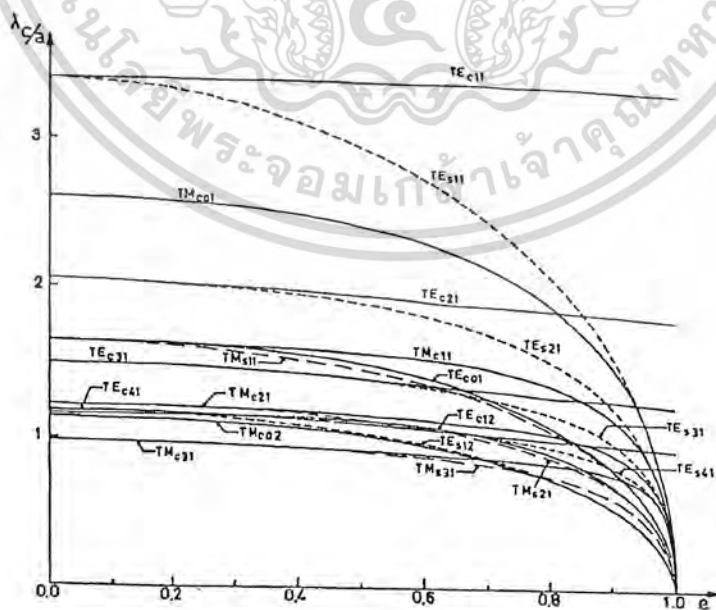
ในกรณีโหมด TM_{Cmn} $q = q_{Cmn}$ เป็นค่ารากพาราเมตริกของฟังก์ชัน Modified Mathieu แบบคู่ ลำดับที่ m เมื่อใช้อาร์กิวเมนต์ u_0

ในกรณีโหมด TM_{Snm} $q = q_{Snm}$ เป็นค่ารากพาราเมตริกของฟังก์ชัน Modified Mathieu แบบคี่ ลำดับที่ m เมื่อใช้อาร์กิวเมนต์ u_0

ในกรณีโหมด TE_{Cmn} $q = \bar{q}_{Cmn}$ เป็นค่ารากพาราเมตริกของอนุพันธ์ฟังก์ชัน Modified Mathieu แบบคู่ ลำดับที่ m เมื่อใช้อาร์กิวเมนต์ u_0

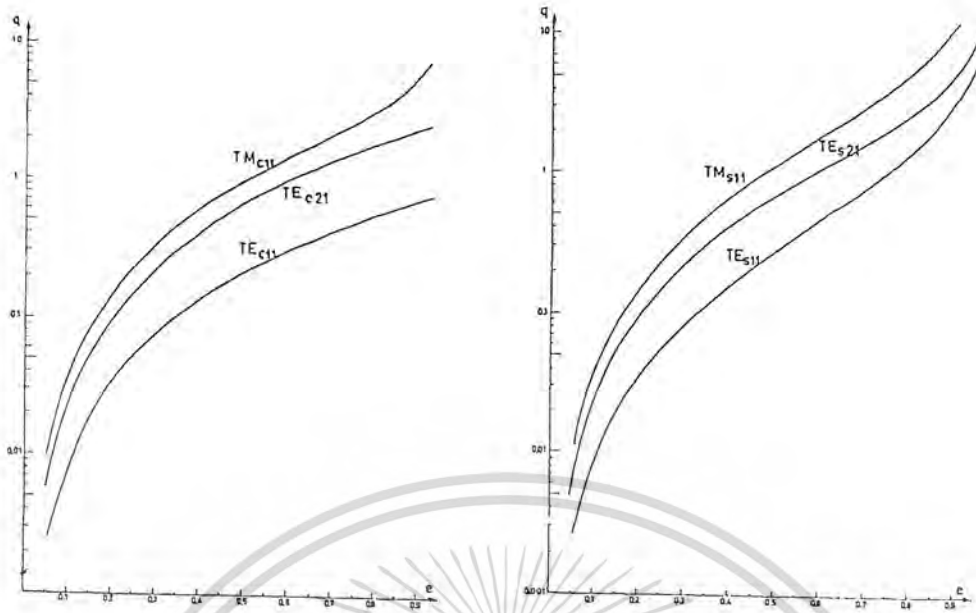
ในกรณีโหมด TE_{Snm} $q = \bar{q}_{Snm}$ เป็นค่ารากพาราเมตริกของอนุพันธ์ฟังก์ชัน Modified Mathieu แบบคี่ ลำดับที่ m เมื่อใช้อาร์กิวเมนต์ u_0

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{\lambda_c}{a}$ และ e สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 จากสมการที่ (2.105),(2.106) และสมการที่ (2.107) ค่าความยาวคลื่นตัดของโหมดใด ๆ จะเป็นฟังก์ชันของขนาดพื้นที่หน้าตัดวงรี และค่า q พร้อมทั้งยังขึ้นอยู่กับค่าโหมดและ e ด้วย จึงทำให้สรุปได้ว่าความยาวคลื่นตัดที่โหมดใด ๆ ในท่อนำคลื่น จะหาได้จากขนาดของพื้นที่หน้าตัดวงรี ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.8



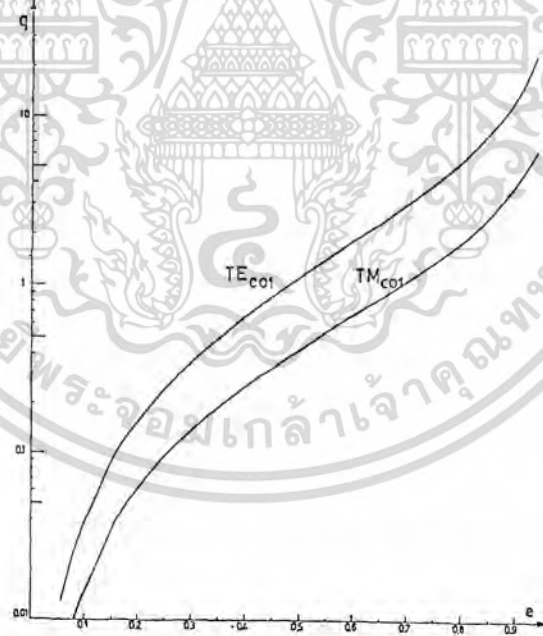
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\lambda_c}{a}$ กับ e

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โหมด TM_{c11} , TE_{c11} และ TE_{c21}

(ข) โหมด TM_{s11} , TE_{s11} และ TE_{s21}



(ค) โหมด TE_{c01} และ TM_{c01}

รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q และ e

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สมการสนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศ

2.5.1 อินทิกรัลการแพร่กระจายคลื่นและฟังก์ชันช่วย

ในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่น เราจะคำนวณหาคลื่นที่แพร่กระจายเมื่อเรา กำหนดตำแหน่งกำเนิดคลื่นมาให้ ในทางกลับกันสำหรับการสังเคราะห์จะคำนวณตำแหน่งกำเนิดเมื่อกำหนดคลื่นที่ แพร่กระจายมาให้

ในทางปฏิบัติวิธีการวิเคราะห์จะใช้ฟังก์ชันช่วย (Auxiliary Function) ที่เรียกว่าศักย์เวกเตอร์ (Vector Potential) ช่วยในการแก้ปัญหา ศักย์เวกเตอร์ที่ใช้มากได้แก่ ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก (Magnetic Vector Potential) \vec{A} ศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า (Electric Vector Potential) \vec{F} นอกจากนี้ก็มีศักย์ดาศิตซ์ (Hertz Potential) π_e และ π_h สำหรับการคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก \vec{E} และ \vec{H} ตามลำดับนั้นมักจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือฟังก์ชันช่วยจากความหนาแน่นกระแสต้นกำเนิด (Source Current Density) \vec{J} หรือ \vec{M} ก่อน จากนั้นจะคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า \vec{E} และความเข้ม สนามแม่เหล็ก \vec{H} จากฟังก์ชันช่วยเหล่านี้ แทนที่จะคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า \vec{E} และความเข้ม สนามแม่เหล็ก \vec{H} โดยตรงจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า \vec{J} และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก \vec{M} ซึ่งในบทนี้จะใช้ศักย์เวกเตอร์ \vec{A} และ \vec{F} ช่วยในการคำนวณหาสนาม



รูปที่ 2.9 ฟังก์ชันการคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายต้นกำเนิด ไฟฟ้าและแม่เหล็ก

2.5.2 ศักย์เวกเตอร์ \vec{A} อันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าต้นกำเนิด \vec{J}

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้ศักย์เวกเตอร์ \vec{A} ในการหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากความ หนาแน่นกระแสไฟฟ้าต้นกำเนิดให้มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาที่เป็นฮาร์โมนิกเป็นที่ทราบกันดีว่าความ หนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก \vec{B} มีลักษณะเป็นห่วงปิด คือมี $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ ดังนั้นอาจแสดงได้ว่า

เวกเตอร์ \vec{B} เป็นเคิร์ล (Curl) ของเวกเตอร์หนึ่งเวกเตอร์ใดได้เพราะเป็นไปตามเวกเตอร์ไเดน ติตี (Vector Identity) ต่อไป

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{A} = 0 \tag{2.120}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ \vec{A} เป็นเวกเตอร์ใด ๆ จะให้

$$\vec{B}_A = \mu \vec{H}_A = \nabla \times \vec{A} \quad (2.121)$$

หรือ

$$\vec{H}_A = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (2.122)$$

อักษร A ที่ห้อยท้ายแสดงว่าเป็นสนามที่เกิดจากศักย์เวกเตอร์ \vec{A} เมื่อแทนสมการที่ (2.112) ในสมการแมกซ์เวลล์ที่ว่า $\nabla \times \vec{E}_A = -j\omega\mu\vec{H}_A$ จะได้ว่า

$$\nabla \times \vec{E}_A = -j\omega\mu\vec{H}_A \quad (2.123)$$

$$= -j\omega\nabla \times \vec{A} \quad (2.124)$$

เพราะฉะนั้น

$$\nabla \times [\vec{E}_A + j\omega\vec{A}] = 0 \quad (2.125)$$

จากเวกเตอร์ไอเดนติตี้ (Vector Identity) ที่เคอร์ของเกรเดียนที่มีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า

$$\nabla \times [-\nabla\phi_c] = 0 \quad (2.126)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.125) และสมการที่ (2.126) จะได้ผลลัพธ์ต่อไปนี้เป็นคือ

$$\vec{E}_A + j\omega\vec{A} = -\nabla\phi_c \quad (2.127)$$

หรือ

$$\vec{E}_A = -\nabla\phi_c - j\omega\vec{A}$$

เมื่อ ϕ_c แทนศักย์เกลาร์ไฟฟ้า (Electric Scalar Potential) ใด ๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในสเปซเมื่อทำการเกร็ดทั้งสองข้างในสมการที่ (2.121) และใช้เวกเตอร์ไอเดนติตี้ (Vector Identity) ที่ว่า

$$\nabla \times \nabla \vec{A} = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (2.128)$$

จะทำให้ได้

$$\nabla \times (\mu \vec{H}_A) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (2.129)$$

สำหรับกรณีที่ตัวกลางเป็นแบบเนื้อเดียว (Homogeneous) จะเขียนได้ใหม่เป็นดังนี้คือ

$$\mu \nabla \times \vec{H}_A = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (2.130)$$

เมื่อจับสมการที่ (2.130) เท่ากับสมการแมกซ์เวลล์ต่อไปนี้เป็นคือ $\nabla \times \vec{H}_A = \vec{J} + j\omega\epsilon\vec{E}_A$ จะทำให้สมการที่ (2.130) กลายเป็น

$$\mu \vec{J} + j\omega\mu\epsilon\vec{E}_A = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (2.131)$$

หลังจากแทนสมการที่ (2.128) ลงในสมการที่ (2.131) จะได้

$$\nabla^2 \cdot \vec{A} + K^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} + \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) + \nabla(j\omega\mu\epsilon\phi_c) \quad (2.132)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตเหนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla^2 \cdot \vec{A} + K^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} + \nabla(\nabla \cdot \vec{A} + J\omega\mu\epsilon\phi_c) \quad (2.133)$$

เมื่อ $K^2 = \omega^2 \mu\epsilon$

สมการที่(2.133) เป็นคำจำกัดความของศักย์เวกเตอร์ \vec{A} ต่อไปจะกำหนดไดเวอร์เจนต์ ของศักย์ (Divergent) เวกเตอร์ \vec{A} ขึ้นเองโดยไม่ขึ้นกับค่าของเคิร์ลของมัน เพื่อให้สมการที่ (2.133) มีรูปสมการที่ง่ายขึ้น จะกำหนดให้

$$\nabla \cdot \vec{A} = -j\omega\mu\epsilon\phi_c \quad (2.134)$$

ซึ่งทำให้ได้

$$\phi_c = -\frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla \cdot \vec{A} \quad (2.135)$$

เรียกสมการที่ (2.135) ว่าลอเรนซ์คอนดิชัน (Lorentz Condition) เมื่อแทนสมการที่ (2.135) ลงในสมการที่ (2.133) จะได้ผลลัพธ์คือ

$$\nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (2.136)$$

นอกจากนี้เขียนสมการที่ (2.127) ใหม่นี้

$$\vec{E}_A = -\nabla\phi_c - j\omega\vec{A} = -J\omega\vec{A} - j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\nabla(\nabla \cdot \vec{A}) \quad (2.137)$$

จากที่แสดงมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่าเมื่อเรารู้ค่าศักย์เวกเตอร์ \vec{A} จะสามารถคำนวณหา \vec{H}_A ได้ จากสมการที่(2.122) และหา \vec{E}_A ได้จาก (2.137) จะแสดงวิธีหาค่า \vec{A} ในเทอมของความหนาแน่นกระแส \vec{J} จากสมการที่ (2.136)

2.5.3 ศักย์เวกเตอร์ \vec{F} อันเนื่องมาจากกระแสแม่เหล็กต้นกำเนิด \vec{M}

แม้ว่ากระแสแม่เหล็กจะไม่มีจริงแต่อาจคิดว่ามีสนามแม่เหล็ก สมมูลย์เกิดขึ้นในปริมาตรหรือผิว สมมูลย์ได้สนามที่เกิดจากแม่เหล็กฮาร์โมนิกในบริเวณที่ตัวกลางเป็นโฮมอจีเนียสที่มี $\vec{J} = 0$ แต่ $\vec{M} \neq 0$ จะต้องสอดคล้องกับสมการ $\nabla \cdot \vec{D} = 0$

ดังนั้นสามารถแสดงได้ว่า \vec{E}_F เป็นเคิร์ลของศักย์เวกเตอร์ \vec{F} จาก

$$\vec{E}_F = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \vec{F} \quad (2.138)$$

แทนสมการที่ (2.121) ลงในสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ ที่ว่า $\nabla \times \vec{H} = j\omega\vec{D}$ จะได้ว่า

$$\nabla \times \vec{H}_F = -j\omega\epsilon\vec{E}_F \quad (2.139)$$

หรือ

$$\nabla \times (\vec{H}_F + j\omega\vec{F}) = 0 \quad (2.140)$$

จากเวกเตอร์ไอเดนติตี้ต่อไปนี้ คือ $\nabla \times (-\nabla\phi_c) = 0$ ทำให้สามารถหาค่า \vec{H}_F ได้ดังนี้

$$\vec{H}_F = -\nabla\phi_m \cdot j\omega\vec{F} \quad (2.141)$$

เมื่อ ϕ_m แทนศักย์สเกลลาร์แม่เหล็กใด ๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในสเปซ เมื่อทำเคิร์ลในสมการที่ (2.138) จะได้ผลลัพธ์ต่อไปนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla \times \vec{E}_F = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \nabla \times \vec{F} = -\frac{1}{\epsilon} [\nabla \nabla \cdot \vec{F} - \nabla^2 \vec{F}] \quad (2.142)$$

แล้วจับให้เท่ากับสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \vec{E}_F = -\vec{M} - j\omega\mu\vec{H}_F \quad (2.143)$$

จะได้ผลลัพธ์ต่อไปนี้

$$\nabla^2 \vec{F} + j\omega\mu\epsilon\vec{H}_F = \nabla \nabla \cdot \vec{F} - \epsilon\vec{M} \quad (2.144)$$

หลังจากแทนสมการที่ (2.141) ลงในสมการที่ (2.144) จะเขียนสมการที่ (2.144) ได้ใหม่ว่า

$$\nabla^2 \vec{F} + K^2 \vec{F} = -\epsilon\vec{M} + \nabla(\nabla \cdot \vec{F}) + \nabla(j\omega\mu\epsilon\phi_m) \quad (2.145)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\nabla \cdot \vec{F} = j\omega\mu\epsilon\phi_m \rightarrow \phi_m = -\frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla \cdot \vec{F} \quad (2.146)$$

สมการที่ (2.128) จะกลายเป็น

$$\nabla^2 \vec{F} + K^2 \vec{F} = -\epsilon\vec{M} \quad (2.147)$$

และจะเขียนสมการที่ (2.145) ได้ใหม่ดังนี้คือ

$$\vec{H}_F = -j\omega\vec{F} - \frac{j}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{F}) \quad (2.148)$$

จะเห็นว่าเมื่อรู้ค่าศักย์เวกเตอร์ \vec{F} จะได้ค่า \vec{E}_F ได้จากสมการที่ (2.130) และ \vec{H}_F จากสมการที่ (2.148) เมื่อ $\vec{M} = 0$

2.5.4 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสค้ำเหน็ด \vec{J} และ \vec{M}

ในสองหัวข้อที่ผ่านมาได้แสดงสมการที่จะคำนวณหาสนาม \vec{E} และ \vec{H} จากแหล่งกำเนิด \vec{J} และ \vec{M} ในวิธีดังกล่าวต้องหาฟังก์ชันช่วย \vec{A} และ \vec{F} จาก \vec{J} และ \vec{M} ก่อน จากนั้นจึงหา \vec{E}_A, \vec{H}_A จาก \vec{A} หรือ \vec{E}_F, \vec{H}_F จาก \vec{F} ได้ สนามรวมจะเป็นผลรวมของสนามแต่ละสนามที่เกิดจาก \vec{A} และ \vec{F}

สรุปขั้นตอนการคำนวณหาสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ารวม

1. กำหนด \vec{J} และ \vec{M}
2. ก) หา \vec{A} ที่เกิดจาก \vec{J} โดยใช้

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \vec{J} \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.149)$$

ซึ่งเป็นคำตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบเนื้อเดียวในสมการที่(2.120)

- ข) หา \vec{F} ที่เกิดจาก \vec{M} โดยใช้

$$\vec{F} = \frac{\epsilon}{4\pi} \iiint_V \vec{M} \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.150)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นคำตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบเนื้อเดียวในสมการที่(2.147) ในสมการที่ (2.149) และสมการที่ (2.150)

$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$ และ R เป็นระยะทางจากจุดใด ๆ ในต้นกำเนิดไปยังจุดที่ทำการสังเกตค่าสนามในหัวข้อต่อไปจะแสดงวิธีหาคำตอบในสมการที่ (2.149) และสมการที่ (2.150)

3. ก) หา \vec{H}_A จากสมการที่ (2.121) และ \vec{E}_A จากสมการที่ (2.137) หรืออาจหา \vec{E}_A จากสมการแมกซ์เวลล์ เมื่อ $\vec{J} = 0$

ข) หา \vec{E}_F จากสมการที่ (2.138) และ \vec{H}_F จากสมการที่ (2.148) หรืออาจหา \vec{H}_F จากสมการแมกซ์เวลล์ เมื่อ $\vec{M} = 0$

4. หาสนามรวมได้จาก

$$\vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_F = -j\omega\vec{A} - j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\nabla(\nabla\cdot\vec{A}) - \frac{1}{\epsilon}\nabla\times\vec{F} \tag{2.151}$$

หรือ

$$\vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_F = \frac{1}{j\omega\epsilon}\nabla\times\vec{H}_A - \frac{1}{\epsilon}\nabla\times\vec{F} \tag{2.152}$$

และ

$$\vec{H} = \vec{H}_A + \vec{H}_F = \frac{1}{\mu}\nabla\times\vec{A} - j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\nabla(\nabla\cdot\vec{F}) \tag{2.153}$$

หรือ

$$\vec{H} = \vec{H}_A + \vec{H}_F = \frac{1}{\mu}\nabla\times\vec{A} - j\frac{1}{\omega\mu}\nabla\times\vec{E}_F \tag{2.154}$$

2.5.5 การคำนวณหาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงรี

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงรี โดยใช้ศักย์เวกเตอร์ โดยในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงสมการช่วยในการหาสนามต่างๆแล้ว หัวข้อนี้จะแสดงสมการคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี

ในการคำนวณหาสนามของคลื่นที่การแพร่กระจายในบริเวณสนามระยะไกลของสายอากาศวงแหวนแบบวงรีกระตุ้น โดย โพรบ สามารถหาได้จากการอินทิเกรชันความหนาแน่นกระแสของแหล่งกำเนิดแม่เหล็ก (\vec{M}) และความหนาแน่นกระแสของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (\vec{J}) โดยเวกเตอร์การแพร่กระจายคลื่น (Radiation Vector) \vec{L} และ \vec{N} ในทิศทาง θ และ ϕ ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง \vec{M} และ \vec{J} ตามลำดับ จากสมการที่ (2.149) และสมการที่ (2.150) เขียนในรูปการอินทิเกรชันเชิงพื้นที่

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_s \vec{J}_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' = \frac{\mu e^{-jkR}}{4\pi r} \vec{N} \tag{2.155}$$

$$\vec{N} = \iint_s \vec{J}_s \frac{e^{-jkr'\cos\psi}}{R} ds' \tag{2.156}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint_s M_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' = \frac{\varepsilon e^{-jkR}}{4\pi r} L \quad (2.157)$$

$$L = \iint_s M_s \frac{e^{-jkr' \cos \psi}}{R} ds' \quad (2.158)$$

ในสนามสนามระยะไกลซึ่งประกอบด้วยมุม θ และมุม ϕ ของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กซึ่งสามารถเขียนดังนี้

$$(E_A)_\theta = -j\omega A_\theta \quad (2.159)$$

$$(E_A)_\phi = -j\omega A_\phi \quad (2.160)$$

$$(H_F)_\theta = -j\omega F_\theta \quad (2.161)$$

$$(H_F)_\phi = -j\omega F_\phi \quad (2.162)$$

เมื่อนำค่า E_F และ H_A ในสมการที่ (2.155) ถึงสมการที่ (2.158) ไปแทนในสมการที่ (2.159) ถึงสมการที่ (2.162) จะได้ดังนี้

$$(E_F)_\theta = +\eta(H_F)_\phi = -j\omega\eta F_\phi \quad (2.163)$$

$$(E_F)_\phi = -\eta(H_F)_\theta = +j\omega\eta F_\theta \quad (2.164)$$

$$(H_A)_\theta = \frac{(E_A)_\phi}{\eta} = +j\omega \frac{A_\phi}{\eta} \quad (2.165)$$

$$(H_A)_\phi = +\frac{(E_A)_\theta}{\eta} = -j\omega \frac{A_\theta}{\eta} \quad (2.166)$$

ทำการรวมสมการจากสมการที่ (2.151) ถึงสมการที่ (2.154) จะได้สนามไฟฟ้า \vec{E} และสนามแม่เหล็ก \vec{H} ทั้งหมด ดังนี้

$$E_r = 0 \quad (2.167)$$

$$E_\theta = -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (L_\theta + \eta N_\theta) \quad (2.168)$$

$$E_\phi = +\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (L_\phi - \eta N_\phi) \quad (2.169)$$

$$H_r = 0 \quad (2.170)$$

$$H_\theta = +\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (N_\phi - \frac{L_\theta}{\eta}) \quad (2.171)$$

$$H_\phi = -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (N_\theta + \frac{L_\phi}{\eta}) \quad (2.172)$$

ซึ่งแสดงค่า L และ N ในระบบพิกัดฉาก เป็นสมการดังนี้

$$L_\theta = \iint_s (M_x \cos \theta \cos \phi + M_y \cos \theta \sin \phi - M_z \sin \theta) e^{jkr' \cos \psi} ds' \quad (2.173)$$

$$L_\phi = \iint_s (-M_x \sin \phi + M_y \cos \phi) e^{jkr' \cos \psi} ds' \quad (2.174)$$

$$N_\theta = \iint_s (J_x \cos \theta \cos \phi + J_y \cos \theta \sin \phi - J_z \sin \theta) e^{jkr' \cos \psi} ds' \quad (2.175)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_\phi = \iiint_V (-J_x \sin \phi + J_y \cos \phi) e^{ikr' \cos \psi} ds' \quad (2.176)$$

เมื่อ

$$r' \cos \psi = c \sinh u \sin v \sin \theta \cos \phi + z \cos \theta \quad (2.177)$$

$$r' \cos \psi = c \cosh u \cos v \sin \theta \cos \phi + c \sinh u \sin v \cos \theta \quad (2.176)$$

$$r' \cos \psi = c \cosh u \cos v \sin \theta \cos \phi + c \sinh u \sin v \sin \theta \sin \phi \quad (2.179)$$

และสมการเชิงอนุพันธ์

$$ds' = dy' dz' = c^2 (\sinh^2 u + \sin^2 v) \cdot dv dz \quad (2.180)$$

$$ds' = dx' dz' = c^2 (\sinh^2 u + \sin^2 v) \cdot du dz \quad (2.181)$$

$$ds' = dx' dy' = c^2 (\sinh^2 u + \sin^2 v) \cdot du dv \quad (2.182)$$

แปลงองค์ประกอบ \bar{M} จากองค์ประกอบในพิกัดทรงกระบอกวงรีให้อยู่ในระบบพิกัดฉากโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v & \frac{1}{\Delta} \cosh u \sin v & 0 \\ -\frac{1}{\Delta} \cosh u \sin v & \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_u \\ M_v \\ M_z \end{bmatrix}$$

โดยกำหนดให้ $\Delta = \sqrt{\cosh^2 u - \cos^2 v}$

ดังนั้นจะได้

$$M_x = M_u \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v + M_v \frac{1}{\Delta} \cosh u \sin v \quad (2.182)$$

$$M_y = -M_u \frac{1}{\Delta} \cosh u \sin v + M_v \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v \quad (2.183)$$

$$M_z = M_z \quad (2.184)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.173) ถึงสมการที่ (2.174) ใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} L_\theta = & \iiint_V \left(M_u \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v \cos \theta \cos \phi + M_v \frac{1}{\Delta} \cosh u \sin v \cos \theta \cos \phi \right. \\ & \left. + M_u \left(-\frac{1}{\Delta} \right) \cosh u \sin v \cos \theta \sin \phi + M_v \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v \cos \theta \sin \phi - M_z \sin \theta \right) e^{ikr' \cos \psi} ds' \end{aligned} \quad (2.185)$$

$$\begin{aligned} L_\phi = & \iiint_V \left(-\left(M_u \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v + M_v \frac{1}{\Delta} \cosh u \sin v \right) \sin \phi \right. \\ & \left. + \left(M_u \left(-\frac{1}{\Delta} \right) \cosh u \sin v + \left(M_v \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v \right) \cos \phi \right) e^{ikr' \cos \psi} ds' \right) \end{aligned} \quad (2.186)$$

ในทำนองเดียวกันแปลงองค์ประกอบ \bar{J} จากองค์ประกอบในพิกัดทรงกระบอกวงรีให้อยู่ในระบบพิกัดฉาก โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v & \frac{1}{\Delta} \cosh u \sin v & 0 \\ -\frac{1}{\Delta} \cosh u \sin v & \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_u \\ J_v \\ J_z \end{bmatrix}$$

โดยกำหนดให้ $\Delta = \sqrt{\cosh^2 u - \cos^2 v}$ เช่นเดียวกัน

จะได้ความสัมพันธ์

$$J_x = J_u \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v + J_v \frac{1}{\Delta} \cosh u \sin v \quad (2.187)$$

$$J_y = -J_u \frac{1}{\Delta} \cosh u \sin v + J_v \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v \quad (2.188)$$

$$J_z = J_z \quad (2.189)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.175) ถึงสมการที่ (2.176) ใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} N_\theta = & \iint_s \left(J_u \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v \cos \theta \cos \phi + J_v \frac{1}{\Delta} \cosh u \sin v \cos \theta \cos \phi \right. \\ & \left. + J_u \left(-\frac{1}{\Delta} \right) \cosh u \sin v \cos \theta \sin \phi + J_v \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v \cos \theta \sin \phi - J_z \sin \theta \right) e^{jkr' \cos \theta} ds' \end{aligned} \quad (1.190)$$

$$\begin{aligned} N_\phi = & \iint_s \left(-\left(J_u \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v + J_v \frac{1}{\Delta} \cosh u \sin v \right) \sin \phi \right. \\ & \left. + \left(J_u \left(-\frac{1}{\Delta} \right) \cosh u \sin v + \left(J_v \frac{1}{\Delta} \sinh u \cos v \right) \cos \phi \right) e^{jkr' \cos \theta} \right) ds' \end{aligned} \quad (1.191)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างสายอากาศที่มีโพรบวางในทิศทางแกน y ดังรูปที่ 2.10 จะสามารถลดรูป L ให้มีเฉพาะองค์ประกอบความหนาแน่นกระแสของแหล่งกำเนิดแม่เหล็กในทิศทาง x เท่านั้นที่กระจายในลักษณะยูนิฟอร์ม ดังนั้น L ที่นอร์มัลไลซ์จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$(L_\theta)_n = \cos(\theta) \cos(\phi) \int_0^{2\pi} \int_0^{u_0} e^{jk [c \cosh(u) \cos v \sin(\theta) \cos(\phi) + c \sinh(u) \sin v \sin(\theta) \sin(\phi)]} (\sinh^2(u) + \sin^2(v)) dudv \quad (2.192)$$

$$(L_\phi)_n = \sin(\phi) \int_0^{2\pi} \int_0^{u_0} e^{jk [c \cosh(u) \cos v \sin(\theta) \cos(\phi) + c \sinh(u) \sin v \sin(\theta) \sin(\phi)]} (\sinh^2(u) + \sin^2(v)) dudv \quad (2.193)$$

ในทำนองเดียวกัน สามารถลดรูป N ให้มีเฉพาะองค์ประกอบความหนาแน่นกระแสของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในทิศทาง y เท่านั้นที่กระจายในลักษณะยูนิฟอร์ม ดังนั้น N ที่นอร์มัลไลซ์จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$(N_\theta)_n = \cos(\theta) \sin(\phi) \int_0^{2\pi} \int_0^{u_0} e^{jk [c \cosh(u) \cos v \sin(\theta) \cos(\phi) + c \sinh(u) \sin v \sin(\theta) \sin(\phi)]} (\sinh^2(u) + \sin^2(v)) dudv \quad (2.194)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(N_\phi)_n = \cos(\phi) \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} e^{ik[c \cosh(u) \cos(v) \sin(\theta) \cos(\phi) + c \sinh(u) \sin(v) \sin(\theta) \sin(\phi)]} (\sinh^2(u) + \sin^2(v)) dudv \quad (2.195)$$

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในองค์ประกอบต่าง ๆ ในบริเวณสนามระยะไกลสามารถหาได้ โดยอาศัยสมการองค์ประกอบทิสสัมพัทธ์ที่กระจายบนช่องเปิดแบบยูนิฟอร์มภายในบริเวณที่เป็นวงรี (Aperture Distribution Of Tangential Components) แสดงสมการได้ดังนี้

$$\bar{E}_a = E_0 \hat{a}_y \quad (2.196)$$

$$\bar{H}_a = -\frac{E_0}{\eta} \hat{a}_x \quad (2.197)$$

$$\bar{M}_s = -\hat{n} \times E_u \quad (2.198)$$

$$\bar{J}_s = \hat{n} \times E_u \quad (2.199)$$



รูปที่ 2.10 แสดงการกระจายสนามแบบยูนิฟอร์มบนช่องเปิดแบบวงรีในอากาศ

ในบริเวณสนามระยะไกล องค์ประกอบ r , ϕ และ θ ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ออกจากสายอากาศวงรีระยะต้นโดยโพรบ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.195) ถึงสมการที่ (2.198) โดยมีสมการดังนี้

$$E_r = 0 \quad (2.200)$$

$$E_\theta = (L_\theta)_n \sin(0.5kd \cos(\theta))(1 + \cos(\theta)) \quad (2.201)$$

$$E_\phi = (L_\phi)_n \sin(0.5kd \cos(\theta))(1 + \cos(\theta)) \quad (2.202)$$

$$H_r = 0 \quad (2.203)$$

$$H_\theta = -\frac{E_\phi}{\eta} \quad (2.204)$$

$$H_\phi = \frac{E_\theta}{\eta} \quad (2.205)$$

กำหนดให้ k คือ ค่าเลขคลื่นที่ความถี่ใช้งาน โดยที่ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ และ d คือความยาวของวงรี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.6 ตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor)

เนื่องจากรูปแบบของสายอากาศเพียงองค์ประกอบเดียว ไม่สามารถจะให้ค่าการชี้ทิศทางและค่าอัตราขยาย (Gain) ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบสายอากาศให้มีค่ามาก ๆ ได้ ดังนั้น วิธีการหนึ่งที่จะทำให้ค่าการชี้ทิศทางและค่าอัตราขยายให้มีค่ามากขึ้นได้ คือ การจัดรูปแบบของสายอากาศให้เป็นแถวลำดับ (Array) ซึ่งเป็นการนำสายอากาศตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไปมาจัดเรียงในรูปแบบต่าง ๆ แต่รูปแบบที่ได้นั้นจะต้องมีความเข้าใจที่จะทำให้สนามที่แพร่กระจายออกจากองค์ประกอบสายอากาศ แต่ละองค์ประกอบเกิดการเสริมกัน ในทิศทางที่ต้องการและหักล้างกันในทิศทางที่ไม่ต้องการ ซึ่งการทำแถวลำดับนั้นมีหลายแบบด้วยกัน แต่ที่จะนำมาใช้ในโครงงานนี้จะเป็นการทำแถวลำดับแบบเชิงเส้น (Linear Array)

โดยจะเริ่มพิจารณาจาก สายอากาศไดโพล 2 องค์ประกอบ ที่วางอยู่ในแนวแกน z ดังรูปที่ 2.11 เมื่อทำการสังเกตที่สนามระยะไกล ($r \rightarrow \infty$) และให้จุดอ้างอิงอยู่ที่กลางระหว่างสายอากาศทั้งสอง องค์ประกอบจะได้ว่า



รูปที่ 2.11 สายอากาศไดโพล 2 องค์ประกอบที่วางบนแกน z

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

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

สำหรับการแปรผันของเฟส

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

สำหรับการแปรผันของขนาด

$$r_1 = r_2 = r$$

ซึ่งจะได้สนามรวมในการแพร่กระจายคลื่นของไดโพล 2 องค์ประกอบเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_r = a_o j \eta \frac{k I_o l}{4\pi} |\cos(\theta)| \frac{1}{r} \left[e^{-ikr + jk \frac{d}{2} \cos(\theta) + \frac{j\beta}{2}} + e^{-ikr - jk \frac{d}{2} \cos(\theta) + \frac{j\beta}{2}} \right] \quad (2.206)$$

$$\therefore E_r = a_o j \eta \frac{k I_o l}{4\pi} |\cos(\theta)| \frac{1}{r} e^{-ikr} \left[e^{j \frac{(kd \cos(\theta) + \beta)}{2}} + e^{-j \frac{(kd \cos(\theta) - \beta)}{2}} \right] \quad (2.207)$$

เมื่อ β คือ ความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

จากสมการจะพบว่าสามารถรวมในการแพร่กระจายคลื่นของไดโพล 2 องค์ประกอบ จะมีค่าเท่ากับสนามของไดโพล 1 องค์ประกอบ คูณอยู่กับเทอม ๆ หนึ่ง ซึ่งเทอมเทอมนี้จะถูกเรียกว่าเป็น อาร์เรย์แฟคเตอร์ ซึ่งเราจะได้เทอมของอาร์เรย์แฟคเตอร์ คือ

$$AF = e^{-j \frac{(kd \cos(\theta) - \beta)}{2}} + e^{-j \frac{(kd \cos(\theta) + \beta)}{2}} \quad (2.207)$$

ต่อไปจะพิจารณาจากสายอากาศไดโพล N องค์ประกอบ ที่วางอยู่ในแนวแกน z โดยเริ่มที่ตำแหน่ง $z = 0$ และจากการสังเกตที่สนามระยะไกล โดยให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเป็น d ดังรูปที่ 2.12 จะได้ว่า



รูปที่ 2.12 สายอากาศไดโพล N องค์ประกอบ ที่วางอยู่บนแกน z

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

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

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

\vdots

สำหรับการแปรผันของเฟส

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

$$r_1 \approx r_2 \approx r_3 \approx \dots \approx r_N \text{ สำหรับการแปรผันของขนาด}$$

(2.208)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสนามรวมของสายอากาศไดโพล 2 องค์ประกอบ จะได้สนามรวมของสายอากาศไดโพล N องค์ประกอบ ได้ดังนี้

$$El = a_\theta j\eta \frac{kI_0}{4\pi} \left[\frac{e^{-j(kr_1 - \beta)}}{r_1} |\cos(\theta_1)| + \frac{e^{-j(kr_2 - \beta)}}{r_2} |\cos(\theta_2)| + \dots + \frac{e^{-j(kr_N - \beta)}}{r_N} |\cos(\theta_N)| \right] \quad (2.209)$$

โดยกำหนดให้ความต่างเฟสของกระแส (β) ที่ป้อนให้กับสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ เป็นแบบ Progressive Phase คือเฟสของกระแสในสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ จะนำหน้าเฟสของกระแสในสายอากาศที่อยู่ก่อนหน้าในแถวลำดับเดียวกัน
เมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกล จะได้ว่า

$$El = a_\theta j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi r} |\cos(\theta)| \left[e^{j(kr_1 - \beta)} + e^{j(kr_2 - \beta)} + \dots + e^{j(kr_N - \beta)} \right] \quad (2.210)$$

เนื่องจากที่ r มีค่าเท่ากับ 0 เพราะฉะนั้น จากสนามรวม E จะได้ว่า ความต่างเฟสของกระแสในส่วนของ r มีค่าเท่ากับ 0 เพราะฉะนั้น จากสนามรวม E จะได้ว่า

$$El = a_\theta j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi r} |\cos(\theta)| e^{jk r} \left[1 + e^{j(kd \cos(\theta) + \beta)} + \dots + e^{j(N-1)(kd \cos(\theta) + \beta)} \right] \quad (2.211)$$

ถ้าพิจารณาในเทอมของอาร์เรย์แฟกเตอร์ จะได้ว่า

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos(\theta) + \beta)} \quad (2.212)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad ; \psi = kd \cos(\theta) + \beta \quad (2.213)$$

เพื่อให้รูปแบบของอาร์เรย์แฟกเตอร์เรียบง่ายขึ้นสามารถทำได้โดยทำการคูณทั้งสองข้างของสมการด้วย $e^{j\psi}$ ทำให้ได้ว่า

$$AF e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{jN\psi} \quad (2.214)$$

นำสมการที่ (2.214) ลบกับสมการที่ (2.213) จะได้ว่า

$$AF(e^{j\psi} - 1) = -1 + e^{jN\psi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = \frac{-1 + e^{iN\psi}}{e^{i\psi} - 1}$$

$$AF = e^{j\frac{(N-1)\psi}{2}} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right] \quad (2.215)$$

เมื่อ N คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ

ดังนั้น จากสมการที่ (2.215) ก็คือ รูปแบบอย่างง่ายที่สามารถแทนค่าจำนวนสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบ แทนการหาผลรวมทั้งหมด N องค์ประกอบที่แสดงในสมการที่ (2.212) ซึ่งจะให้ค่าที่เท่ากันต่อไปเราจะกำหนดให้จุดอ้างอิงอยู่ที่กลางของสายอากาศที่มีอยู่ทั้งหมด N องค์ประกอบ ซึ่งแบ่งการพิจารณาได้ 2 กรณี คือ

2.5.6.1 กรณีวางองค์ประกอบตามแกน x ทั้งหมด N องค์ประกอบ

จากสมการที่ (2.212)

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

$$\cos(\gamma) = a_x \cdot a_r$$

$$\cos(\gamma) = a_x \cdot \{a_r \sin(\theta) \cos(\phi) + a_z \sin(\theta) \sin(\phi) + a_y \cos(\theta)\}$$

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

ถ้าให้ a_n มีค่าเท่ากัน i ในสายอากาศทุก ๆ องค์ประกอบ ได้ว่า

$$AF_x = \sum_{n=1}^M e^{j(n-1)(kd \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta)} \quad (2.216)$$

จัดรูปใหม่ โดยให้ $\psi_x = (kd \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta)$ จะได้ว่า

$$AF_x = \frac{e^{jM\psi_x} - 1}{e^{j\psi_x} - 1}$$

$$AF_x = \frac{e^{j\frac{M}{2}\psi_x} \left(e^{j\frac{M}{2}\psi_x} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_x} \right)}{e^{j\frac{M}{2}\psi_x} \left(e^{j\frac{\psi_x}{2}\psi_x} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_x} \right)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore AF = e^{j\frac{(M-1)\psi_x}{2}} \left[\frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right] \quad (2.217)$$

เมื่อ M คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x แต่โดยทั่วไปแล้วเราจะกำหนดจุดอ้างอิงไว้ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดในแถวลำดับ จากกรณีของแถวลำดับในแกน x จะพบว่า ไม่ว่าจะมียจำนวนสายอากาศเป็นจำนวนคี่หรือจำนวนคู่ในแถวลำดับ ก็จะได้ค่าอาร์เรย์แฟคเตอร์เหมือนกันได้ว่า

$$AF_x \left(e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}} \right) = e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}}$$

$$AF_x = \frac{e^{j\frac{M}{2}\psi_x} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_x}}{e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}}}$$

$$AF_x = \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \quad (2.218)$$

เมื่อ M คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงลำดับในแนวแกน x

2.5.6.2 กรณีวงองค์ประกอบตามแกน y ทั้งหมด N องค์ประกอบ

จากสมการที่ (2.212)

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

เมื่อ $\cos(\gamma) = a_y a_r$

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

ถ้าให้ a_n มีค่าเท่ากับ 1 ในสายอากาศทุก ๆ องค์ประกอบ ได้ว่า

$$AF_y = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \sin(\theta)\sin(\phi) + \beta)} \quad (2.219)$$

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

$$AF_y = \frac{e^{jN\psi_y} - 1}{e^{j\psi_y} - 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\therefore AF = e^{j\frac{(n-1)}{2}\psi_y} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right] \quad (2.220)$$

เมื่อ N คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y
 เมื่อกำหนดจุดอ้างอิงไว้ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศทุกองค์ประกอบในแถวลำดับ จะได้ว่า

$$AF_{y1} \left(e^{j\frac{\psi_y}{2}} - e^{-j\frac{\psi_y}{2}} \right) = e^{j\frac{N}{2}\psi_y} - e^{-j\frac{N}{2}\psi_y} \quad (2.221)$$

2.5.6.3 เมื่อมีการจัดเรียงองค์ประกอบกันบนแกน z ทั้งหมด N องค์ประกอบ

จากสมการที่ (2.212)

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

สามารถหา γ ได้จาก การคูณแบบจุด (Dot Product) ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) ในทิศทางของจุดสังเกต สามารถแสดงได้ดังนี้: $\cos(\gamma) = \underline{a}_z \cdot \underline{a}_r$

$$\underline{a}_z \cdot \underline{a}_r = |\underline{a}_z| |\underline{a}_r| \cos(\gamma) = \cos(\gamma)$$

$$\therefore \cos(\gamma) = \underline{a}_z \cdot \underline{a}_r$$

$$= \underline{a}_z \cdot \{a_x \sin(\theta) \cos(\phi) + a_y \sin(\theta) \sin(\phi) + a_z \cos(\theta)\}$$

$$= \cos(\theta)$$

$$\therefore \gamma = \theta$$

ได้ว่า

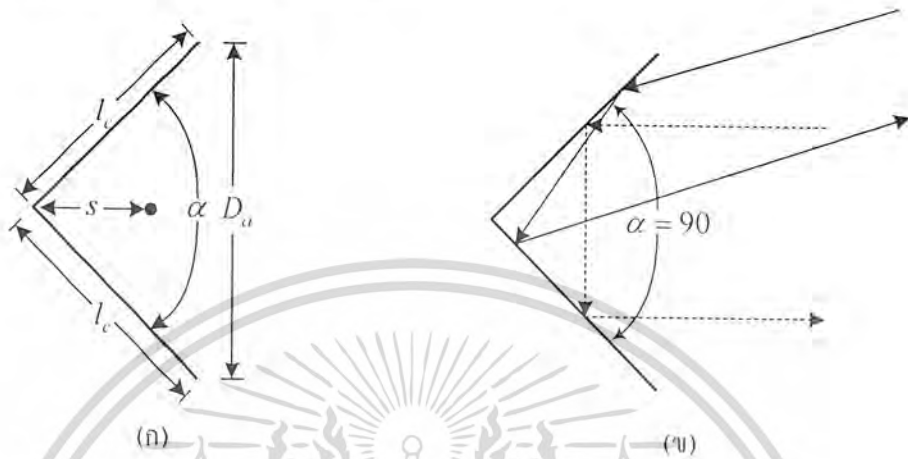
$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(n-1)(kd \cos(\theta) + \beta)} \quad (2.222)$$

ถ้าให้ a_n มีค่าเท่ากับ 1 ในสายอากาศทุก ๆ องค์ประกอบ จะพบว่าอาร์เรย์แฟกเตอร์ที่ได้ เหมือนกับสมการที่เป็นอาร์เรย์แฟกเตอร์ของสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบ ที่วางองค์ประกอบตาม แกน z ดังนั้นเราจะใช้อาร์เรย์แฟกเตอร์รูปแบบนี้ในการหาอาร์เรย์แฟกเตอร์ของสายอากาศที่วาง องค์ประกอบตามแกน x และ y ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.7 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม (Corner Reflector)

โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมจะประกอบด้วยแผ่นสะท้อน 2 แผ่น ทำมุมกันดังรูปที่ 2.19 (ก) ซึ่งโครงสร้างของตัวสะท้อนแบบมุมจะทำได้ง่าย ซึ่งสัญญาณจะย้อนกลับในทิศทางเดิมที่รับเข้ามา ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.19(ข) คือมุม 90 องศา



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม

โดยในทางปฏิบัติตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่นิยมเลือกใช้คือ แผ่นสะท้อน 2 แผ่น ทำมุมกัน 90 องศา แต่ก็ยังมีบางงานที่ใช้มุมอื่นๆ โดยประสิทธิภาพของระบบที่ได้จะดูได้จาก ที่ระยะห่างระหว่างจุดยอดมุมกับตัวป้อนสัญญาณ โดยที่ระยะห่างจะเพิ่มขึ้นถ้ามุมของตัวสะท้อนลดลง สำหรับตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์ อัตราขยาย (Gain) จะเพิ่มขึ้น เมื่อมุมระหว่างแผ่นระนาบลดลง อย่างไรก็ตามอาจไม่เป็นจริงหากขนาดของแผ่นเพลท (Plate) มีขนาดจำกัด ดังนั้นเพื่อให้ง่ายในการพิจารณาจะให้ให้แผ่นเพลท (Plate) มีขนาดอนันต์ ($l_c = \infty$) แต่ในทางปฏิบัติจะมีค่าจำกัด ความยาว (l_c) และความสูง (h)

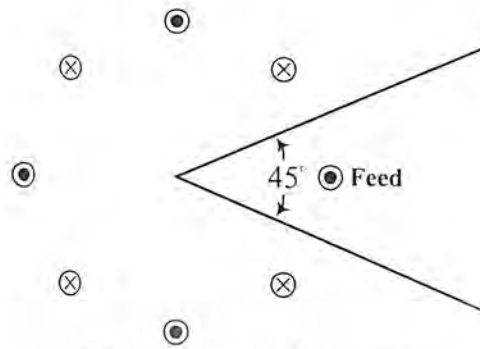
โดยให้ขนาดความกว้างที่ยาวที่สุดของตัวสะท้อนที่ทำมุม (D_a) จะมีค่าเท่ากับ $\lambda < D_a < 2\lambda$ และความยาวของตัวสะท้อนจะมีค่าที่ต่างกันขึ้นกับขนาดของมุมเช่น มุม 90 จะมีความยาวเท่ากับ $l_c = 2s$ ระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณกับจุดยอดของมุม (s) ปกติจะให้ค่าระหว่าง $\frac{\lambda}{3} < s < \frac{2\lambda}{3}$ และความสูงของตัวสะท้อนปกติจะใช้ประมาณ 1.2-1.5 เท่าของความยาวทั้งหมดของตัวป้อนสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดการแพร่กระจายจากด้านหลัง ในการทดลองหากเราเพิ่มขนาดของด้านข้างก็ไม่ได้มีผลต่อความกว้างลำคลื่นและค่าสภาพเจาะจงทิศทาง แต่มันจะเพิ่มแบนวิดท์ (Bandwidth) และความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Resistance) และจะเห็นว่าขนาดของลำคลื่นหลักจากการที่มีขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดจำกัดจะกว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์

เมื่อทำการพิจารณาขนาดมุมของตัวสะท้อน ขนาดของมุมที่จะเกิดขึ้นได้จะมีค่าเท่ากับ $\alpha = \frac{180^\circ}{n}$

เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม ดังนั้นจึงพิจารณาที่มุม $\alpha = 45^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ องศา โดยพิจารณาคูณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Characteristics) ได้ดังหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.7.1 กรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นทำมุมกัน 45 องศา ($\alpha = 45^\circ$)



รูปที่ 2.14 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 45°

จากรูปที่ 2.22 สมการของสนามที่แพร่กระจายออกมาสามารถเขียนได้โดยการรวมสมการของตัวป้อนสัญญาณ และสมการของภาพเสมือน ได้ดังนี้คือ

$$E(r, \theta, \phi) = E_1(r_1, \theta, \phi) + E_2(r_2, \theta, \phi) + E_3(r_3, \theta, \phi) + E_4(r_4, \theta, \phi) \\ + E_5(r_5, \theta, \phi) + E_6(r_6, \theta, \phi) + E_7(r_7, \theta, \phi) + E_8(r_8, \theta, \phi)$$

ที่สนามระยะไกลสามารถนิรมิตโลซ์ สมการได้ดังนี้

$$E(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_3}}{r_3} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} \\ + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_5}}{r_5} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_6}}{r_6} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_7}}{r_7} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_8}}{r_8} \\ E(r, \theta, \phi) = \left[e^{+jkx \cos \psi_1} - e^{+jkx \cos \psi_2} + e^{+jkx \cos \psi_3} - e^{+jkx \cos \psi_4} \right. \\ \left. + e^{+jkx \cos \psi_5} - e^{+jkx \cos \psi_6} + e^{+jkx \cos \psi_7} - e^{+jkx \cos \psi_8} \right] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.223)$$

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

โดย $\cos \psi_1 = \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \cos \phi$

$$\cos \psi_2 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_x + \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \cos \phi + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_3 = \hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_4 = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_x + \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \cos \phi + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_5 = -\hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = -\sin \theta \cos \phi$$

$$\cos \psi_6 = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_x - \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \cos \phi - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_7 = -\hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = -\sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_8 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_x - \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{a}_y \right) \cdot \hat{a}_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \cos \phi - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta \sin \phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ (2.223) จะได้

$$E(r, \theta, \phi) = 2 \left[\cos(X) + \cos(Y) - 2 \cos\left(\frac{X}{\sqrt{2}}\right) \cos\left(\frac{Y}{\sqrt{2}}\right) \right] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

โดยที่ในสนามอิสระมีการแพร่กระจายคลื่นคือ

$$E_0 = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ดังนี้

$$\frac{E}{E_0} = AF(\theta, \phi) = 2 \left[\cos(X) + \cos(Y) - 2 \cos\left(\frac{X}{\sqrt{2}}\right) \cos\left(\frac{Y}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (2.224)$$

โดยกำหนดให้ $AF(\theta, \phi)$ คือ ตัวประกอบแอมพลิจูด

$$X = ks \sin \theta \cos \phi$$

$$Y = ks \sin \theta \sin \phi$$

2.5.7.2 กรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นทำมุมกัน 90 องศา ($\alpha = 90^\circ$)



รูปที่ 2.15 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90°

จากรูปที่ 2.21(ก) แสดงการสะท้อนไปยังที่ตัวสะท้อนและรูปที่ 2.21(ข) แสดงภาพเสมือนของตัวป้อนสัญญาณ สมการของสนามที่แพร่กระจายออกมาสามารถเขียนได้โดยการรวมสมการของตัวป้อนสัญญาณ และสมการของภาพเสมือน ได้ดังนี้คือ

$$E(r, \theta, \phi) = E_1(r_1, \theta, \phi) + E_2(r_2, \theta, \phi) + E_3(r_3, \theta, \phi) + E_4(r_4, \theta, \phi)$$

ที่สนามระยะไกลสามารถนอร์มัลไลซ์ สมการได้ดังนี้

$$E(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_3}}{r_3} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_4}}{r_4}$$

$$E(r, \theta, \phi) = \left[e^{+jkx \cos \psi_1} - e^{+jkx \cos \psi_2} + e^{+jkx \cos \psi_3} - e^{+jkx \cos \psi_4} \right] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.225)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดย $\cos \psi_1 = \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \cos \phi$

$$\cos \psi_2 = \hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_3 = -\hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = -\sin \theta \cos \phi$$

$$\cos \psi_4 = -\hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = -\sin \theta \sin \phi$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ (2.225) จะได้

$$E(r, \theta, \phi) = 2 \left[\cos(ks \sin \theta \cos \phi) - \cos(ks \sin \theta \sin \phi) \right] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

โดยที่ในสนามอิสระมีการแพร่กระจายคลื่นคือ

$$E_0 = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ดังนี้

$$\frac{E}{E_0} = AF(\theta, \phi) = 2 \left[\cos(ks \sin \theta \cos \phi) - \cos(ks \sin \theta \sin \phi) \right] \quad (2.226)$$

2.5.7.1 กรณีที่ตัวสะท้อนกลับทำมุมกัน 180 องศา ($\alpha = 180^\circ$)



รูปที่ 2.16 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 180°

จากรูปที่ 2.20 สมการของสนามที่แพร่กระจายออกมาสามารถเขียนได้โดยการรวมสมการของตัวป้อนสัญญาณ (Feed) และสมการของภาพเสมือน (Image) ได้ดังนี้คือ

$$E(r, \theta, \phi) = E_1(r_1, \theta, \phi) + E_2(r_2, \theta, \phi)$$

ที่สนามระยะไกลสามารถนอร์มัลไลซ์ สมการได้ดังนี้

$$E(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2}$$

$$E(r, \theta, \phi) = \left[e^{+jkx \cos \psi_1} - e^{+jkx \cos \psi_2} \right] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.227)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ} \quad \hat{a}_r = \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta$$

$$\text{โดย} \quad \cos \psi_1 = \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \cos \phi$$

$$\text{และ} \quad \cos \psi_2 = -\hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = -\sin \theta \sin \phi$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ (2.227) จะได้

$$E(r, \theta, \phi) = 2j [\sin(ks \sin \theta \cos \phi)] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

โดยที่ในสนามอิสระมีการแพร่กระจายคลื่นคือ

$$E_0 = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ดังนี้

$$\frac{E}{E_0} = AF(\theta, \phi) = 2j [\sin(ks \sin \theta \cos \phi)] \quad (2.228)$$

2.6 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ NEC2 [11] เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการแห่งชาติลอเรนซ์ลิเวอร์มอร์ ประเทศสหรัฐอเมริกา และเป็นโปรแกรมประเภทฟรีแวร์ (Freeware) ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลด (Download) มาใช้งานได้ง่าย การจะสั่งให้โปรแกรมทำงานนั้น ผู้ใช้จะต้องจัดเรียงรหัสทางคอมพิวเตอร์ให้กับโปรแกรม เพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศและโครงสร้างที่เป็นโลหะใด ๆ ที่มีรูปร่างไม่เจาะจง รหัสทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมที่ผู้ใช้จะต้องใส่ไปนั้น คือการสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นลวดเล็ก ๆ หรือผิวจำนวนมาก ซึ่งในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยเส้นลวด โปรแกรมจะทำการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า ในการหากระแสเหนี่ยวนำบนโครงสร้างนั้นซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดหรือสนามที่ตกกระทบ และในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยพื้นผิว โปรแกรมจะถูกอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ การกระตุ่นสามารถที่จะเป็นไปได้ ทั้งแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป หรือคลื่นระนาบที่ตกกระทบ NEC2 สามารถใช้ในการคำนวณหากระแสเหนี่ยวนำและประจุสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กกระยะใกล้และไกล ภาคตัดขวางเป็ารเรดาร์ (Radar Cross Section : RCS)

อิมพีแดนซ์ แอดมิแตนซ์ อัตราการขยาย และสภาพเจาะจงทิศทาง การใช้พลังงาน และการเชื่อมต่อนะหว่างสายอากาศ

สำหรับสายอากาศที่นำเสนอในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของสายอากาศ โดยแทนโครงสร้างของสายอากาศด้วยโครงสร้างเส้นลวดขนาดเล็กดังนั้นสมการที่ใช้จึงเป็นสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งสมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้านี้เหมาะสำหรับนำมาแก้ปัญหาโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก มีพื้นผิวที่ไม่หนามาก และไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำปิดที่มากกว่าการใช้สนามอินทิกรัลเชิงแม่เหล็ก ซึ่งมีรูปแบบในหัวข้อต่อไป

2.6.1 การอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าในอวกาศว่าง

รูปแบบการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่ใช้ NEC2 สำหรับสนามไฟฟ้าของการกระจายกระแส \vec{J}

คือ

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_V \vec{J}(\vec{r}') \cdot \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') dV' \quad (2.229)$$

เมื่อ

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

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

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

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

และแบบแผนทางเวลา คือเอกลักษณ์ \vec{I} (Identity Dyad) $\hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y} + \hat{z}\hat{z}$ เมื่อการกระจายกระแสถูกจำกัดให้อยู่บริเวณผิวของตัวนำที่มีค่าสมบรูณ์สมการที่ (2.235) กลายเป็น

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_S \vec{J}_s(\vec{r}') \cdot \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') dA' \quad (2.230)$$

เมื่อ \vec{J}_s เป็นความหนาแน่นกระแสพื้นผิว

ถ้า r' เข้าใกล้ S ในลักษณะคล้ายลิมิต สมการที่ (2.236) จะเป็น

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \oint_S \vec{J}_s(\vec{r}') \cdot \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') dA' \quad (2.231)$$

เมื่ออินทิกรัลหลัก \int ถูกใช้เพราะว่า $g(\vec{r}, \vec{r}')$ ไม่จำกัดขอบเขต

สมการการอินทิกรัลของกระแสเหนี่ยวนำบน S โดยสนามตกกระทบ \vec{E}' สามารถหาได้จากสมการที่ (2.231) และเงื่อนไขขอบเขตสำหรับ \vec{r} ที่แปรผันตาม

$$\hat{n}(\vec{r}) \times [\vec{E}'(\vec{r}) + \vec{E}(\vec{r})] = 0 \quad (2.232)$$

เมื่อ $\hat{n}(\vec{r})$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับผิวที่ \vec{r} และ \vec{E}' เป็นสนามเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำ \vec{J}_s เมื่อแทนค่า \vec{E}' ในสมการที่ (2.230) ด้วยสมการที่ (2.231) สามารถเขียนสมการที่ (2.232) ได้เป็น

$$\hat{n}(\vec{r}) \times \vec{E}(\vec{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \oint_S \vec{J}_s(\vec{r}') \cdot (k^2 \vec{I} + \nabla \nabla) g(\vec{r}, \vec{r}') dA' \quad (2.233)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการอินทิกรัลเวกเตอร์ในสมการที่ (2.233) สามารถถูกลดให้เป็นสมการอินทิกรัลเชิงสเกลาร์เมื่อพื้นผิวดำนำ S ถูกแทนด้วยเส้นลวดทรงกระบอกบาง ๆ ซึ่งจะทำให้วิธีแก้ปัญหายากมากขึ้น การประยุกต์ที่ใช้กันลวดบาง เรียกว่า วิธีการประมาณเส้นลวดบาง (Thin-Wire Approximation) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. กระแสตามขวางที่สำคัญกับกระแสตามแกน ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
2. การเปลี่ยนแปลงโดยรอบในแกนกระแสตามแกน ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
3. กระแสสามารถแทนด้วยกระแสเชิงเส้นบนแกนเส้นลวด
4. เงื่อนไขสนามไฟฟ้าจะถูกบังคับให้มีเฉพาะในทิศทางตามแนวแกนเท่านั้น

การประมาณนี้สามารถนำมาใช้เมื่อ รัศมีของเส้นลวดมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่น และความยาวเส้นลวดมีค่ามาก ๆ

2.6.2 วิธีแก้ปัญหายิงเลขในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

ใน NEC2 ฟังก์ชันฐานและฟังก์ชันให้น้ำหนักจะแตกต่างกัน ฟังก์ชันให้น้ำหนัก จะเป็นฟังก์ชันเดลตา (Delta Function) มีรูปแบบคือ

$$w_j(\vec{r}) = \delta(\vec{r} - \vec{r}_j) \quad (2.234)$$

เมื่อ $\{r_j\}$ เป็นเซตของจุดบนผิวดำนำผลลัพธ์ที่เป็นจุดการซิกตัวอย่าง (Sampling) ของสมการอินทิกรัลรู้จักกันในชื่อ วิธีวางร่วมตำแหน่ง (Collocation Method) ของการแก้ปัญหาลวดจะถูกแบ่งเป็นเซกเมนต์ (Segment) เส้นตรงสั้น ๆ ที่มีจุดซิกตัวอย่างอยู่ตรงกลางของเซกเมนต์ ฟังก์ชันฐานหรือฟังก์ชันของกระแสแต่ละเซกเมนต์อยู่ในผลรวมของ 3 องค์ประกอบ คือค่าคงที่ ค่าไซน์และค่าโคไซน์ ซึ่งการเลือกกระแสแบบนี้จะทำให้การแก้ปัญหายิงเลขเร็วขึ้น และกระแสไซน์ชอยด์ยังสามารถวิเคราะห์ได้ง่ายในรูปแบบสำเร็จ (Closed Form) แอมพลิจูดของค่าคงที่ ค่าไซน์และโคไซน์ จะมีความเกี่ยวข้องกับผลรวมของแอมพลิจูดชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะต้องเหมาะสมกับเงื่อนไขทางกายภาพของกระแส และประจุที่ปลายเซกเมนต์ การแมตซ์ที่ปลายเซกเมนต์ จะช่วยปรับปรุงวิธีแก้ปัญหาคิดแม่นยำขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่จุดต่อที่มีความยาวแต่ละเซกเมนต์ไม่เท่ากัน

กระแสทั้งหมดบนเซกเมนต์หมายเลข j ใน NEC2 รูปแบบคือ

$$I_j = A_j + B_j \sin k(s - s_j) + C_j \cos k(s - s_j) \quad (2.235)$$

$$|s - s_j| < \frac{\Delta_j}{2}$$

เมื่อ s_j เป็นค่าคงที่ของ ที่ตรงกลางเซกเมนต์ j และ Δ_j เป็นความยาวของเซกเมนต์ j ตัวแปร A_j , B_j และ C_j คือขนาดของแอมพลิจูดของฟังก์ชันค่าคงที่ ไซน์และโคไซน์ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป ในบทนี้ได้อธิบายเกี่ยวกับ ทฤษฎีและหลักการ พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ โครงสร้างของสายอากาศชนิดวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ ระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี สมการคลื่นในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรี และได้แสดงวิธีหาผลเฉลยของสนามโดยวิธีฟังก์ชันเวกเตอร์ อินทิกรัลการแพร่กระจายคลื่นและฟังก์ชันช่วย ตัวประกอบแอมพลิจูด ซึ่งมีการจัดเรียงแอมพลิจูดเชิงเส้นแบบต่างๆ และสายอากาศที่วางบนตัวสะท้อนเชิงมุม โดยทำมุมกับแผ่นระนาบสามมุมคือ 45 90 และ 45 องศา นอกจากนั้นยังทำการศึกษา โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

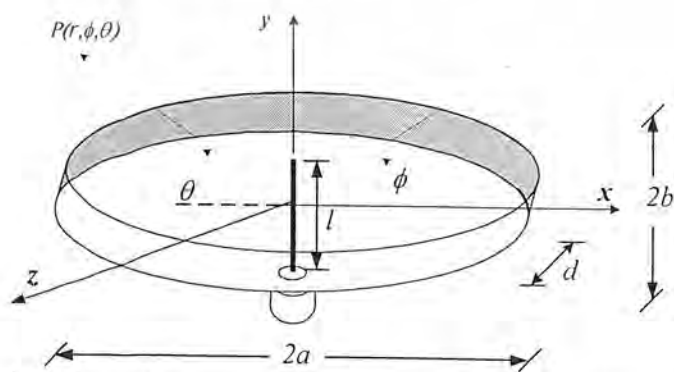
บทที่ 3

การวิเคราะห์ ก้านฉนวน และออกแบบ

3.1 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ

การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่มีลักษณะช่องเปิดวงรี จะพิจารณาความสัมพันธ์กับความยาวแกนหลัก และความยาวแกนรอง ของสายอากาศที่ทำให้คลื่นที่ออกจากตัวสายอากาศเพื่อให้เกิดคลื่นโหมดหลัก (Dominant Mode) ของคลื่นเท่านั้นที่สามารถเดินทางไปได้ และความยาวของตัววงแหวนวงรี โดยค่าดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดแบบรูปของคลื่นที่ออกมาจากสายอากาศและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของตัวสายอากาศ ซึ่งถือเป็นการวัดที่มีความสำคัญมากที่จะต้องพิจารณาก่อนเป็นอันดับแรกสิ่งต่อไปนี้จะต้องพิจารณาคือ ความยาวของโพรบที่ใช้กับตัวสายอากาศ โดยจะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ (Impedance) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio) ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) และค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth) ของสายอากาศ เมื่อได้แบบรูปที่แน่นอนสำหรับตัวสายอากาศแล้ว ก็จะนำมาจัดเรียงองค์ประกอบแบบสายเป็นแบบแถวลำดับเชิงเส้นเพื่อเพิ่มค่าการชี้ทิศทางและอัตราการขยายของสายอากาศให้สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้คลื่นสามารถถูกส่งออกไปได้มากขึ้น ในบทนี้กล่าวถึงการนำสมการสนามไฟฟ้าระยะไกลที่ได้จากบทที่ 2 มาคำนวณคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์คือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างในการศึกษาสายอากาศวงแหวนแบบวงรีกระตุ้นโดยโพรบนี้ จำเป็นจะต้องอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรีเนื่องจากวงแหวนวงรีสามารถกำหนดขนาดวงแหวนด้วยพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ความยาวแกนหลักและความยาวแกนรอง เพื่อใช้ควบคุมลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เมื่อนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเมื่อจัดเรียงตามแนวแกน x ตามแนวแกน y ตามแนวแกน z และเมื่อนำสายอากาศที่มีโครงสร้างวางบนตัวสะท้อนคลื่นในลักษณะเดียวกัน

3.1.1 โครงสร้างของสายอากาศ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การพิจารณา ความสัมพันธ์แกนหลัก แกนรอง และความยาววงแหวนวงรี

การพิจารณาถึงค่าพารามิเตอร์จะพิจารณาถึง ความสัมพันธ์กับความยาวแกนหลัก และความยาวแกนรอง ของสายอากาศที่ทำให้คลื่นที่ออกจากตัวสายอากาศเพื่อให้เกิดคลื่น โหมดหลัก (Dominant Mode) ของคลื่นเท่านั้นที่สามารถเดินทางไปได้ ซึ่งกรณีของตัวสายอากาศแบบวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ โดยที่ความยาวครึ่งแกนหลัก (a) และความยาวครึ่งแกนรอง (b) จะต้องมีค่าที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถส่งผ่านคลื่นในโหมดหลักได้

โดยที่ c คือ ความยาวครึ่งโฟกัสของวงรี ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความยาวครึ่งแกนหลัก (a) และความยาวครึ่งแกนรอง (b) คือ

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3.1)$$

การคำนวณพิกัดตรงกระบอกวงรีเพื่อความสะดวกจะกำหนดพารามิเตอร์ Eccentricity (e) เพื่อแสดงคุณสมบัติของวงรี โดย e มีสมการคือ

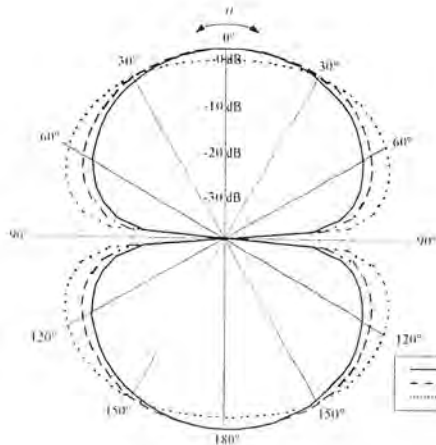
$$e = \frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (3.2)$$

เมื่อ AR คือ อัตราส่วนแกน (Axial Ratio) ได้จากอัตราส่วนของความยาวแกนหลักต่อความยาวแกนรอง

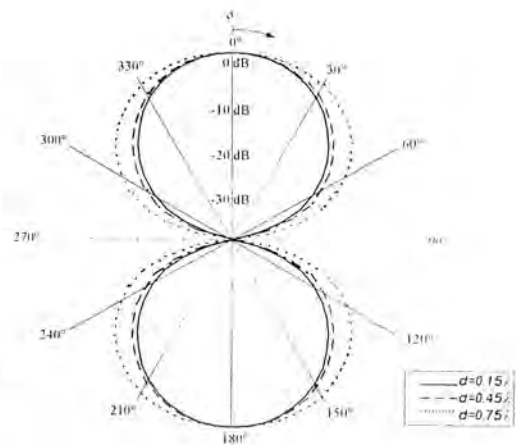
ความยาววงแหวนวงรี L จะพิจารณาจากรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง

3.1.3 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

การวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเป็นแบบสองทิศทางสามารถวิเคราะห์ คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนระหว่างลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดของสายอากาศ ซึ่งในการพิจารณาคณะลักษณะทั้งหมดนี้ โดยจะขึ้นอยู่กับค่าความสัมพันธ์แกนหลัก แกนรอง และ ความยาววงแหวนวงรีสายอากาศชนิดนี้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง เมื่อทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศของวงแหวนเท่ากับ 0.15λ จะพบว่าที่ความยาวของวงแหวน 0.15λ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีความกว้างของลำคลื่นแคบกว่าวงแหวนวงรีที่มีความยาว 0.45λ และ 0.75λ ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่แคบนี้จะให้ค่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า



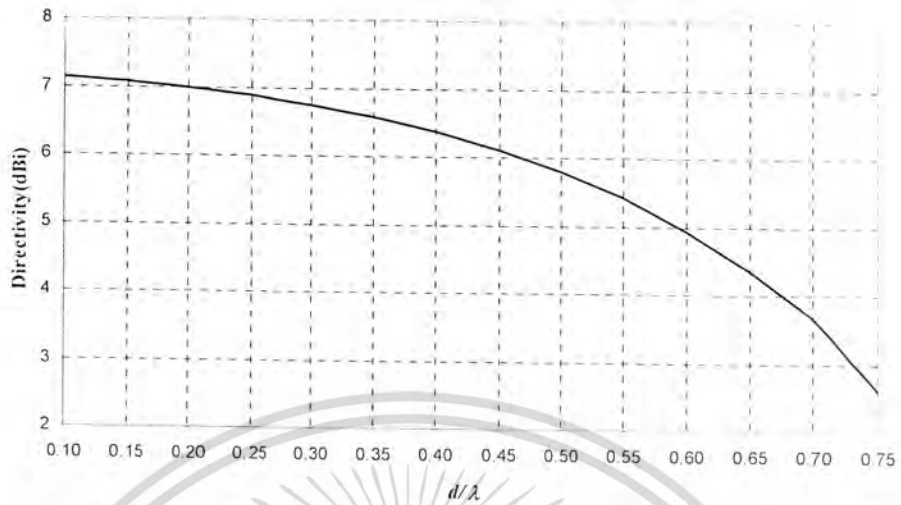
(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ
ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีขนาดความยาวของวงแหวนไม่เท่ากันดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะพบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่นมากกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็ก และเมื่อความยาวของตัวสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น

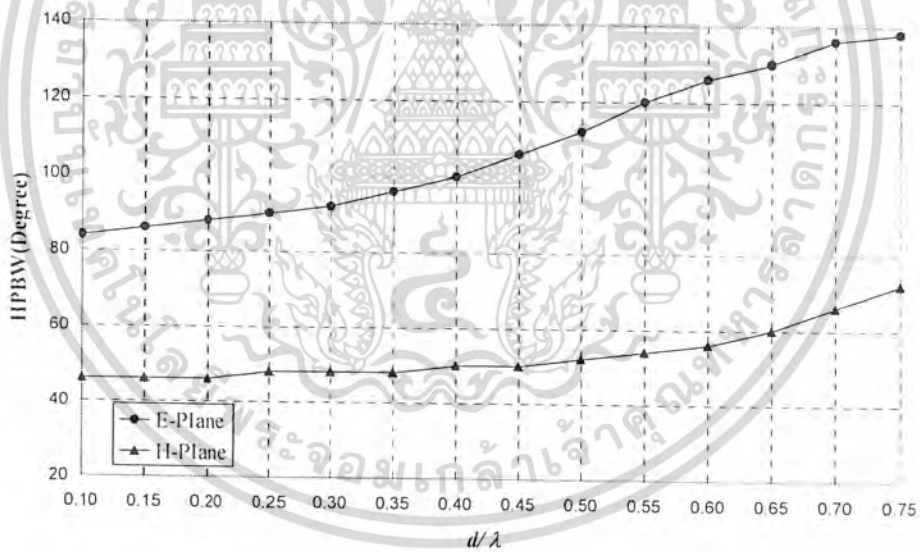
3.1.4 การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางเป็นการพิจารณาว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆ น้อยแค่ไหน ซึ่งวัดในหน่วยของ dB_i สายอากาศที่สร้างขึ้นมาผู้สร้างต้องการให้มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงจึงเป็นเหตุผลที่ต้องทำการวิเคราะห์หาค่าเจาะจงทิศทาง ค่าความยาวของวงแหวน (d) จะมีผลต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยค่าความกว้างลำคลื่นที่ก่าตั้งงานลดลงครึ่งหนึ่ง และสภาพเจาะจงทิศทางกรณีที่ d ยาวมากกว่า 0.15λ ค่าความกว้างลำคลื่นที่ก่าตั้งงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ได้ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก จะมีค่ากว้างขึ้นเมื่อ d ยาวมากขึ้น ทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางลดลง และสำหรับกรณี d ยาวน้อยกว่า 0.15λ เนื่องจากเป็นความยาวที่สั้นเกินไป ทำให้สนามบริเวณใกล้กับโพรบไม่สามารถเกิดคลื่นโหมดหลักภายในวงแหวนได้ ดังนั้นค่าความยาวของวงแหวนวงรีที่เหมาะสมคือ $d = 0.15\lambda$ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมจะพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ

3.1.5 การพิจารณาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth)



รูปที่ 3.4 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

ค่าความยาวที่เหมาะสมของวงแหวนวงรีที่เหมาะสมคือ $d = 0.15\lambda$ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่จะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าสูงที่สุดโดยค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง ดังรูปที่ 3.4 กรณีที่ d ยาวมากกว่า 0.15λ ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ได้ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก จะมีค่ากว้างขึ้นเมื่อ d ยาวมากขึ้น ทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางทำให้ลำคลื่นออกจากสายอากาศเป็นแบบรูปคลื่นหลักนั้นมีค่าเท่ากับ 0.15λ แต่ต้องมาพิจารณาที่ค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์อื่นร่วมด้วย ซึ่งในกรณีของวงแหวนวงรี เมื่อระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากโพรบมีค่ามากขึ้น ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีขนาดความยาวของวงแหวนไม่เท่ากันดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะพบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่นมากกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็ก และเมื่อความยาวของตัวสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะเกิดค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อ ลำคลื่นย่อยด้านข้างขึ้น

3.1.6 การพิจารณาค่าความยาวโพรบ

ค่าความยาวของโพรบที่ได้ทำการวิเคราะห์กับเครื่องวิเคราะห์ระบบโครงข่าย (Network Analyzer) จะพบว่า ตัวป้อนสัญญาณแบบวงแหวนวงรีมีค่าความยาวโพรบที่เหมาะสมและความยาวที่ได้ ออกแบบไว้มีค่าประมาณ 3.9 cm (0.25λ) ซึ่งการพิจารณาค่าความยาวโพรบนั้น จะต้องทำให้เข้าใกล้การเกิดรีโซแนนซ์ (Resonance) ให้มากที่สุดเพื่อให้คลื่นที่ส่งออกไปมีพลังงานมากที่สุดก็จะทำให้สามารถส่งไปได้ไกลโดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับการเชื่อมต่อสายอากาศนั้นมีค่าเท่ากับ 50Ω เพื่อให้คลื่นที่ออกมาจากสายนำสัญญาณซึ่งมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω สามารถส่งผ่านสายอากาศออกไปได้อย่างสมบูรณ์จากนั้นก็จะต้องทำให้สายอากาศมีค่า VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ไม่ควรมีค่ามากกว่า 2 และค่าการสูญเสียของการสะท้อนกลับ (Return Loss) จะต้องมีย่านน้อยกว่า -9.54 dB ขึ้นไป ดังนั้นค่าความยาวโพรบที่ได้มานั้นก็ได้มาจากข้อกำหนดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ส่วนการคำนวณหาค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานนั้น ทำได้โดยการหาความถี่ที่สูงกว่าและต่ำกว่าความถี่กลางที่มีค่า VSWR เท่ากับ 2 จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาช่วงความถี่ที่ใช้งานได้

$$\Delta f(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100\% \quad (3.3)$$

ซึ่งค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานควรจะมีค่ามากกว่า 10% ขึ้นไป

3.2 การวิเคราะห์เมื่อนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับ (Array)

จากหลักการที่กล่าวมาในบทที่ 2 คือมีการจัดเรียงสายอากาศตามแกน x ตามแนวแกน y และตามแนวแกน z การวิเคราะห์ก็จะมีลักษณะเดียวกับสายอากาศตัวเดียว ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่บริเวณช่วงปากเปิดของสายอากาศเมื่อมีการวางสายอากาศในลักษณะต่างๆ การนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นเป็นเพิ่มขนาดของสายอากาศให้ใหญ่ขึ้นทำให้การเพิ่มคุณสมบัติของสายอากาศที่ดีขึ้นเช่นมีค่าแอมพลิจูดทิศทางที่แรงขึ้น มาอัตราขยายที่ดีขึ้น การวิเคราะห์จะทำกรวิเคราะห์ทั้ง 3 กรณี

โดยที่ทำการจัดรูปแบบที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ทั้ง 3 แบบที่ประกอบด้วย การจัดเรียงสายอากาศแถวลำดับในแกน x การจัดเรียงสายอากาศแถวลำดับในแกน y และการจัดเรียงสายอากาศแถวลำดับในแกน z ในหัวข้อถัดไปจะแสดงถึงคุณสมบัติของสายอากาศทั้ง 3 แบบ ซึ่งแสดงคุณสมบัติดังของพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยพิจารณาจาก แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

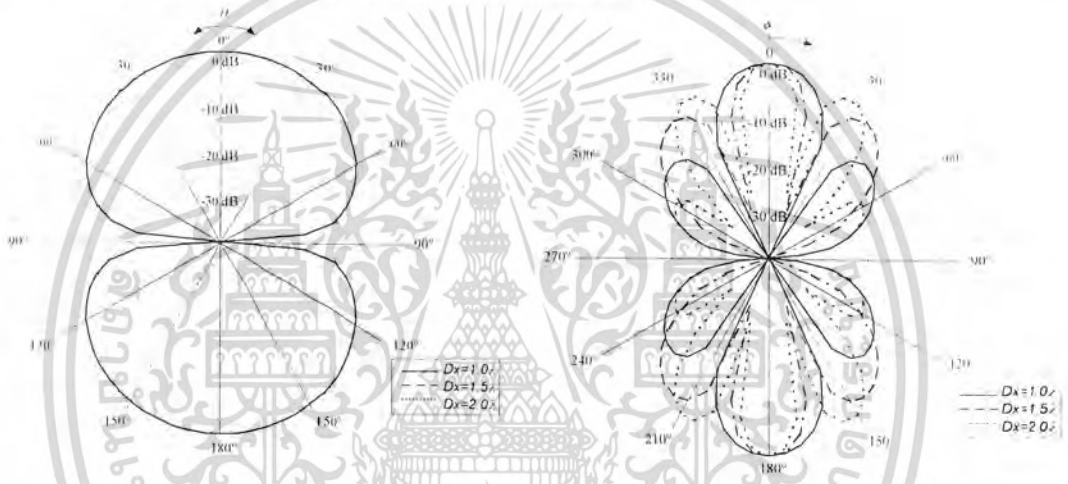
Power Beamwidth) การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beamwidth) การวิเคราะห์หาค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio)

3.2.1 การจัดเรียงตามแนวแกน x

เป็นการนำสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมาวางจัดเรียงตามแนวแกน x โดย D_x ก็คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบโดยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

3.2.1.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นคำบอกกล่าวสายอากาศมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นเป็นอย่างไร การวิเคราะห์ก็ทำการวิเคราะห์ที่เหมือนที่ผ่านมามีดังนี้



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

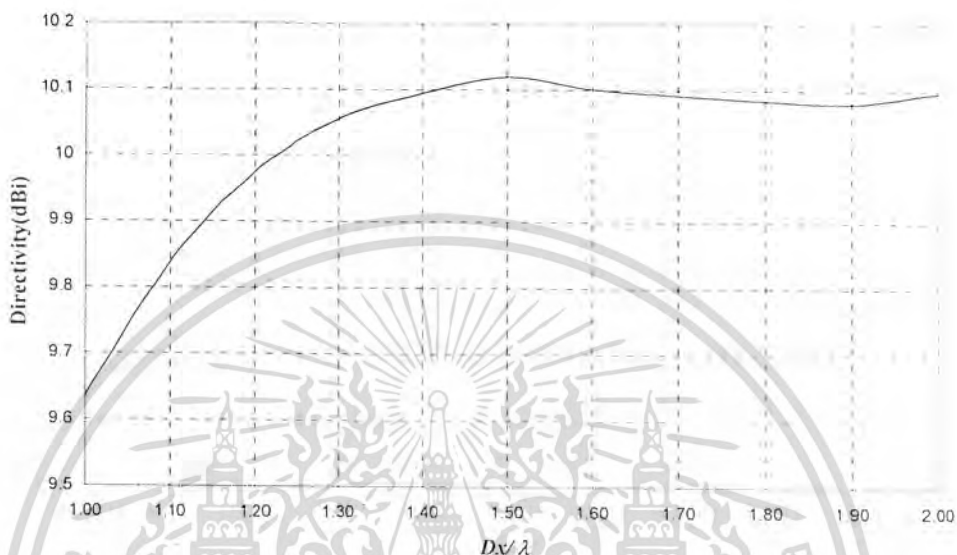
ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อนำสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมาจัดเรียงแบบเชิงเส้นตามแนวแกน x จะสรุปได้ว่าในระนาบสนามไฟฟ้าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความกว้างของลำคลื่นเมื่อระยะห่างของสายอากาศเพิ่มขึ้น ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็ก แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงของความกว้างของลำคลื่นคือ เมื่อจำนวนขององค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มจะทำให้ลำคลื่นหลักแคบลงและเกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างอีกด้วย ลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมีจำนวนมากขึ้นเมื่อองค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น

3.2.1.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นคล้ายกับการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสององค์ประกอบเดียวคือเป็นการพิจารณาว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆมากน้อยแค่ไหน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรจัดเรียงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแถวลำดับเชิงเส้นในขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศ ในที่นี้ กำหนดให้ ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบสายอากาศ คือ Dx จำนวนของสายอากาศที่นำมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นจำนวน 2 องค์ประกอบ การวิเคราะห์จะวิเคราะห์ค่าจะจงสภาพทิศทางที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ $1.0\lambda - 2.0\lambda$ และสามารถทำการเลือกระยะที่เหมาะสมที่มีค่าจะจงสภาพทิศทางสูง



รูปที่ 3.6 ค่าสภาพจะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรม
เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน x

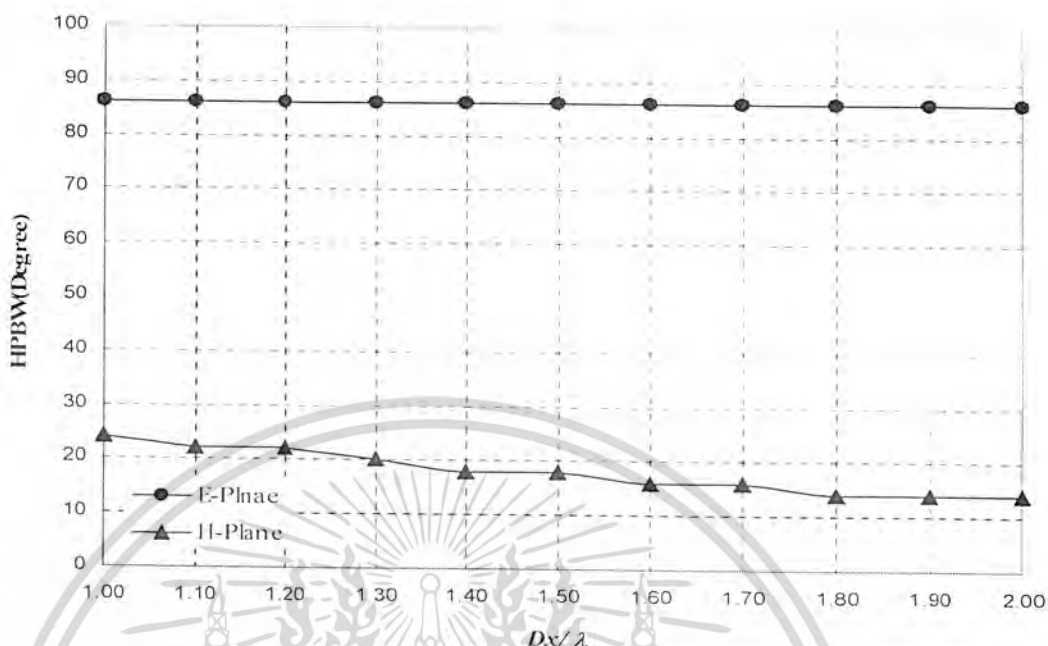
จากรูปของค่าสภาพจะจงทิศทางสรุปได้ว่าค่าสภาพจะจงทิศทางจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อ ระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงที่ระยะห่างเท่ากับ 1.5λ ซึ่งแนวโน้มของค่าจะจงสภาพทิศทางลดลง

การเลือกระยะห่างระหว่างสายอากาศ 1.5λ เพราะระยะห่างนี้จะทำให้ค่าจะจงสภาพทิศทางมีค่ามากที่สุด เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน x จำนวน 2 องค์ประกอบ

3.2.1.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth)

การวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอกวาลำคลื่นหลักแคบหรือกว้าง โดยการวิเคราะห์จะทำกรวิเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ โดยเริ่มตั้งแต่ $1.0\lambda - 2.0\lambda$ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งคือความต้องการที่จะนำสายอากาศไปใช้งานบริเวณใดๆ ต้องการลำคลื่นแคบหรือกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

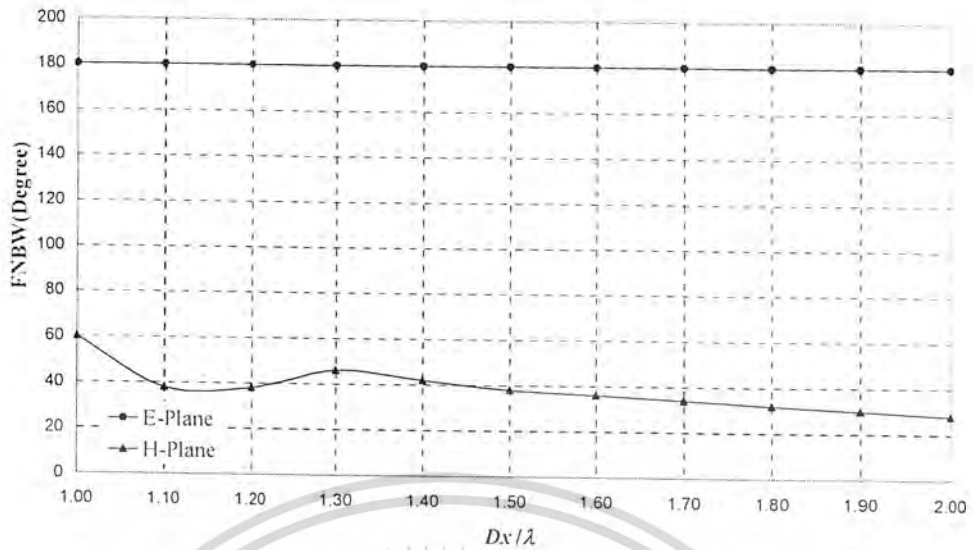


รูปที่ 3.7 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่ก้ำกึ่งลดลงมาครึ่งหนึ่ง
ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้วิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นจะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายของคลื่นที่ได้ทำการวิเคราะห์มาถึง แม้ว่าระยะห่างระหว่างสายอากาศจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ตรงกันข้ามที่ระนาบสนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่ก้ำกึ่งลดลงครึ่งหนึ่งมีค่าลดลงตามระยะห่างของสายอากาศที่ห่างมากขึ้น กล่าวคือลำคลื่นหลักจะแคบลงเมื่อระยะระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น

3.2.1.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่ก้ำกึ่งงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beamwidth)

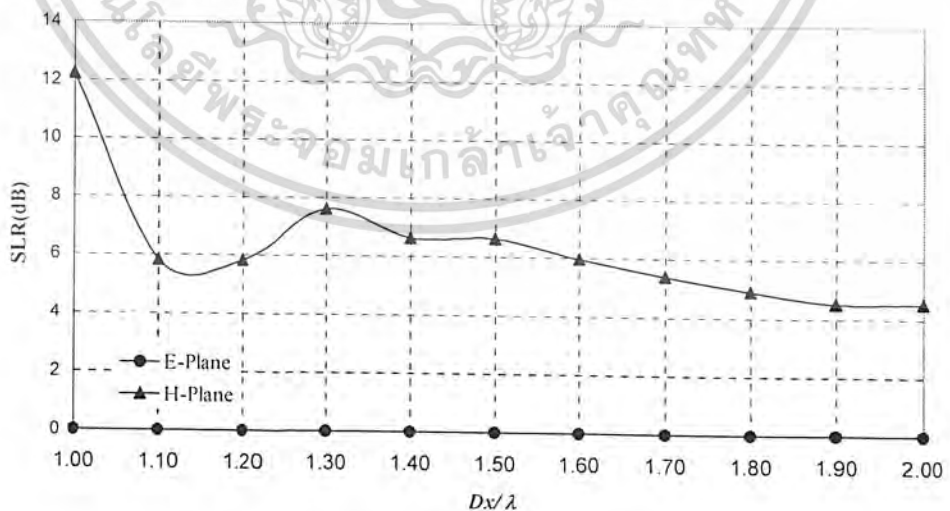
การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่ก้ำกึ่งงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกเป็นการวิเคราะห์ว่าเกิดลำคลื่นด้านข้างหรือไม่มากนักน้อยเพียงใด ในการออกแบบสายอากาศผู้สร้างไม่ต้องการที่จะให้เกิดลำคลื่นด้านข้าง เพราะลำคลื่นด้านข้างอาจรบกวนลำคลื่นหลักในการส่งรับส่งสัญญาณ



รูปที่ 3.8 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก
ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ทำการวิเคราะห์จะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือไม่มีลำคลื่นด้านข้าง และในทางกลับกันที่สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นมีค่าน้อยลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่ามากก็จะเกิดลำคลื่นด้านข้างแต่ก็ยังน้อยแต่กรณีที่ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่าน้อยจะทำให้เกิดลำคลื่นด้านข้างมาก

3.2.1.5 การวิเคราะห์ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio)



รูปที่ 3.9 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง
ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

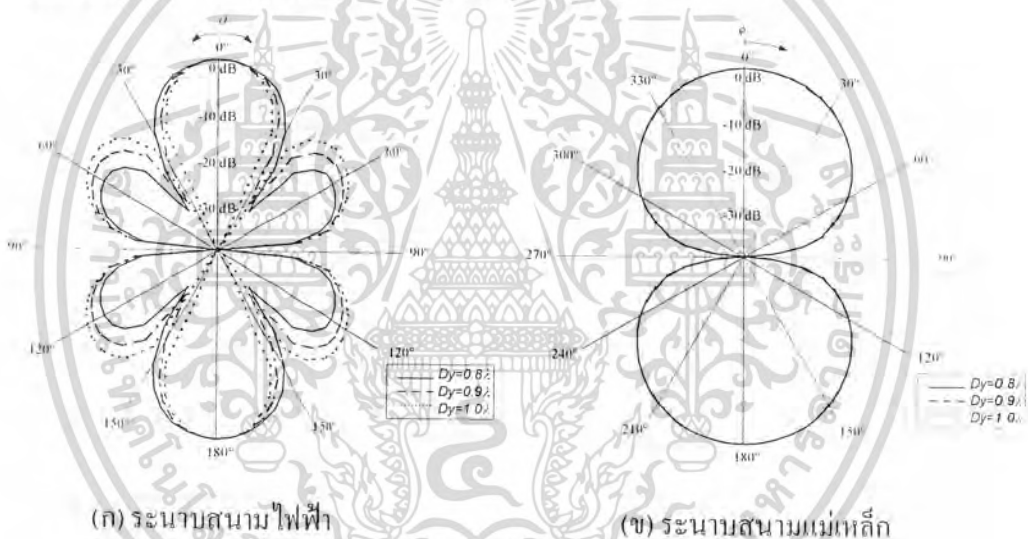
จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่เฉพาะที่ระนาบแม่เหล็กโดยค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่า ถ้าค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างมีค่ามากแสดงว่าเกิดลำคลื่นด้านข้างน้อย และค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านข้างมีค่าน้อยกล่าวคือแสดงว่ามีลำคลื่นด้านเกิดขึ้นใกล้เคียงกับลำคลื่นหลัก

3.2.2 การจัดเรียงตามแนวแกน y

เป็นการนำสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมาวางจัดเรียงตามแนวแกน y โดย D_y คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ โดยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

3.2.2.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นตัวบอกว่าสายอากาศชนิดทิศทางการแพร่กระจายคลื่นเป็นอย่างไร การวิเคราะห์ก็ทำการวิเคราะห์เหมือนที่ผ่านมามีดังนี้



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

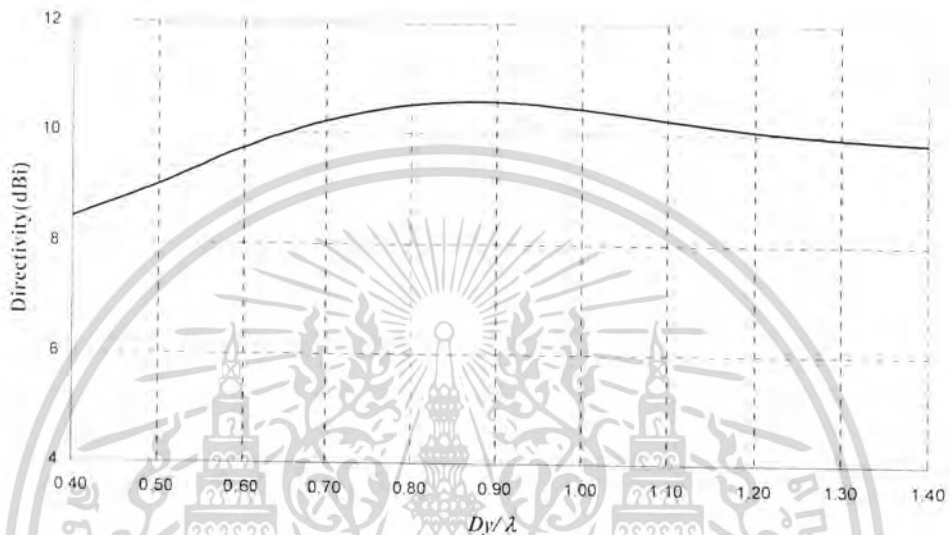
จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อนำสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมาจัดเรียงแบบเชิงเส้นตามแนวแกน y จะสรุปได้ว่าในระนาบสนามแม่เหล็กรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงของความกว้างของลำคลื่นเมื่อระยะห่างของสายอากาศเพิ่มขึ้น ส่วนในระนาบสนามไฟฟ้าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงของความกว้างของลำคลื่นคือ เมื่อเมื่อระยะห่างของสายอากาศเพิ่มจะทำให้ลำคลื่นหลักแคบลงและเกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

3.2.2.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นคล้าย

กับการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศองค์ประกอบเดียวคือเป็นการพิจารณาว่าสายอากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความแรงที่ทิศทางต่างๆ น้อยแค่นั้น แต่จะแตกต่างกันตรงที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นในชั้นอยู่กับระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศ ในที่นี้กำหนดให้ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบสายอากาศ คือ Dy การวิเคราะห์จะวิเคราะห์ค่าเจาะจงสภาพทิศทางที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ $0.4\lambda - 1.4\lambda$ จำนวนของสายอากาศที่นำมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ และสามารถทำการเลือกระยะที่เหมาะสมที่มีค่าเจาะจงสภาพทิศทางสูง



รูปที่ 3.11 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน y

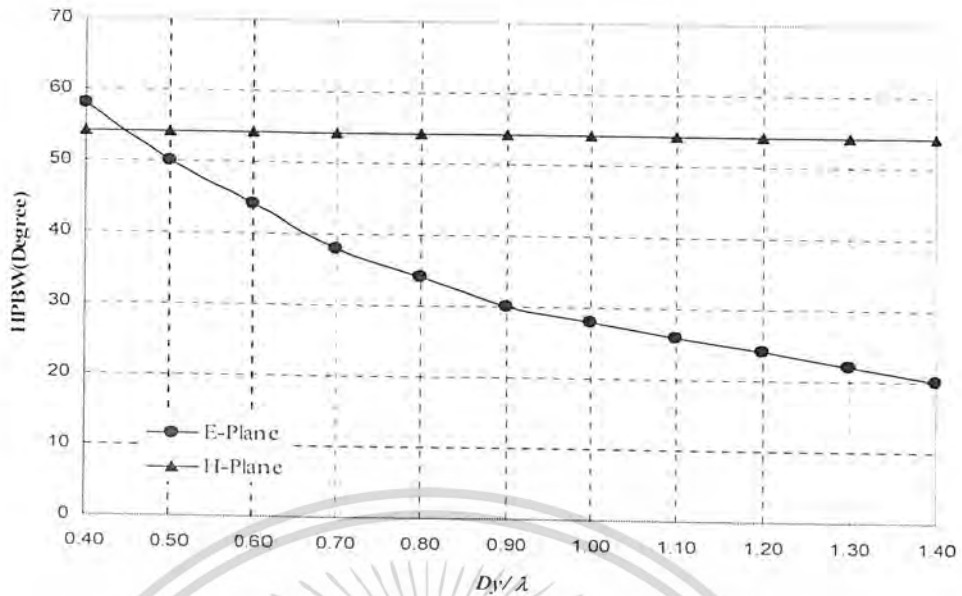
จากรูปของค่าสภาพเจาะจงทิศทาง สรุปได้ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงที่ระยะห่างเท่ากับ 0.9λ ซึ่งแนวโน้มของค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง

การเลือกระยะห่างระหว่างสายอากาศ 0.9λ เพราะเมื่อระยะห่างมากกว่านี้จะทำให้ค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง แต่ก็ควรพิจารณาพร้อมกับค่าพารามิเตอร์อื่นด้วย

3.2.2.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth)

การวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอก ว่า ลำคลื่นหลักแคบหรือกว้าง โดยการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ โดยเริ่มตั้งแต่ $0.4\lambda - 1.4\lambda$ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งคือความต้องการที่จะนำสายอากาศไปใช้งานบริเวณใดๆ ต้องการลำคลื่นแคบหรือกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



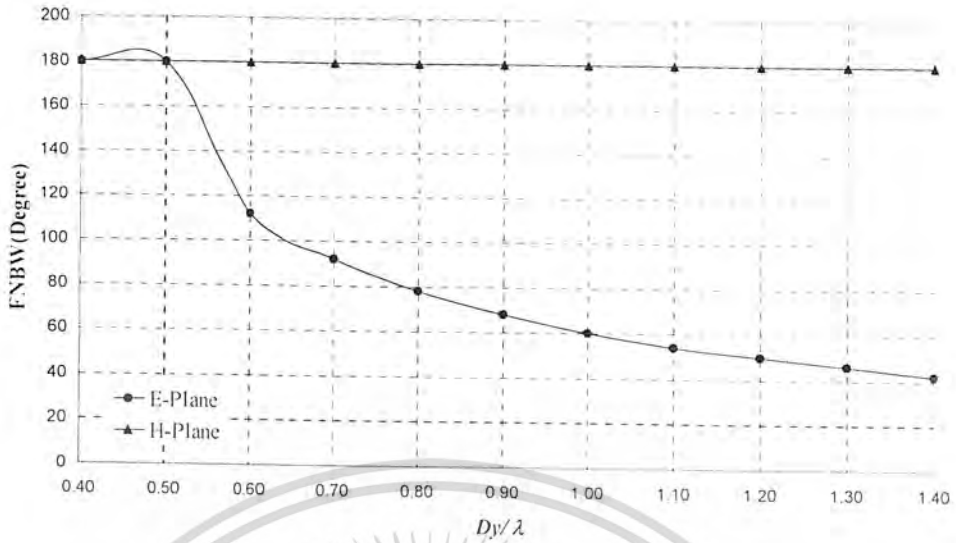
รูปที่ 3.12 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง

ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้วิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นจะเห็นว่าที่ระนาบสนามแม่เหล็กไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายของคลื่นที่ได้ทำการวิเคราะห์หามาถึงแม้ว่าระยะห่างระหว่างสายอากาศจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ตรงกันข้ามที่ระนาบสนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งมีค่าลดลงตามระยะห่างของสายอากาศที่ห่างมากขึ้นกล่าวคือลำคลื่นหลักจะแคบลงเมื่อระยะระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น

3.2.2.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beamwidth)

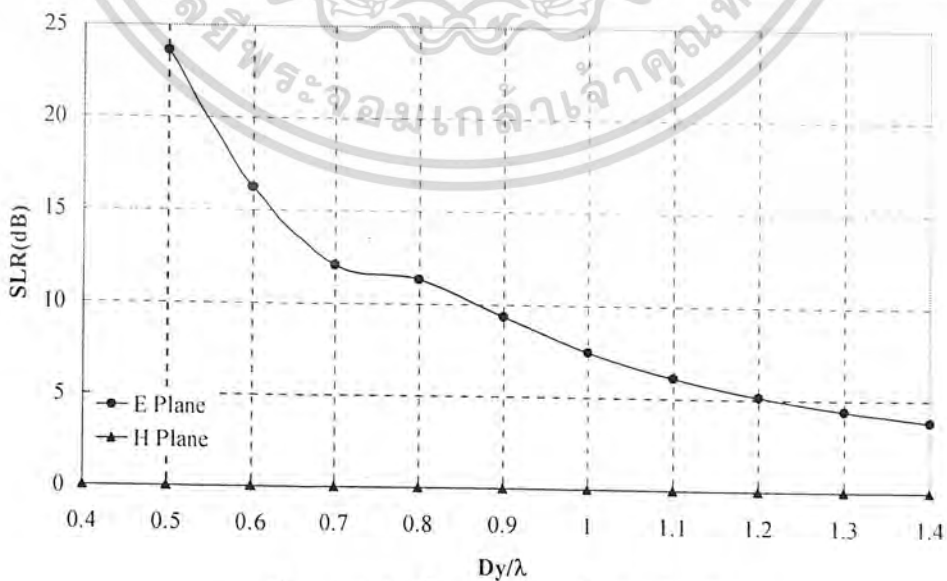
การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก เป็นการวิเคราะห์ว่ามี การเกิดขึ้นของลำคลื่นด้านข้างหรือไหมมากนักน้อยเพียงใด ในการออกแบบสายอากาศผู้สร้างไม่ต้องการที่จะให้ เกิดลำคลื่นด้านข้างเพราะลำคลื่นด้านข้างอาจรบกวนลำคลื่นหลัก



รูปที่ 3.13 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง
ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ทำการวิเคราะห์ จะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือไม่มีลำคลื่นด้านข้าง และในทางกลับกันที่สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่าน้อยลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่ามากก็จะเกิดลำคลื่นด้านข้างแต่ก็ยังน้อยกว่ากรณีที่ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่าน้อยจะทำให้เกิดลำคลื่นด้านข้างมาก

3.2.2.5 การวิเคราะห์หาค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio)



รูปที่ 3.14 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

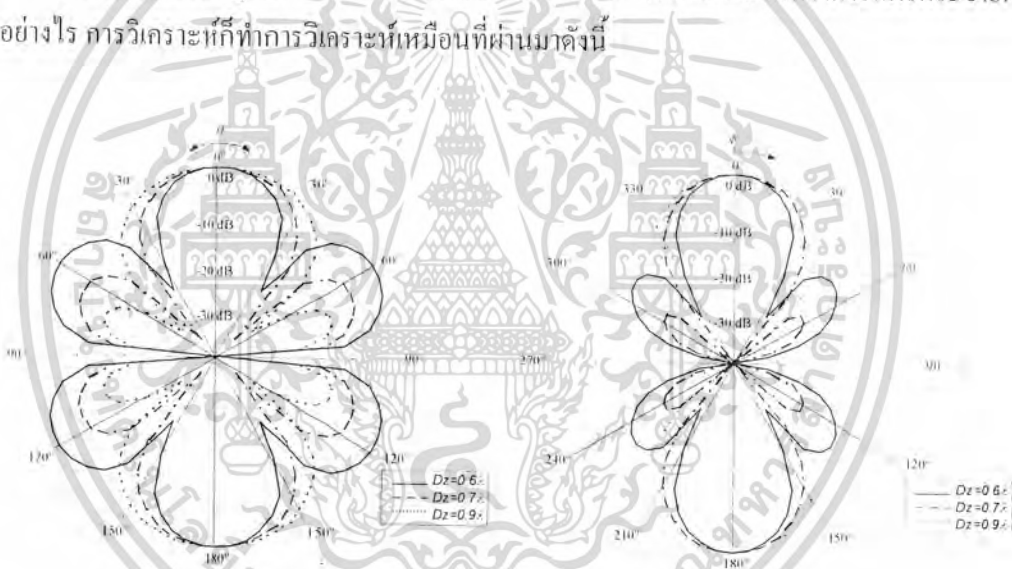
จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่เฉพาะที่ระนาบสนามไฟฟ้าโดยค่าลาค์สันหลักต่อลาค์สันย่อยด้านข้างจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นส่วนระนาบสนามแม่เหล็กจะไม่เปลี่ยนแปลงและไม่เกิดลาค์สันด้านข้างด้วย สรุปได้ว่าถ้าค่าลาค์สันหลักต่อลาค์สันย่อยด้านข้างมีค่ามากแสดงว่าเกิดลาค์สันด้านข้างน้อยและค่าลาค์สันหลักต่อลาค์สันด้านข้างมีค่าน้อยกล่าวคือแสดงว่ามีลาค์สันด้านเกิดขึ้นใกล้เคียงกับลาค์สันหลัก

3.2.3 การจัดเรียงตามแนวแกน z

เป็นการนำสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมาวางจัดเรียงตามแนวแกน z โดย Dz คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบโดยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

3.2.3.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นตัวบอกว่าสายอากาศมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นเป็นอย่างไร การวิเคราะห์ก็ทำการวิเคราะห์ที่เหมือนกับที่ผ่านมาดังนี้



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกระตุ้นด้วยโพรบ

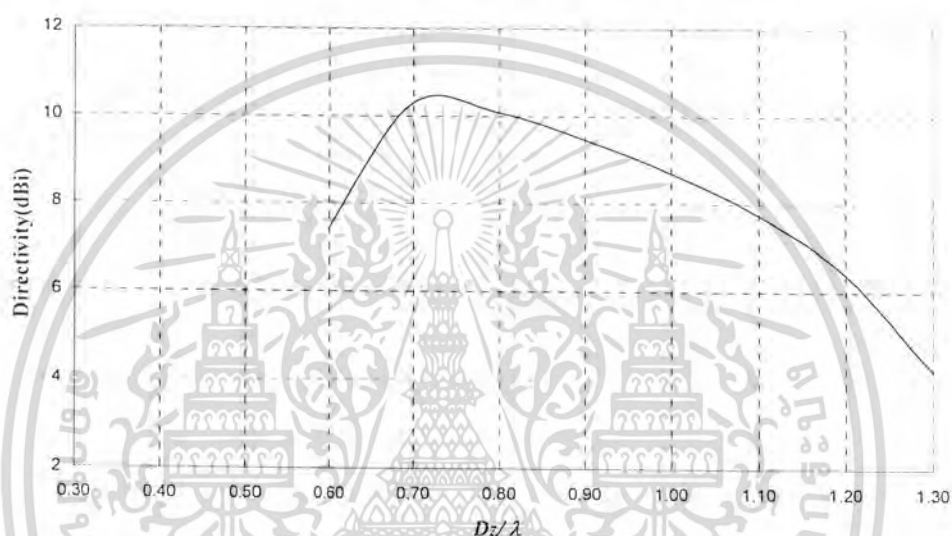
ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อนำสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมาจัดเรียงแบบเรียงเส้นตามแนวแกน z จะสรุปได้ว่าในระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความกว้างของลาค์สัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศ เมื่อระยะห่างขององค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มจะทำให้ความกว้างลาค์สันหลักเพิ่มขึ้นและเกิดลาค์สันย่อยด้านข้างอีกด้วย ลาค์สันย่อยด้านข้างจะมีจำนวนมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นคล้ายกับการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศองค์ประกอบเดียวคือเป็นการพิจารณาว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆมากน้อยแค่ไหน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นในขึ้นอยู่กักระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศ ในที่นี้ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบสายอากาศ คือ Dz จำนวนของสายอากาศที่นำมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นจำนวน 2 องค์ประกอบ การวิเคราะห์ห้จะวิเคราะห์ค่าเจาะจงสภาพทิศทางที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ $0.6\lambda - 1.3\lambda$ และสามารถทำการเลือกระยะที่เหมาะสมที่มีค่าเจาะจงสภาพทิศทางสูง



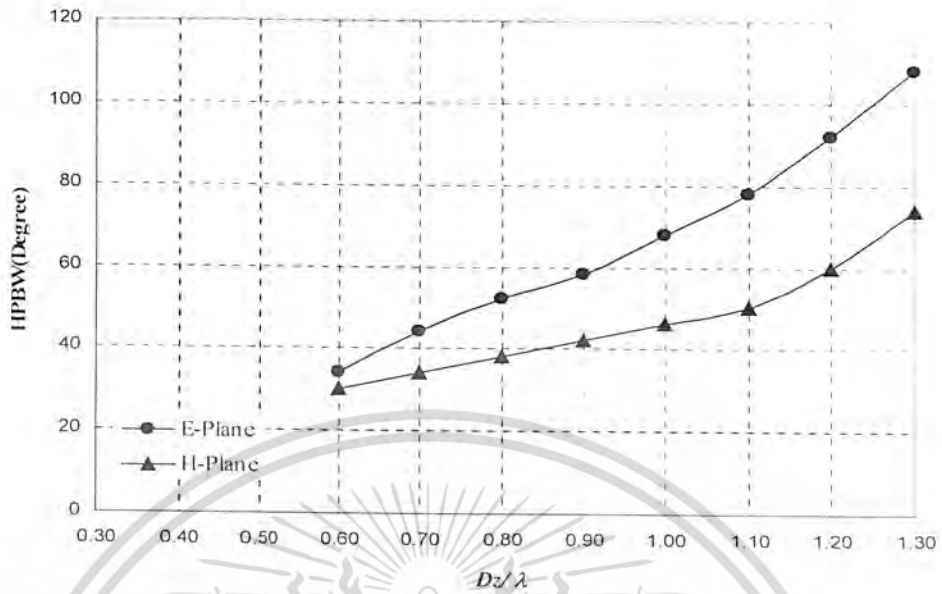
รูปที่ 3.16 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ
เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน z

จากรูปของค่าสภาพเจาะจงทิศทาง สรุปได้ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงที่ระยะห่างเท่ากับ 0.7λ ซึ่งแนวโน้มของค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง

การเลือกระยะห่างระหว่างสายอากาศ 0.7λ เพราะเมื่อระยะห่างมากกว่านี้จะทำให้ค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง แต่ก็ควรพิจารณาร่วมกับค่าพารามิเตอร์อื่นด้วย

3.2.3.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth)

การวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง เป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอกว่าลำคลื่นหลักแคบหรือกว้าง โดยการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ ที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบโดยเริ่มตั้งแต่ $0.6\lambda - 1.3\lambda$ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งคือความต้องการที่จะนำสายอากาศไปใช้งานบริเวณใดๆ ต้องการลำคลื่นแคบหรือกว้าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง

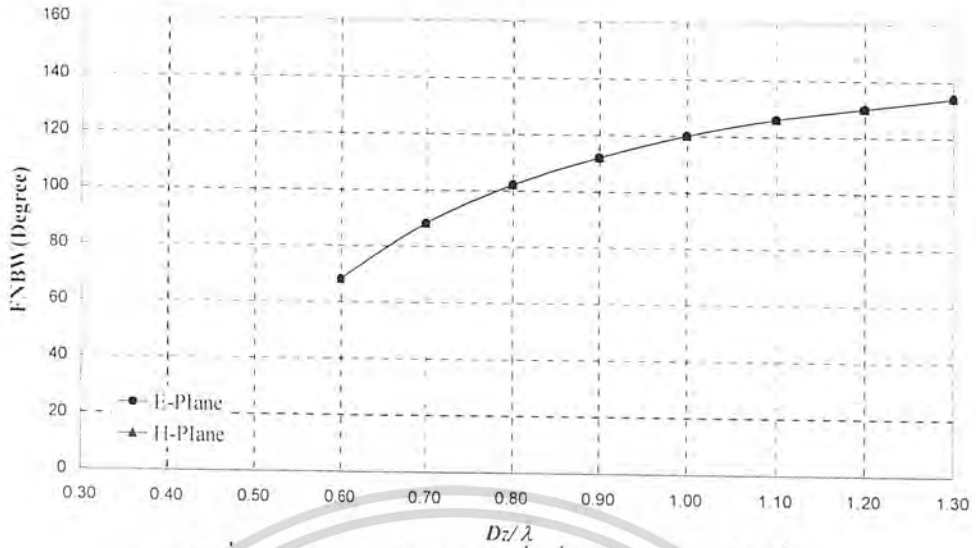
ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้วิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่น จะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จะมีการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งก็จะเพิ่มขึ้น สายอากาศที่ห่างมากขึ้น กล่าวคือลำคลื่นหลักจะกว้างขึ้นเมื่อระยะระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น

3.2.3.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null

Beamwidth)

การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก เป็นการวิเคราะห์หว่ามีการเกิดขึ้นของลำคลื่นด้านข้างหรือไหม่มากน้อยเพียงใด ในการออกแบบบอส เขาอากาศผู้สร้างไม่ต้องการที่จะให้เกิดลำคลื่นด้านข้างเพราะลำคลื่นด้านข้างอาจรบกวนลำคลื่นหลัก

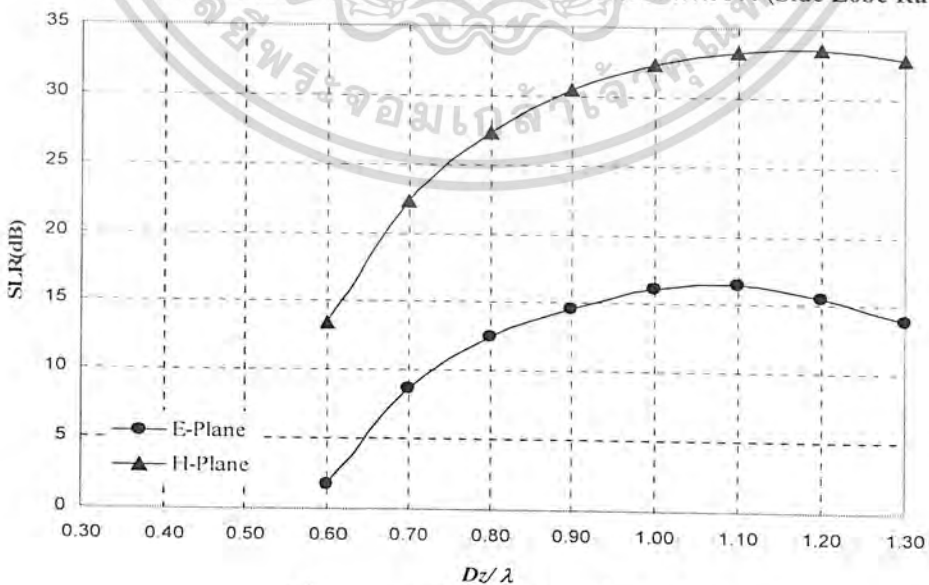


รูปที่ 3.18 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง
ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ทำการวิเคราะห์กราฟจะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครึ่งแรกมีค่ามากขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครึ่งแรกมีค่ามากก็จะเกิดลำคลื่นด้านข้างแต่ก็ยังน้อยกว่ากรณีที่ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครึ่งแรกมีค่าน้อยจะทำให้เกิดลำคลื่นด้านข้างมาก

ดังนั้นในการออกแบบจึงหลีกเลี่ยงระยะห่างระหว่างสายอากาศ ที่ทำให้เกิดค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครึ่งแรกที่มีค่าน้อย ๆ แต่ก็ต้องพิจารณาควบคู่กับพารามิเตอร์อื่นด้วย

3.2.3.5 การวิเคราะห์ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio)



รูปที่ 3.19 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ได้จากวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กโดยค่าล้าคลื่นหลักต่อล้าคลื่นย่อยด้านข้างจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่าถ้าค่าล้าคลื่นหลักต่อล้าคลื่นย่อยด้านข้างมีค่ามากแสดงว่าเกิดล้าคลื่นด้านข้างน้อยและค่าล้าคลื่นหลักต่อล้าคลื่นด้านข้างมีค่าน้อย กล่าวคือแสดงว่ามีล้าคลื่นด้านเกิดขึ้นใกล้เคียงกับล้าคลื่นหลัก

3.3 การวิเคราะห์เมื่อนำสายอากาศที่มีโครงสร้างวางบนตัวสะท้อนคลื่น

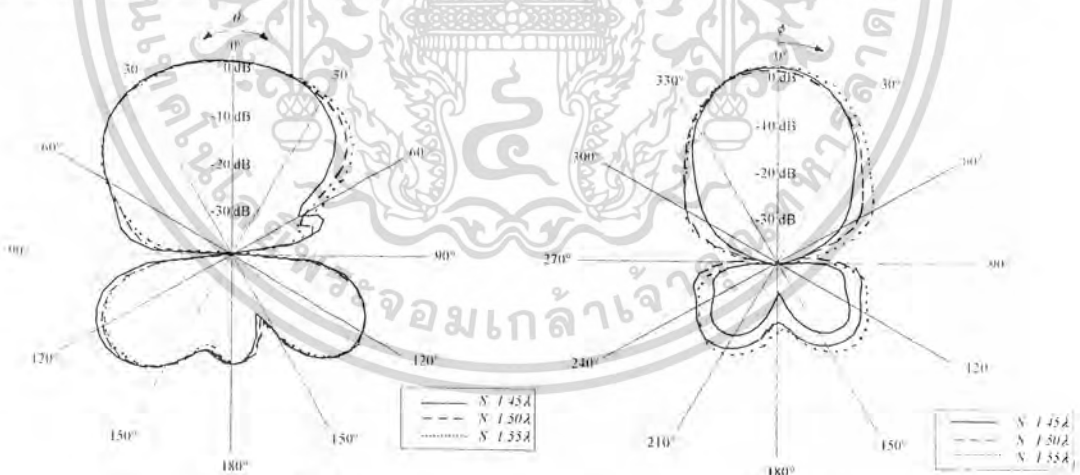
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์สายอากาศที่มีโครงสร้างวางบนตัวสะท้อนคลื่น ซึ่งให้การแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว การวิเคราะห์ก็จะมีลักษณะเดียวกับสายอากาศตัวเดียว เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมกับตัวสายอากาศวงแหวนวงรี และเปรียบเทียบคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อตัวสะท้อนที่ทำมุม 45 90 และ 180 องศา ตามลำดับ

3.3.1 สายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนที่ทำมุม 45 องศา

เป็นการนำสายอากาศองค์ประกอบเดียวมาวางตัวสะท้อนที่ทำมุม 45 องศาโดยที่ S คือระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวสะท้อนแบบมุม โดยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

3.3.1.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นตัวบอกว่าสายอากาศมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นเป็นอย่างไร การวิเคราะห์ที่ทำการวิเคราะห์เหมือนที่ผ่านมามีดังนี้



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

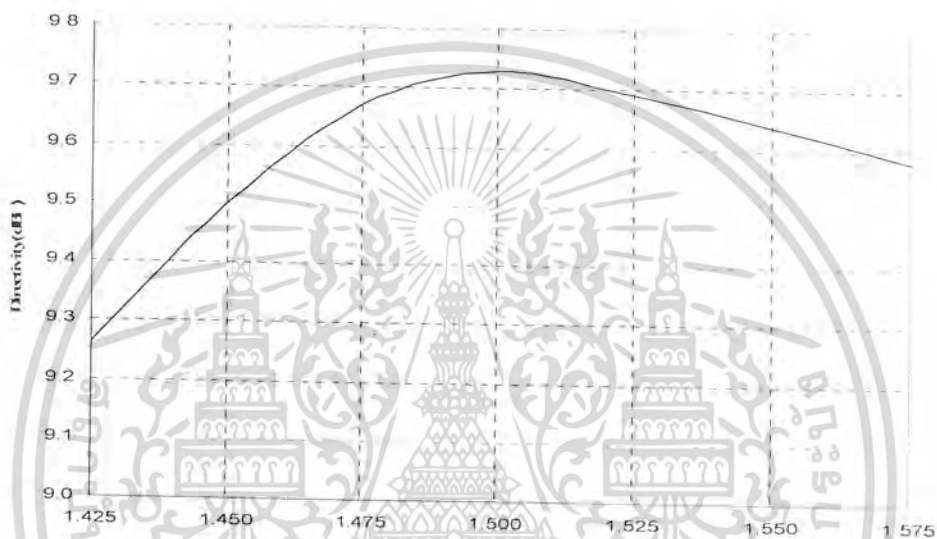
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ
ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อนำมาวางตัวสะท้อนที่ทำมุม 45 องศาจะพบว่าเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อนขนาดของลำปี่มจะเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการนำสายอากาศมาวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 45 องศา คล้ายกับการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสองขั้วประกอบเดี่ยวคือ เป็นการพิจารณาว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆมากน้อยแค่ไหน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อน ในที่นี้ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อน คือ S การวิเคราะห์จะวิเคราะห์ค่าเจาะจงสภาพทิศทางที่มีระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อน $1.425\lambda - 1.575\lambda$ และสามารถทำการเลือกระยะที่เหมาะสมที่มีค่าเจาะจงสภาพทิศทางสูง



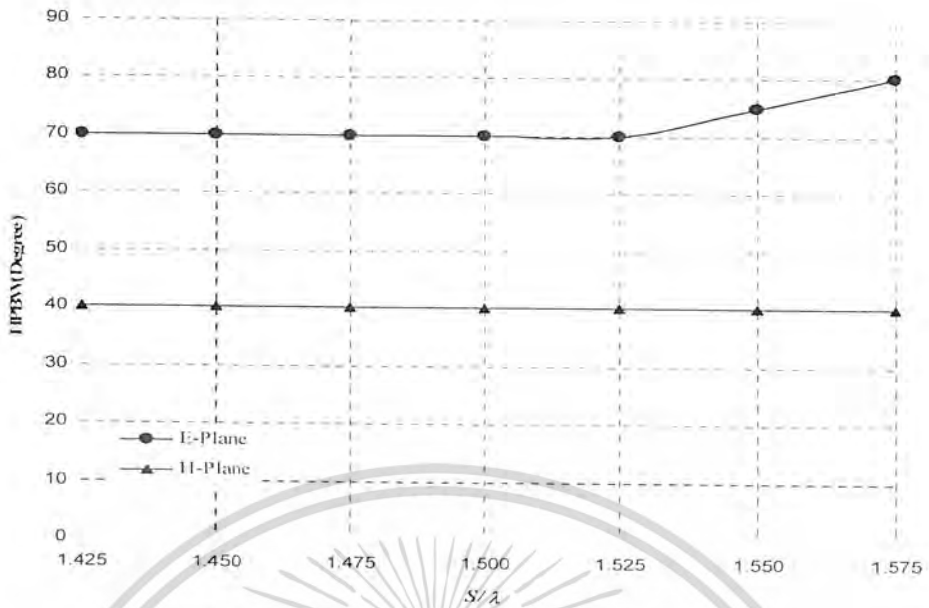
รูปที่ 3.21 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบวางบนแผ่นสะท้อนทำมุม 45 องศา

จากรูปของค่าสภาพเจาะจงทิศทางสรุปได้ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงที่ระยะห่างเท่ากับ 1.5λ ซึ่งแนวโน้มของค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง

การเลือกระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อน 1.5λ เพราะระยะห่างนี้จะทำให้ค่าเจาะจงสภาพทิศทางมีค่ามาก เมื่อนำสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 45 องศา

3.3.1.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth)

การวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอกว่าคุณลักษณะหลักแคบหรือกว้าง โดยการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อน โดยเริ่มตั้งแต่ $1.425\lambda - 1.575\lambda$ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งคือความต้องการที่จะนำสายอากาศไปใช้งานบริเวณใดๆ ต้องการลำคลื่นแคบหรือกว้าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

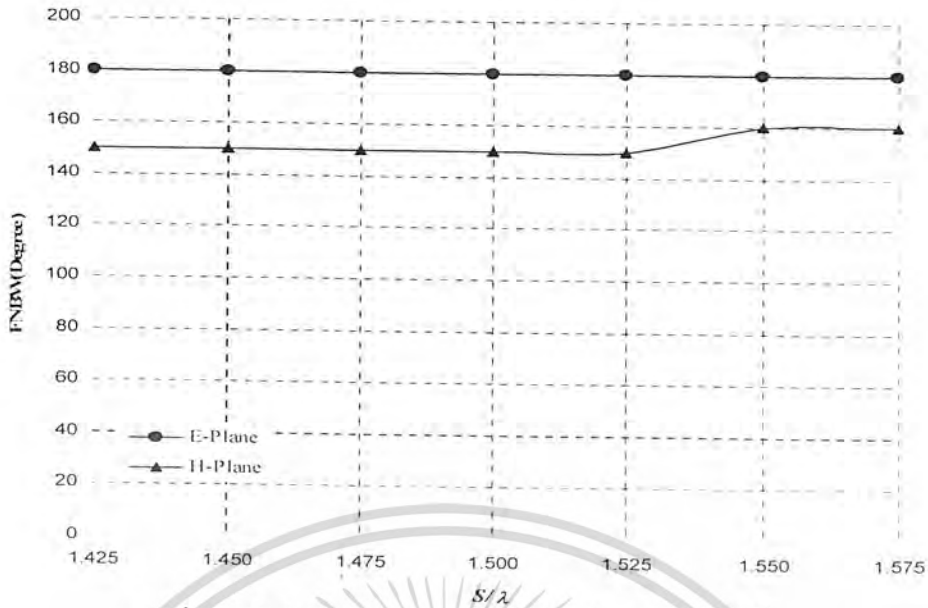


รูปที่ 3.22 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครั้งหนึ่ง
ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้วิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่น จะเห็นว่าที่ระนาบสนามแม่เหล็กไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายของคลื่นที่ได้ทำการวิเคราะห์หามาถึงแม้ว่าระยะห่างระหว่างสายอากาศจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ตรงกันข้ามที่ระนาบสนามไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนถึงที่ระยะห่างที่ 1.525 λ ซึ่งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

3.3.1.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beamwidth)

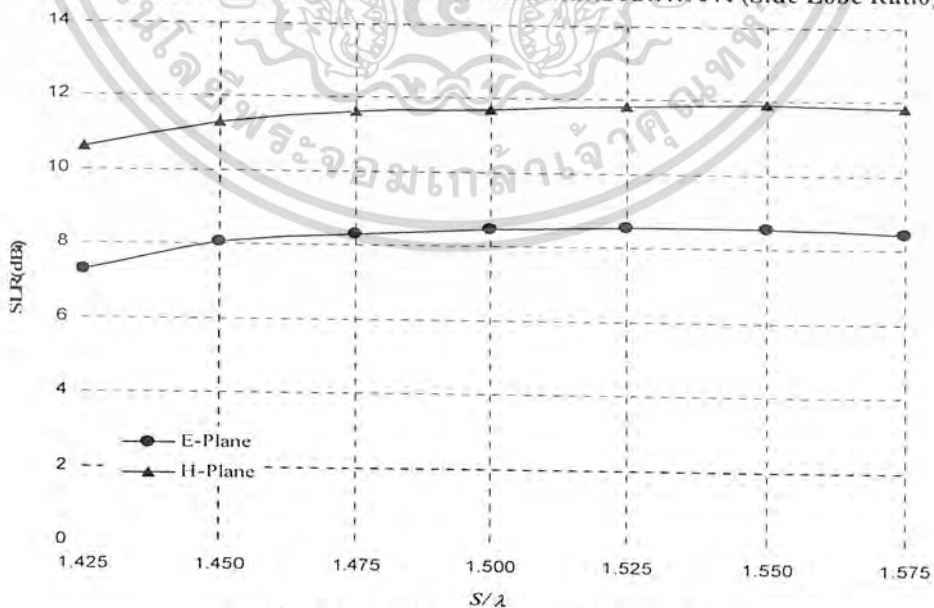
การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกเป็นการวิเคราะห์ว่าเกิดลำคลื่นด้านข้างหรือไม่มากนักเพียงใด ในการออกแบบสายอากาศผู้สร้างไม่ต้องการที่จะให้เกิดลำคลื่นด้านข้าง เพราะลำคลื่นด้านข้างอาจรบกวนลำคลื่นหลักในการส่งรับส่งสัญญาณ



รูปที่ 3.23 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก
ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ทำการวิเคราะห์จะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือไม่มีลำคลื่นด้านข้าง และในทางกลับกันที่สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่ระยะ 1.525λ มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่ามากก็จะเกิดลำคลื่นด้านข้างแต่ก็น้อยแต่กรณีที่ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์แรกมีค่าน้อยจะทำให้เกิดลำคลื่นด้านข้างมาก

3.3.1.5 การวิเคราะห์หาค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio)



รูปที่ 3.24 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง
ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ทำการวิเคราะห์ กรณีจะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่ามากขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่ามากขึ้นจะเกิดลำคลื่นด้านข้างแต่ก็ยังน้อยกว่ากรณีที่ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่าน้อยจะทำให้เกิดลำคลื่นด้านข้างมาก

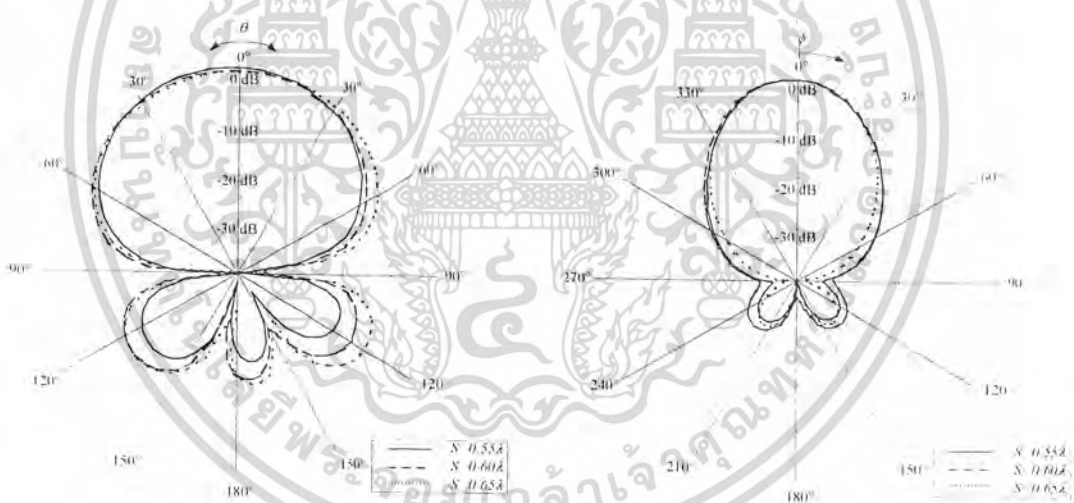
ดังนั้นในการออกแบบจึงหลีกเลี่ยงระยะห่างระหว่างสายอากาศ ที่ทำให้เกิดค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกที่มีค่าน้อยๆแต่ก็ต้องพิจารณาควบคู่กับพารามิเตอร์อื่นด้วย

3.3.2 สายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 90 องศา

เป็นการนำสายอากาศองค์ประกอบเดียวมาวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 90 องศาโดยที่ S คือระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวสะท้อนแบบมุม โดยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

3.3.2.1 การพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

การพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเป็นตัวบอกว่าสายอากาศมีทิศทางการแผ่กระจายคลื่นเป็นอย่างไร การวิเคราะห์ก็ทำการวิเคราะห์เหมือนที่ผ่านมาดังนี้



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

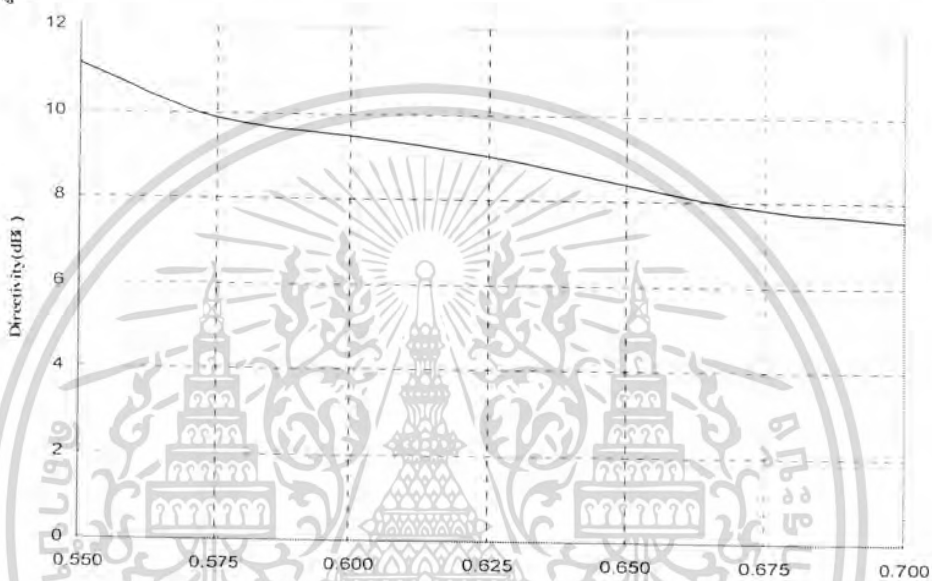
รูปที่ 3.25 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ
ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อนำมาวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 90 องศาจะพบว่าเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อนขนาดของลำบีมจะเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการนำสายอากาศมาวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 90 องศา คล้ายกับการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสองกึ่งประกอบเดี่ยว คือเป็นการพิจารณาว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆมากน้อยแค่ไหน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อน ในที่นี้กำหนดให้ระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อน คือ S การวิเคราะห์จะวิเคราะห์ที่ค่าเจาะจงสภาพทิศทางที่มีระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อน $0.55\lambda - 0.70\lambda$ และสามารถทำการเลือกระยะที่เหมาะสมที่มีค่าเจาะจงสภาพทิศทางสูง



รูปที่ 3.26 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบที่วางบนแผ่นสะท้อนทำมุม 90 องศา

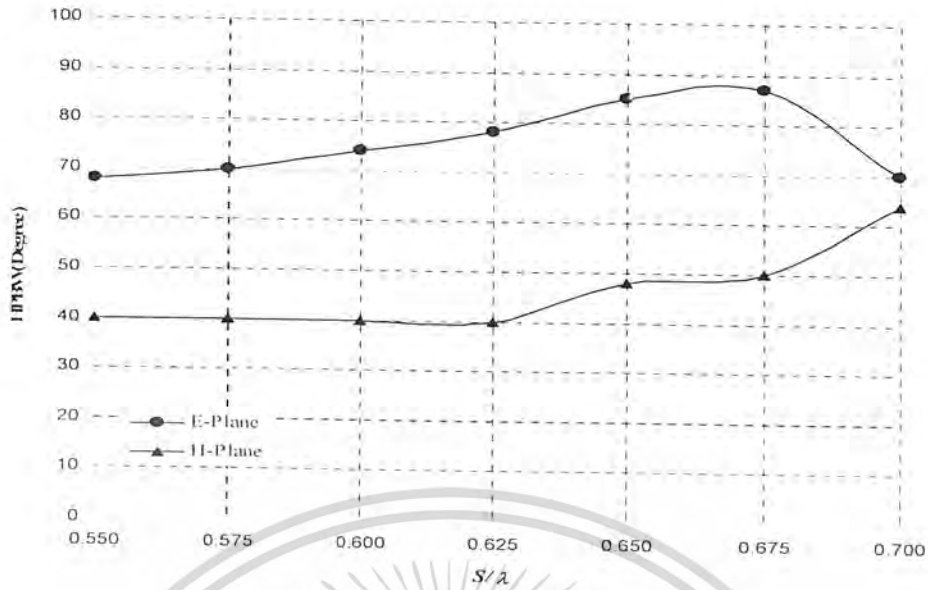
จากรูปของค่าสภาพเจาะจงทิศทางสรุปได้ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่ามากที่สุดที่สามารถวางสายอากาศบนตัวสะท้อนคลื่นมุม 90 องศา ที่ 0.55λ จะลดลงอย่างสม่ำเสมอเมื่อระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแนวโน้มของค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง

การเลือกระยะห่างระหว่างสายอากาศ 0.55λ เพราะระยะห่างนี้จะทำให้ค่าเจาะจงสภาพทิศทางมีค่ามากที่สุด เมื่อนำสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 90 องศา

3.3.2.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth)

การวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง เป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอกว่าคุณลักษณะหลักแคบหรือกว้าง โดยการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อน โดยเริ่มตั้งแต่ $0.55\lambda - 0.70\lambda$ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งคือความต้องการที่จะนำสายอากาศไปใช้งานบริเวณใดๆ ต้องการลำคลื่นแคบหรือกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

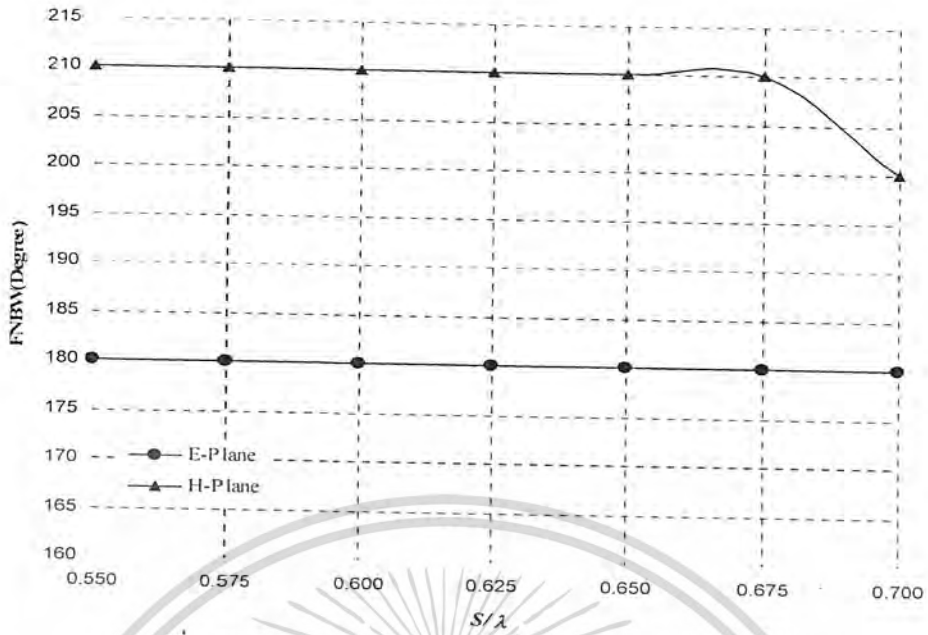


รูปที่ 3.27 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง
ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้วิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่น จะเห็นว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายของคลื่นที่ได้ทำการวิเคราะห์มา ถึงแม้ว่าระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อนเพิ่มขึ้นก็ตาม จะมีการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดครึ่งหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะห่างของสายอากาศที่ห่างมากขึ้นกล่าวคือลำคลื่นหลักจะกว้างเมื่อระยะระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น

3.3.2.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beamwidth)

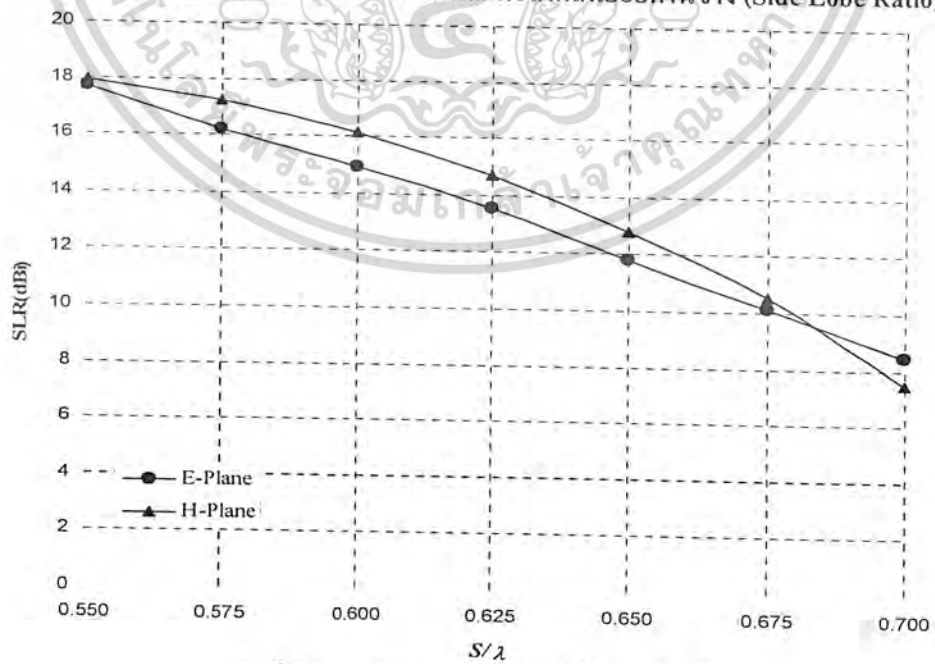
การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกเป็นการวิเคราะห์ว่าเกิดลำคลื่นด้านข้างหรือไม่มากนักเพียงใด ในการออกแบบสายอากาศผู้สร้างไม่ต้องการที่จะให้เกิดลำคลื่นด้านข้าง เพราะลำคลื่นด้านข้างอาจรบกวนลำคลื่นหลักในการส่งรับส่งสัญญาณ



รูปที่ 3.28 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก
ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ทำการวิเคราะห์จะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือไม่มีลำคลื่นด้านข้าง และในทางกลับกันที่สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่ระยะ 0.675λ มีค่าลดลง เมื่อค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่ามากก็จะเกิดลำคลื่นด้านข้างแต่ก็ยังน้อยแต่กรณีนี้ที่ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่าน้อยจะทำให้เกิดลำคลื่นด้านข้างมาก

3.3.2.5 การวิเคราะห์หาค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio)



รูปที่ 3.29 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นทั้งระนาบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าโดยค่า
 ล้าคลื่นหลักต่อล้าคลื่นย่อยด้านข้างจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ มีค่า
 เพิ่มขึ้น สรุปได้ว่าถ้าค่าล้าคลื่นหลักต่อล้าคลื่นย่อยด้านข้างมีค่ามากแสดงว่าเกิดล้าคลื่นด้านข้างน้อย และ
 ค่าล้าคลื่นหลักต่อล้าคลื่นด้านข้างมีค่าน้อย กล่าวคือแสดงว่ามีล้าคลื่นด้านเกิดขึ้นใกล้เคียงกับล้าคลื่นหลัก

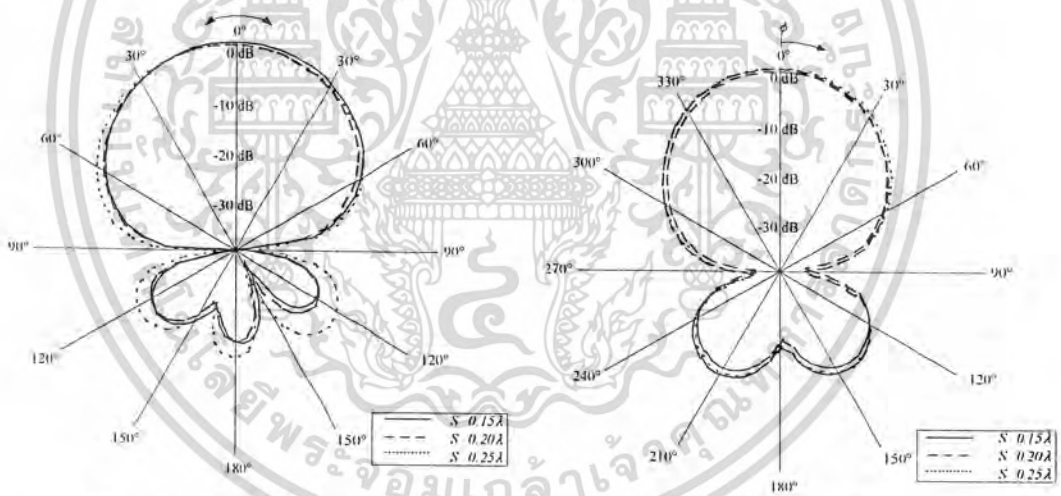
ดังนั้นในการออกแบบจึงหลีกเลี่ยงระยะห่างระหว่างสายอากาศ ที่ทำให้เกิดค่าความกว้างของล้า
 คลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกที่มีค่าน้อยๆแต่ก็ต้องพิจารณาควบคู่กับพารามิเตอร์อื่นด้วย

3.3.3 สายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 180 องศา

เป็นการนำสายอากาศสององค์ประกอบเดียวมาวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 180 องศาโดยที่ S คือ
 ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม โดยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

3.3.3.1 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นตัวบอกว่าสายอากาศมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่น
 เป็นอย่างไรการวิเคราะห์ก็ทำการวิเคราะห์ที่เหมือนที่ผ่านมาดังนี้



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

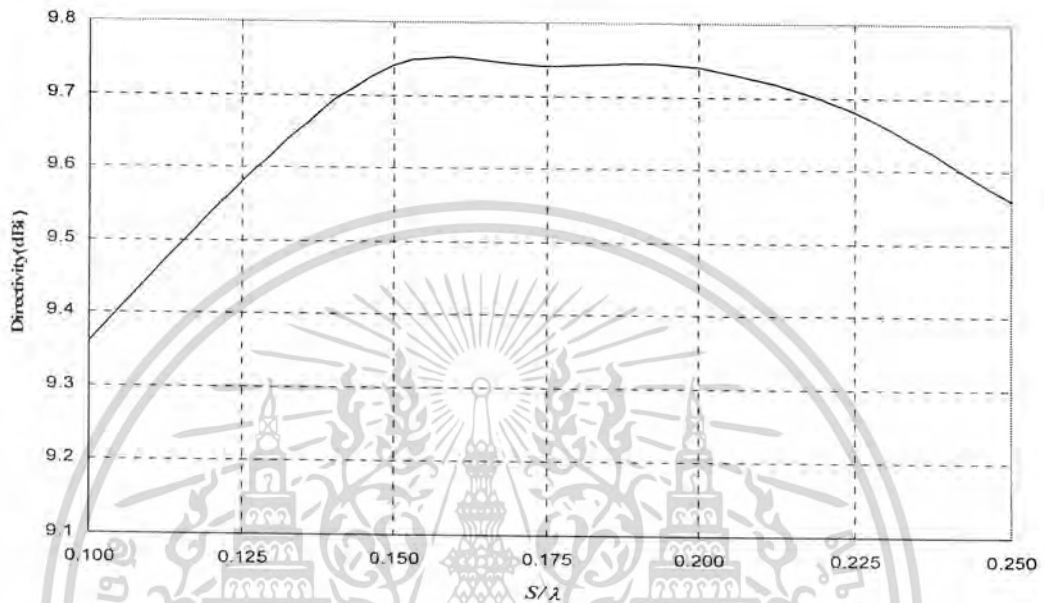
รูปที่ 3.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ
 ในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อนำมาวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 180 องศาจะพบว่าเมื่อ
 เปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อนขนาดของล้าบีมจะเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3.30

3.3.3.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการนำสายอากาศมาวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 180
 องศา คล้ายกับการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสององค์ประกอบเดียวคือเป็นการพิจารณาว่า
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆมากขึ้นเล็กน้อย แต่จะแตกต่างกันตรงที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อน ในที่นี้ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อน คือ S การวิเคราะห์ห้จะวิเคราะห์ห้ค่าเจาะจงสภาพทิศทางที่มีระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อน $0.10\lambda - 0.25\lambda$ และสามารถทำการเลือกระยะที่เหมาะสมที่มีค่าเจาะจงสภาพทิศทางสูง



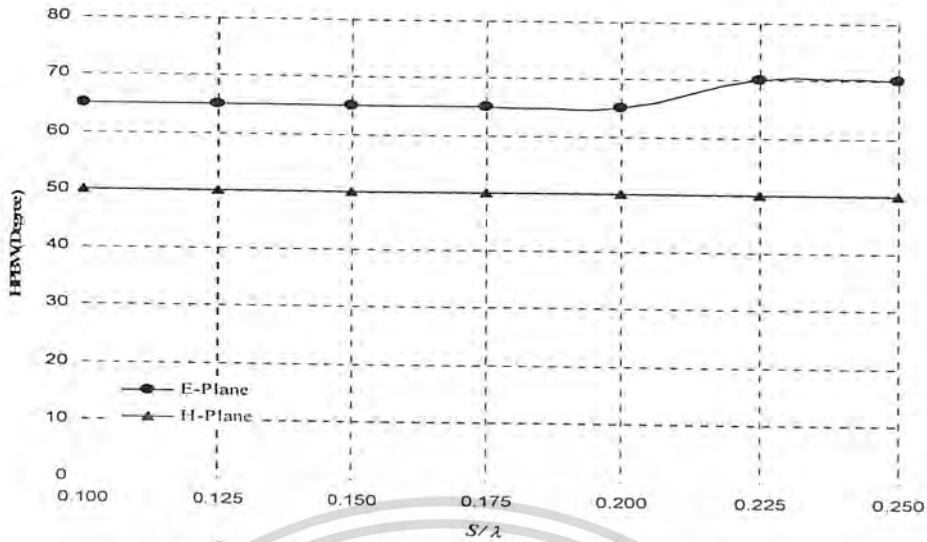
รูปที่ 3.31 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบวางบนแผ่นสะท้อนทำมุม 180 องศา

จากรูปของค่าสภาพเจาะจงทิศทางสรุปได้ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงที่ระยะห่างเท่ากับ $1.5\lambda - 0.2\lambda$ ซึ่งแนวโน้มของค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง

การเลือกระยะห่างระหว่างสายอากาศ 0.2λ เพราะระยะห่างนี้จะทำให้ค่าเจาะจงสภาพทิศทางมีค่ามาก เมื่อนำสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 180 องศา

3.3.3.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth)

การวิเคราะห์ห้ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอกห้ค่าคลื่นหลักแคบหรือกว้าง โดยการวิเคราะห์ห้จะทำการวิเคราะห์ห้ที่ระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อนโดยเริ่มตั้งแต่ $0.10\lambda - 0.25\lambda$ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ห้ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งคือความต้องการที่จะนำสายอากาศไปใช้งานบริเวณใดๆ ต้องการลำคลื่นแคบหรือกว้าง



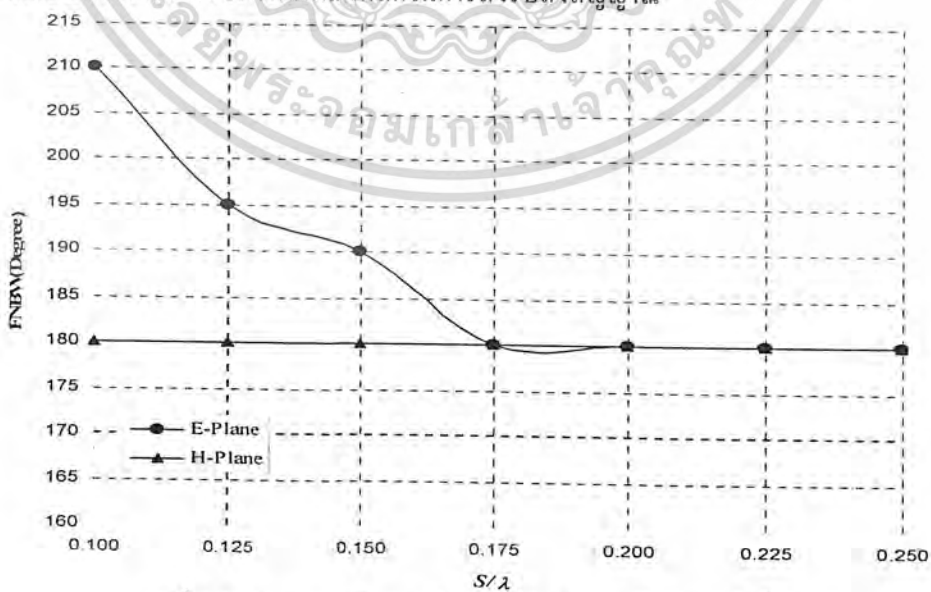
รูปที่ 3.32 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง

ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้วิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่น จะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายของคลื่นที่ได้ทำการวิเคราะห์มีระยะห่างระหว่างตัวสายอากาศและตัวสะท้อนจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ตรงกันข้ามที่ระนาบสนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ 0.20λ คือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดครึ่งหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น

3.3.3.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beamwidth)

การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกเป็นการวิเคราะห์ว่าเกิดลำคลื่นด้านข้างหรือไม่มากนักเพียงใด ในการออกแบบสายอากาศผู้สร้างไม่ต้องการที่จะให้เกิดลำคลื่นด้านข้าง เพราะลำคลื่นด้านข้างอาจรบกวนลำคลื่นหลักในการส่งรับส่งสัญญาณ



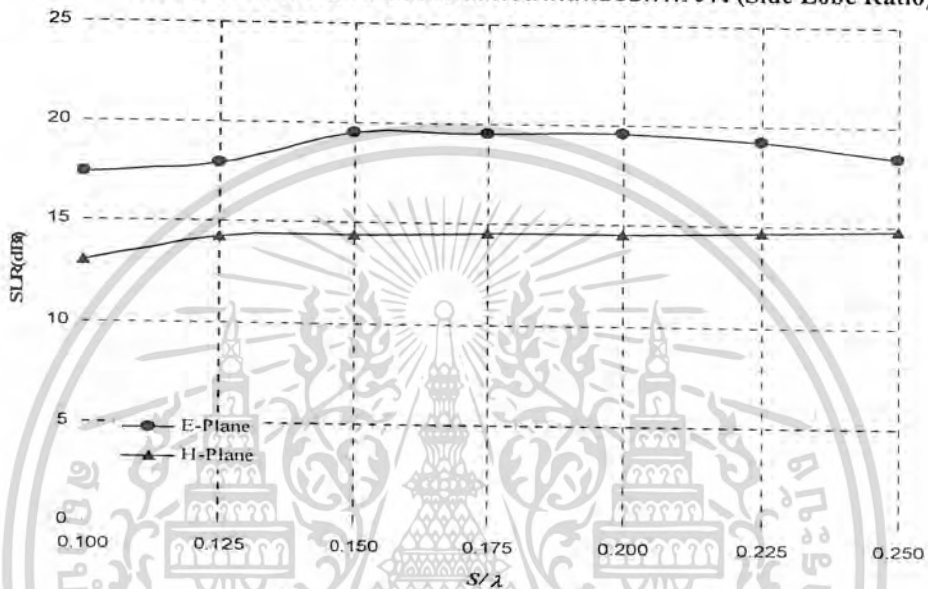
รูปที่ 3.33 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก

ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ทำการวิเคราะห์จะเห็นว่าที่ระนาบสนามแม่เหล็กไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือ ไม่มีลำคลื่นด้านข้าง และในทางกลับกันที่สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นมีค่าน้อยลง เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่ามากก็จะเกิดลำคลื่นด้านข้างแต่ก็ยังน้อยแต่กรณีที่ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่าน้อยจะทำให้เกิดลำคลื่นด้านข้างมาก

3.3.3.5 การวิเคราะห์ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio)



รูปที่ 3.34 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ทำการวิเคราะห์ กรณีจะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่ามากขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่ามากก็จะเกิดลำคลื่นด้านข้างแต่ก็ยังน้อยแต่กรณีที่ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่าน้อยจะทำให้เกิดลำคลื่นด้านข้างมาก

ดังนั้นในการออกแบบจึงหลีกเลี่ยงระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ทำให้เกิดค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกที่มีค่าน้อยๆ แต่ก็ต้องพิจารณาควบคู่กับพารามิเตอร์อื่นด้วย

สรุปในบทนี้ทำการวิเคราะห์ จำนวน และออกแบบสายอากาศทั้ง 2 แบบคือสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทางประกอบด้วย สายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบหนึ่งองค์ประกอบ และสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบที่จัดเรียงแบบแถวลำดับ และสายอากาศแบบทิศทางเดียวคือสายวงแหวนวงรีที่วางบนแผ่นสะท้อนเชิงมุม ซึ่งได้คุณสมบัติต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว ในบทต่อไปเป็นการนำเอาคุณสมบัติดังกล่าวช่วยเป็นแนวทางในการนำไปสร้าง และทดสอบต่อไป

บทที่ 4

การสร้าง ทดสอบ และผลการทดลอง

4.1 การสร้างสายอากาศ

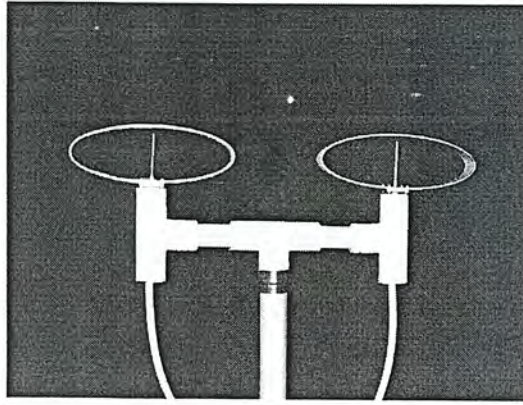
จากบทที่ 2 และ บทที่ 3 กล่าวถึงคุณสมบัติต่างรวมถึงการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศวงแหวนวงรีซึ่งในการออกแบบสายอากาศนี้ ความถี่ใช้งาน 1.9 GHz มีความยาวคลื่นเท่ากับ 15.78 cm ใช้โหมคหลักในการส่งผ่านคลื่นสัญญาณภายในตัวสายอากาศ การพิจารณาถึงค่าพารามิเตอร์จะพิจารณาถึงความยาวครึ่งแกนหลัก (a) และความยาวครึ่งแกนรอง (b) จะต้องมีค่าที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถส่งผ่านคลื่นในโหมคหลัก โดยมีขนาดของตัวสายอากาศวงแหวนวงรีล้อมรอบ โพรบมีค่าความกว้างความยาวแกนหลัก $2a$ (15cm) ความยาวแกนรอง $2b$ (5cm) ความยาววงแหวนวงรี 0.15λ (2.3cm) ค่าความยาวโพรบ 0.25λ (3.9cm) เมื่อนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับ ระยะห่างเมื่อจัดเรียงตามแนวแกน $x = 1.5\lambda$ (23.6cm) ระยะห่างเมื่อจัดเรียงตามแนวแกน $y = 0.9\lambda$ (14.2cm) ระยะห่างเมื่อจัดเรียงตามแนวแกน $z = 1.5\lambda$ (11.0cm) และเมื่อนำสายอากาศที่มีโครงสร้างวางบนตัวสะท้อนคลื่น ความสูงของตัวสะท้อน $S = 0.95\lambda$ (15 cm.) ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นกับสายอากาศวงแหวนวงรี มุมสะท้อนคลื่น 45 องศา $S = 1.5\lambda$ (24 cm.) มุมสะท้อนคลื่น 90 องศา $S = 0.60\lambda$ (9 cm.) มุมสะท้อนคลื่น 180 องศา $S = 0.2\lambda$ (3 cm.)

การทดลองในโครงการนี้จะทำการทดลองการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบวงแหวนวงรี โดยจะทำการวัดค่าและทดสอบคุณสมบัติของพารามิเตอร์ต่างๆ คือ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) อิมพีแดนซ์ (Impedance) ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ซึ่งพิจารณาผลการวิเคราะห์ร่วมกับ โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code: NEC2)

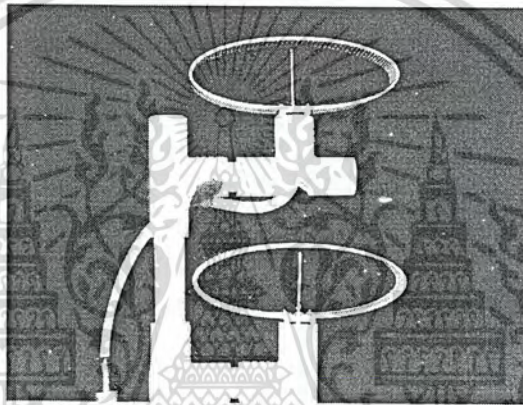


รูปที่ 4.1 สายอากาศชนิดวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ

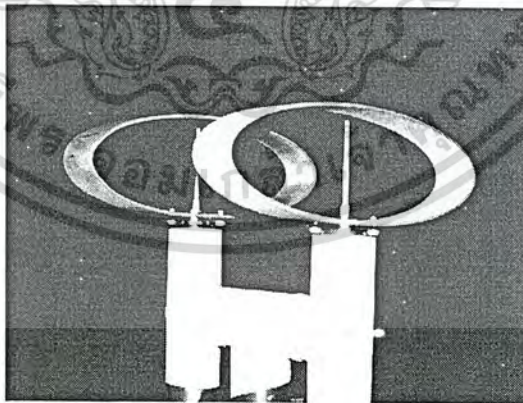
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) การจัดเรียงตามแนวแกน x (Side By Side)



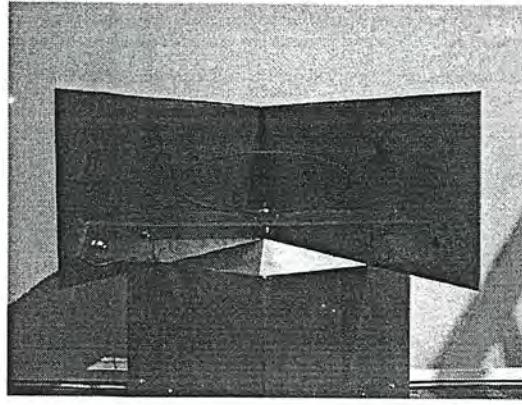
ข) การจัดเรียงตามแนวแกน y (Collinear)



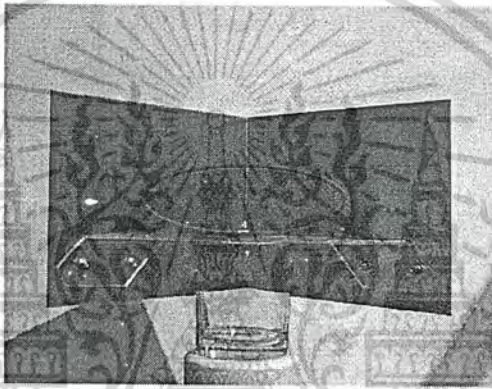
ค) การจัดเรียงตามแนวแกน z (Face to Face)

รูปที่ 4.2 สายอากาศที่นำมาเรียงแบบแถวลำดับ 2 องค์กรประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) สาขาอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 45 องศา



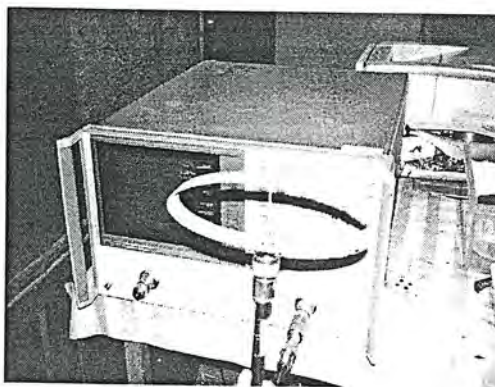
ข) สาขาอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 90 องศา



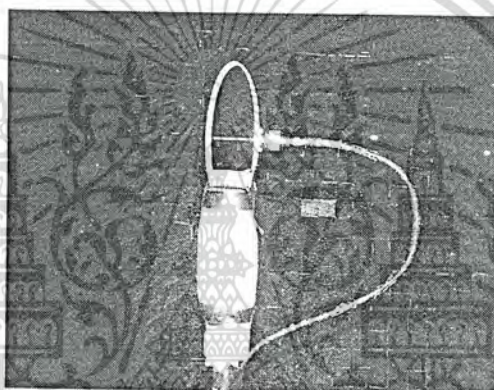
ค) สาขาอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 180 องศา

รูปที่ 4.3 สาขาอากาศที่มีโครงสร้างวางบนตัวสะท้อนคลื่น

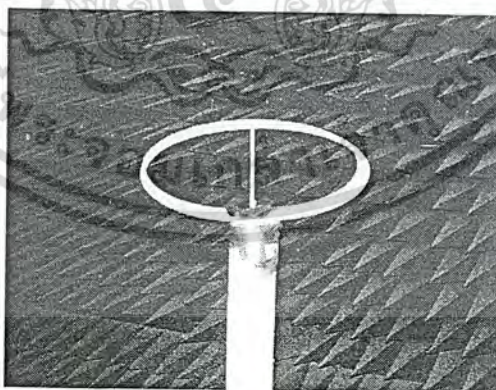
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การต่อสายอากาศที่จะทำการวัดค่าพารามิเตอร์เข้ากับ Network Analyzer



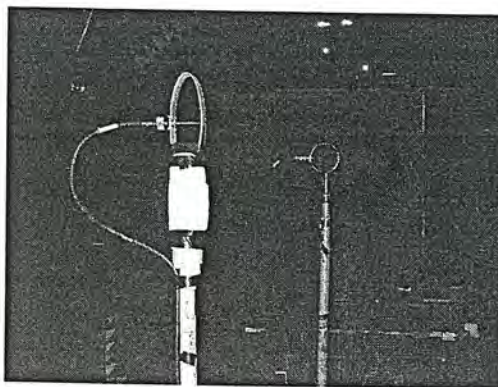
ก). ระนาบสนามไฟฟ้า



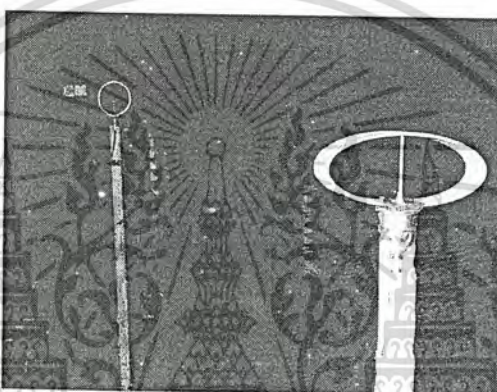
ข). ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.5 การจัดวางสายอากาศวงแหวนวงรี
ภายในห้องทดสอบโดยที่สายอากาศทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก). ระบุนามสนามไฟฟ้า



ข). ระบุนามสนามแม่เหล็ก

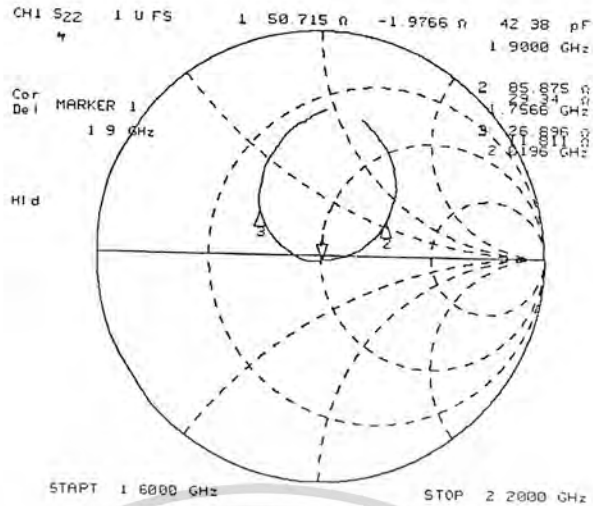
รูปที่ 4.6 การวางสายอากาศสายอากาศวงแหวนวงรี
ภายในห้องทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

4.2 การทดสอบและผลการทดสอบ

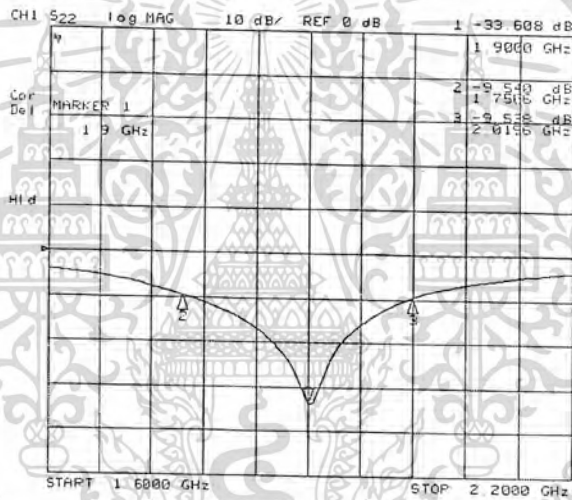
4.2.1 การทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ค่าความยาวของโพรบที่ได้ทำการวิเคราะห์กับเครื่องวิเคราะห์ระบบโครงข่าย (Network Analyzer) จะพบว่าโดยทั่วไปแล้วค่า VSWR ที่สามารถนำมาใช้งานได้จะต้องไม่เกิน 2:1 แต่ถ้าเราจะนำไปใช้งานจริงๆ ต้องมีค่าไม่เกิน 1.5 :1 ซึ่งเราอาจจะทำการปรับที่ค่าความยาวของโพรบ เพื่อให้ค่า VSWR และ อิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด เพื่อให้คลื่นที่ออกมาจากสายนำสัญญาณซึ่งมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω สามารถส่งผ่านสายอากาศออกไปได้อย่างสมบูรณ์ ค่าการสูญเสียของการสะท้อนกลับ (Return Loss) จะต้องมีค่าน้อยกว่า -9.54 dB ขึ้นไป และค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานควรมีค่ามากกว่า 10% ขึ้นไป

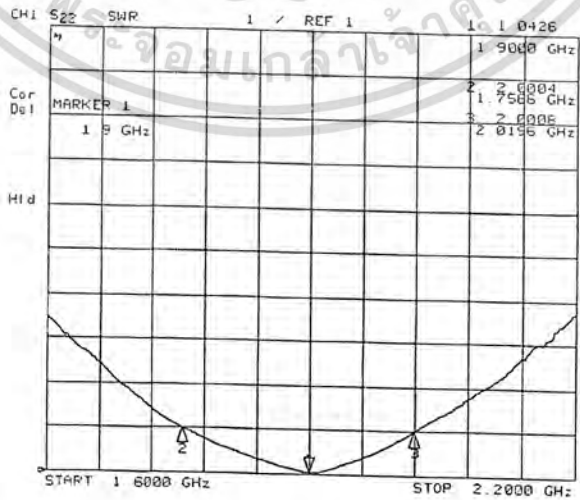
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศวงแหวนวงรี



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศวงแหวนวงรี



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศวงแหวนวงรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบสายอากาศ

สายอากาศ	VSWR:1	Return loss (dB)	Impedance (Ω)	Bandwidth (%)	Gain(dBi)
วงแหวนวงรี องค์ประกอบเดียว	1.04	33.60	50.71-j1.97	14.18	5.05
Array แกน x 2 องค์ประกอบ	1.33	16.95	46.30-j13.32	12.18	7.70
Array แกน y 2 องค์ประกอบ	1.22	20.17	42.26-j4.70	4.73	7.90
Array แกน z 2 องค์ประกอบ	1.15	23.22	48.36-j6.60	7.70	7.60
สายอากาศวงตัว สะท้อนคลื่นมุม 45 องศา	1.23	19.67	48.76-j10.24	21.22	8.65
สายอากาศวงตัว สะท้อนคลื่นมุม 90 องศา	1.52	13.69	63.40-j19.67	11.65	9.25
สายอากาศวงตัว สะท้อนคลื่นมุม 180 องศา	1.37	16.18	53.58-j15.87	23.06	6.35

4.2.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern) จะทำการวัดการแพร่กระจายคลื่นทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กการวัดจะพิจารณาที่ระยะไกล (Far Field) ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและตัวรับมีค่าเท่ากับ

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{เมตร} \quad (4.1)$$

โดยที่ R คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

D คือมิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ

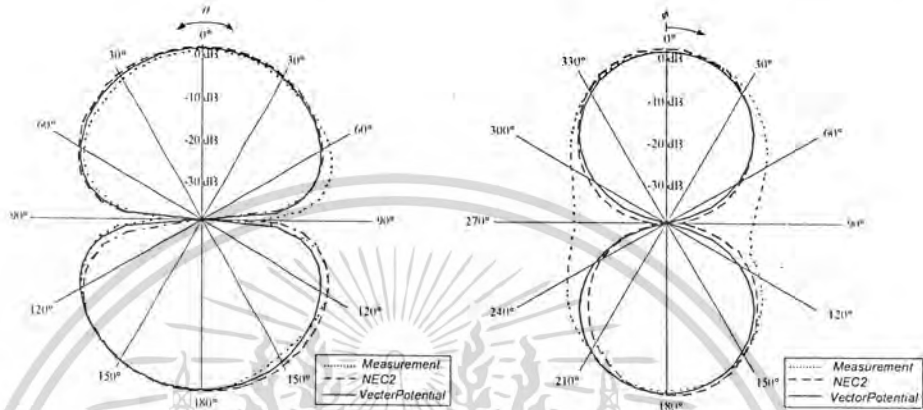
ดังนั้นการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะต้องมีระยะห่างคือ $R \geq 2.02$ เมตร

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น การทดสอบทั้งหมดได้ทำการทดสอบภายในห้องทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น สามารถแสดงผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระหว่าง การคำนวณด้วยวิธีศัพทศาสตร์ การทดสอบ และ โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code: NEC2) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สอบจะมีลักษณะที่คล้ายกับการออกแบบด้วยวิธีศักย์เวกเตอร์ และโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 โดยเกิดการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง ซึ่งผลจากการทดสอบสายอากาศที่ได้ทำการสร้างแสดงได้ดังนี้

4.2.2.1 สายอากาศวงแหวนวงรี ที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.15λ การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก



ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

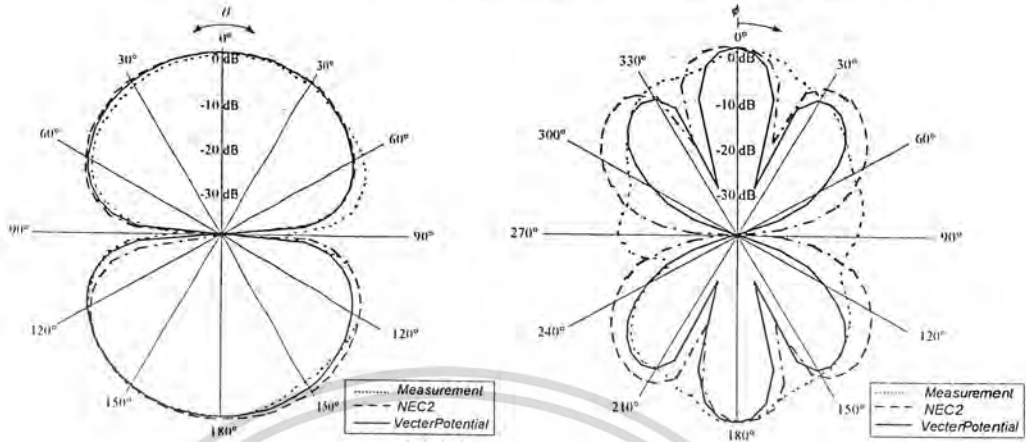
ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบสายอากาศวงแหวนวงรีที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.15λ เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ เป็นแบบสองทิศทาง และพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบมีความสอดคล้องกัน กล่าวคือในระนาบสนามไฟฟ้าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากทุกกรณีเกือบเท่ากัน แต่ในระนาบสนามแม่เหล็กแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบนั้น ลักษณะของลำคลื่นจะไม่สมมาตรทั้งสองข้าง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากโพรบป้อนสัญญาณและตัวเชื่อมต่อ ที่ป้อนสัญญาณจากตำแหน่งด้านล่างของสายอากาศ สำหรับระนาบสนามแม่เหล็กพบว่าลักษณะลำคลื่นด้านหน้าและด้านหลังจะมีความสอดคล้องกันในทุกกรณี

4.2.2.2 สายอากาศวงแหวนวงรีที่วางแบบแนวลำดับ เมื่อวางตามแนวแกน x

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก



ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

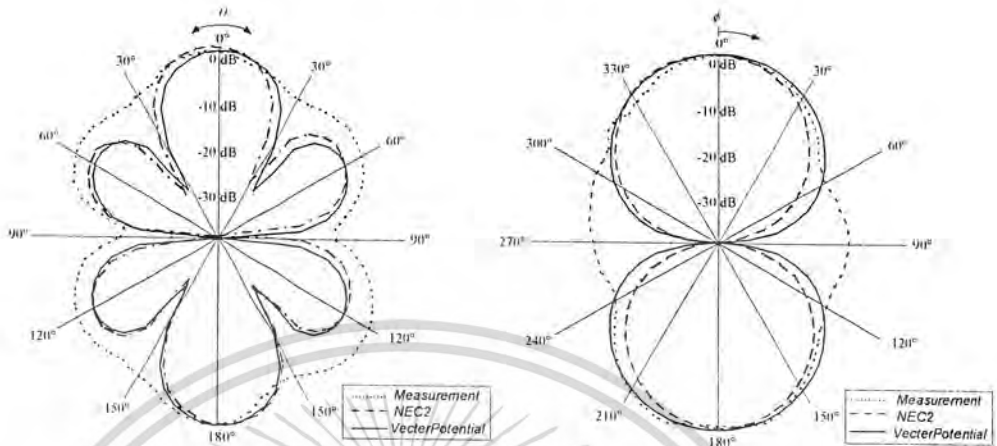
รูปที่ 4.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางตามแนวแกน x จำนวน 2 องค์ประกอบ เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการคำนวณ และการทดสอบสายอากาศที่จัดเรียงเป็นแนวลำดับตามแนวแกน x แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อพิจารณาลำคลื่นหลักทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง นั้นมีความใกล้เคียงกันมากสำหรับ ไม่มีลำคลื่นย่อยด้านข้าง ผลที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโปรแกรม NEC2 ส่วนลักษณะลำคลื่นที่ไม่สมมาตรกันทั้งสองด้าน ของผลการทดสอบนั้น อาจเป็นผลมาจากโพรบป้อนสัญญาณและตัวเชื่อมต่อที่อยู่ด้านล่างสายอากาศเพียงด้านเดียว

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กนั้น เมื่อพิจารณาลำคลื่นหลักของสายอากาศ พบว่าในทุกกรณีมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาลำคลื่นย่อยด้านข้างด้านข้างของสายอากาศพบว่าผลจากการทดสอบจะมีระดับลำคลื่นย่อยสูงกว่ากรณีอื่นๆ นอกจากนี้พบว่าระดับของจุดที่เป็นศูนย์ครั้งแรกจะมีค่าสูงกว่ากรณีอื่นๆ โดยที่ระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างและจุดที่เป็นศูนย์ครั้งแรกนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จาก โปรแกรม NEC2

4.2.2.3 สายอากาศวงแหวนวงรีที่วางแบบแถวลำดับ เมื่อวางตามแนวแกน y

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก



ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

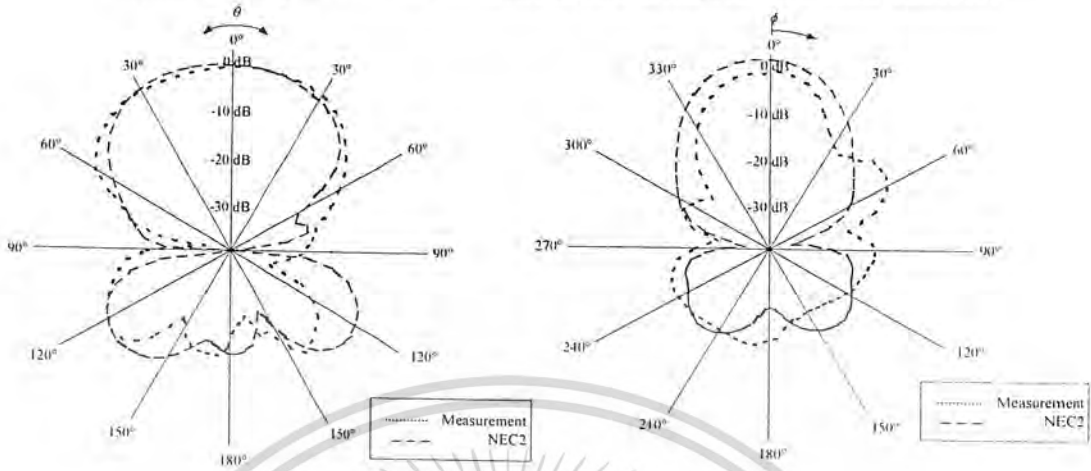
รูปที่ 4.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางตามแนวแกน y

จำนวน 2 องค์ประกอบ เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการคำนวณ และการทดสอบสายอากาศที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน y กล่าวคือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อพิจารณาลำคลื่นหลัก ทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง นั้นมีความใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างพบว่า ผลจากการทดสอบจะมีระดับลำคลื่นย่อย และระดับของจุดที่เป็นศูนย์ครั้งแรกจะมีค่าสูงกว่าการคำนวณ ที่ระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างและจุดที่เป็นศูนย์ครั้งแรกนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโปรแกรม NEC2 ส่วนลักษณะลำคลื่นที่ไม่สมมาตรกันทั้งสองด้าน ของผลการทดสอบนั้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากโพรปอร์ตัญญาณและตัวเชื่อมต่อที่อยู่ด้านล่างของสายอากาศเพียงด้านเดียว

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กนั้น เมื่อพิจารณาลำคลื่นหลักของสายอากาศ พบว่าในทุกกรณีมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกัน ไม่มีลำคลื่นย่อยด้านข้าง ผลที่ได้นี้จะมีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโปรแกรม NEC2

4.2.2.5 สายอากาศที่มีโครงสร้างวงตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 45 องศา
 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก



ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

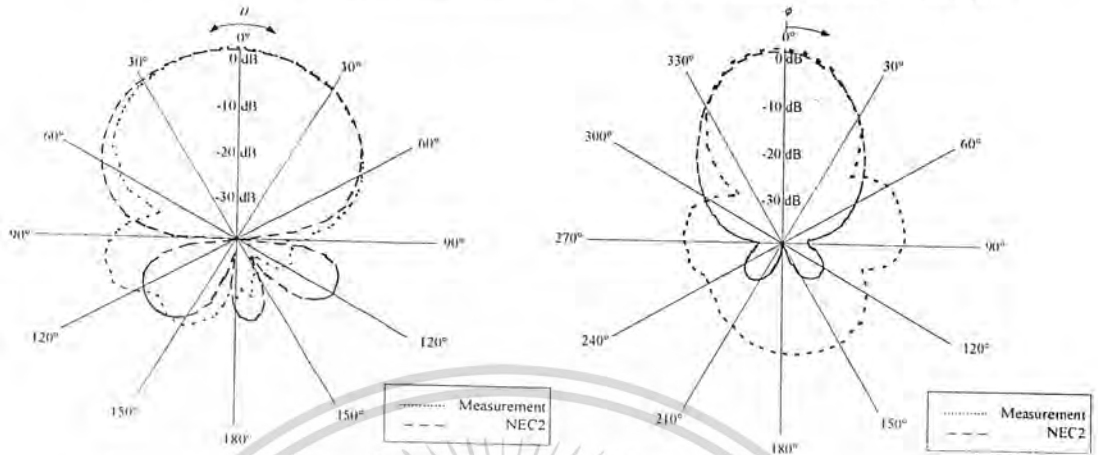
รูปที่ 4.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสองคัพประกอบเดี่ยว
 เมื่อวางบนตัวสะท้อนคลื่นมุม 45 องศา เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองจากโปรแกรม NEC2 และการทดสอบสายอากาศที่มี
 โครงสร้างวงตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 45 องศา แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ
 สนามไฟฟ้า เมื่อพิจารณาลำคลื่นหลัก นั้นมีความใกล้เคียงกัน และเกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างเล็กน้อย

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กนั้น เมื่อพิจารณาลำ
 คลื่นหลักของสายอากาศ พบว่าในทุกกรณีมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาลำคลื่นย่อย
 ด้านข้างด้านข้างของสายอากาศพบว่า ระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างและจุดที่เป็นศูนย์ครั้งแรกนี้จะมีค่า
 ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโปรแกรม NEC2

4.2.2.6 สายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 90 องศา

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก



ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

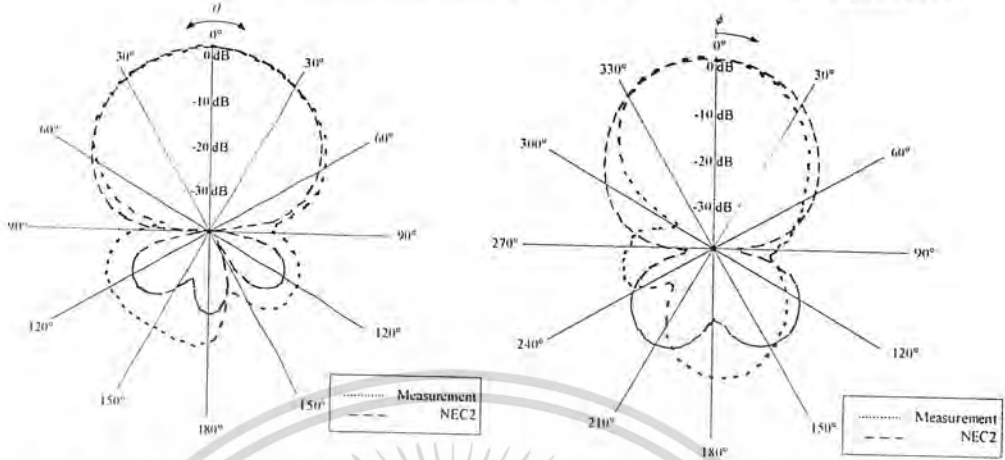
รูปที่ 4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสองคัพประกอบเดียว เมื่อวางบนตัวสะท้อนคลื่นมุม 90 องศา เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองจากโปรแกรม NEC2 และการทดสอบสายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 90 องศา แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อพิจารณาลำคลื่นหลัก นั้นมีความใกล้เคียงกัน และมีลำคลื่นย่อยด้านข้างเล็กน้อย

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กนั้น เมื่อพิจารณาลำคลื่นหลักของสายอากาศ พบว่าในทุกกรณีมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาลำคลื่นย่อยด้านข้างด้านข้างของสายอากาศพบว่า ระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างและจุดที่เป็นศูนย์ครั้งแรกนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโปรแกรม NEC2

4.2.2.7 สายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 180 องศา

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก



ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบเดียว เมื่อวางบนตัวสะท้อนคลื่นมุม 180 องศา เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองจากโปรแกรม NEC2 และการทดสอบสายอากาศที่มีโครงสร้างวางตัวสะท้อนคลื่นที่ทำมุม 180 องศา แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อพิจารณาลำคลื่นหลักนั้นมีความใกล้เคียงกัน และมีลำคลื่นย่อยด้านข้างเล็กน้อย

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กนั้น เมื่อพิจารณาลำคลื่นหลักของสายอากาศ พบว่าในทุกกรณีมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาลำคลื่นย่อยด้านข้างด้านข้างของสายอากาศพบว่า ระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างและจุดที่เป็นศูนย์ครั้งแรกนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโปรแกรม NEC2

สรุป ในบทนี้เป็นการแสดงการออกแบบ การสร้าง และการทดสอบสายอากาศ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลอง ผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศโดยโปรแกรม NEC2 และผลที่ได้จากวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณนั้นมีความสอดคล้องกัน

บทที่ 5
สรุปและวิจารณ์

บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม ของสายอากาศชนิดวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ โดยปริยญาณินพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษา การวิเคราะห์ คำนวณ ออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศชนิดวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบที่มีลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นแบบสองทิศทาง สำหรับสายอากาศแบบวงแหวนวงรีหนึ่งองค์ประกอบและสายอากาศแบบแถวลำดับ มีลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นแบบทิศทางเดียว สำหรับสายอากาศแบบตัวสะท้อนมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยสายอากาศแบบวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบ โดยจะเป็นการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศ โดยเริ่มจากนำสมการสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมาทำการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วยโปรแกรม Matcad และจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วย NEC2 เพื่อพิจารณาหาโครงสร้างและขนาดของสายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสม

สามารถสรุปเนื้อหาโดยรวมดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตโครงการ ขั้นตอนการศึกษาและเนื้อหาของปริยญาณินพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการ พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงรีระบบพิกัดทรงกระบอกวงรีสมการคลื่น ในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรีอินทิกรัล การแพร่กระจายคลื่นและฟังก์ชันช่วย สำหรับสายอากาศวงแหวนวงรีหนึ่งองค์ประกอบ สมการการแพร่กระจายคลื่นของตัวประกอบแถวลำดับ และสายอากาศแบบตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ทำมุม 45 90 และ 180 องศา และโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

บทที่ 3 กล่าวถึงการนำสมการสนามไฟฟ้าระยะไกลที่ได้จากบทที่ 2 มาคำนวณคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำวิเคราะห์คือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ในการศึกษาสายอากาศวงแหวนแบบวงรีกระตุ้นด้วยโพรบนี้ จำเป็นจะต้องอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในระบบพิกัดทรงกระบอกวงรีเนื่องจากว่าวงแหวนวงรีสามารถกำหนดขนาดวงแหวนด้วยพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ความยาวแกนหลัก (a) และความยาวแกนรอง (b) เพื่อใช้ควบคุมลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ด้วยข้อดีของสายอากาศแบบสองทิศทางที่มีลักษณะเป็นวงแหวนดังกล่าว ซึ่งประกอบด้วยข้อจำกัดของลักษณะวงแหวนแบบวงกลมและสี่เหลี่ยมมุมฉาก ในเรื่องการปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก อันเนื่องมาจากพารามิเตอร์ที่กำหนดขนาดของวงแหวนวงกลมมีเพียงพารามิเตอร์เดียว คือ ค่ารัศมี จึงขาดความยืดหยุ่นในการควบคุมลำคลื่น สำหรับวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากพารามิเตอร์ที่กำหนดขนาดของวงแหวนมีสองพารามิเตอร์ คือ ความกว้าง และความสูง ซึ่งจะทำให้การควบคุมลำคลื่นในระนาบทั้งสองมีความยืดหยุ่นมากกว่า แต่เนื่องจากว่าสี่เหลี่ยมมุมฉากมีมุมทั้ง 4 เป็นมุมฉาก คลื่นจึงเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบน (Diffraction Effect) ได้มาก ในส่วนของตัวสะท้อนแบบมุมนั้นได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อตัวสะท้อนทำมุม 45, 90 และ 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลที่ได้จากการพิจารณาคูณลักษณะของสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ร่วมกับระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนกับตัวป้อนสัญญาณ

บทที่ 4 เป็นการสร้างและทดสอบสายอากาศที่ได้จากการออกแบบ นำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้ จะเห็นได้ผลการทดสอบมีคุณลักษณะที่สอดคล้องกับการคำนวณ รูปแบบของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบและสร้างไว้มีลักษณะดังนี้ คือ ความถี่ใช้งาน 1.9 GHz มีความยาวคลื่นเท่ากับ 15.78 cm ซึ่งเป็นท่อนำคลื่นวงรีความยาวแกนหลัก $2a = 15\text{cm}$ ความยาวแกนรอง $2b = 5\text{cm}$ ความยาววงแหวนวงรี (d) = 0.15λ (2.3cm) ค่าความยาวโพรบ (l) = 0.25λ (3.9cm) ซึ่งค่าที่ได้มาจากการคำนวณและทดลองปรับเปลี่ยนค่า ความยาววงแหวนวงรี (d) สามารถแสดงผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระหว่าง การคำนวณด้วยวิธีสัณยศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม Matcad จนค่าที่ได้ส่งผลให้ได้ขนาดของลำคลื่นที่แคบและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุด จากนั้นใช้โพรบที่เป็นโพรบเชิงเส้นที่มีความยาวประมาณ 0.27 ของความยาวคลื่น (4.3cm.) ซึ่งทำให้หาค่า VSWR ไม่เกิน 1.5 จากสายอากาศได้นี้จะนำมาต่อเป็นแฉวลำดับเชิงเส้นและเชิงระนาบในแนวต่างๆ ดังนี้ เมื่อจัดเรียงตามแนวแกน x ระยะห่าง 1.5 ของความยาวคลื่น (23.6cm) ซึ่งรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นนั้น ในระนาบสนามไฟฟ้าก็ยังคงคล้ายกับที่ได้จากสายอากาศองค์ประกอบเดียว ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กนั้น ขนาดลำคลื่นจะแคบลงทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเพิ่มขึ้น เมื่อจัดเรียงตามแนวแกน y ระยะห่าง 0.9 ของความยาวคลื่น (14.2cm) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก ก็ยังคงคล้ายกับที่ได้จากสายอากาศองค์ประกอบเดียว ส่วนในระนาบสนามไฟฟ้านั้นขนาดลำคลื่นจะแคบลงทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเพิ่มขึ้น และเมื่อจัดเรียงตามแนวแกน z ระยะห่าง 1.5 ของความยาวคลื่น (11.0cm) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กจะเกิดลำคลื่นย่อยทางด้านข้างมากขึ้นไปในทางปฏิบัติไม่สามารถใช้งานได้จริง สายอากาศที่นำมาต่อเป็นแฉวลำดับเพื่อให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเพิ่มขึ้น และสามารถนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ได้มากที่สุด และเมื่อนำสายอากาศที่มีโครงสร้างวางบนตัวสะท้อนคลื่น เมื่อทำการพิจารณาระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนแบบมุม กับตัวป้อนสัญญาณที่ทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวและมีระดับของลำคลื่นย่อยให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ จะพบว่าเมื่อตัวสะท้อนทำมุมต่างกัน จะมีค่าระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนแบบมุมกับตัวป้อนสัญญาณที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางเดียว ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นกับสายอากาศวงแหวนวงรี มุมสะท้อนคลื่น 45 องศา $S = 1.5$ ของความยาวคลื่น (24.0cm) มุมสะท้อนคลื่น 90 องศา $S = 0.6$ ของความยาวคลื่น (9.0cm) มุมสะท้อนคลื่น 180 องศา $S = 0.2$ ของความยาวคลื่น (3.0cm)

สำหรับในกระบวนการทดสอบนั้น จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีค่าผิดเพี้ยนไปเล็กน้อยที่เกิดขึ้นจาก การทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นนั้น อาจเกิดจากระบบป้อนสัญญาณด้านตัวแบ่งกำลังงานที่เป็นตัวเชื่อมต่อแบบที่ผ่านสายนำสัญญาณแกนร่วม ที่มีความยาวเป็นจำนวนคี่เท่าของ $\frac{\lambda}{4}$ ที่ไม่สัมพันธ์กันอย่างแท้จริงระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด รวมถึงตัวต่อ (Connector) ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับสายอากาศ ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจจะทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศได้ ทำให้ผลที่ได้ผิดเพี้ยนไปเล็กน้อยไม่สมบูรณ์เหมือนกับผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ได้จากการวิเคราะห์ แต่ผลทดสอบโดยรวมแสดงให้เห็นว่า สายอากาศที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้ตรงตามความต้องการที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการเสนอสายอากาศชนิดวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบสำหรับแพร่กระจายคลื่นสองทิศทางเป็นสายอากาศที่ออกแบบที่ความถี่เท่ากับ 1.9 GHz โดยมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง คือ มีการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศด้านหน้าและด้านหลัง ดังนั้น การใช้งานของสายอากาศชนิดนี้ จึงเหมาะสำหรับระบบการสื่อสารที่ให้บริการในบริเวณพื้นที่แคบตามแนวยาว เช่น ทางด่วน ในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน เป็นต้น จากการศึกษายานอากาศโดยทั่วไป คลื่นจึงเดินทางได้สองทิศทางทำให้มีขนาดลำคลื่น (Beamwidth) ที่แคบ และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ที่ดีขึ้น สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมเหมาะสำหรับใช้งานระหว่างอาคารหรือสถานที่ที่ติดต่อกันแบบจุดต่อจุด เพราะสายอากาศชนิดนี้มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูง

และเมื่อทำการพิจารณา ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนแบบมุมกับตัวป้อนสัญญาณ ที่ทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวและมีระดับของลำคลื่นย่อยให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ จะพบว่าเมื่อตัวสะท้อนทำมุมต่างกัน จะมีค่าระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนแบบมุมกับตัวป้อนสัญญาณที่เหมาะสมแตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ต่างกัน และพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณเท่ากับขนาดมุมของ ตัวสะท้อนยิ่งแคบค่าความกว้างของลำคลื่นจะยิ่งแคบด้วยซึ่งจะมีผลทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศยิ่งสูงขึ้น แต่ก็จะทำให้ลำคลื่นย่อยด้านข้างสูงขึ้นเช่นกัน

สำหรับในกระบวนการทดสอบนั้นจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีค่าผิดเพี้ยนไปเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งอาจจะเกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำสายอากาศ รวมถึงความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด และยังพบว่าค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าน้อยกว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ได้จากการวิเคราะห์เพราะในกระบวนการวิเคราะห์นั้นใช้ขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์

จากการทดสอบ พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ดังนั้น สายอากาศแบบวงแหวนวงรีหนึ่งองค์ประกอบซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง จึงเหมาะสำหรับใช้ในพื้นที่ที่เป็นทางยาวแคบ เช่น บนทางด่วน และ ในอุโมงค์ เป็นต้น ส่วนสายอากาศแบบวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วย โพรบที่นำมาจัดเรียงแบบแถวลำดับ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง คือ กว้างในระนาบหนึ่ง และแคบในอีกระนาบ จึงเหมาะสำหรับใช้งานเกี่ยวกับระบบเรดาร์ และสายอากาศแบบวงแหวนวงรีกระตุ้นด้วยโพรบที่วางบนแผ่นระนาบเชิงมุม มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว เหมาะสำหรับใช้งานระหว่างอาคารหรือสถานที่ที่ติดต่อกันแบบจุดต่อจุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางของ NCW's (Tables of normalized cutoff wave numbers of elliptic cross section resonators)

ก) ตาราง γ_{nm}

ϵ/m	$n=0$					ϵ/m	$n=1$				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.100	0.902270	0.902305	0.902368	0.902457	0.902569	0.100	0.901135	0.901148	0.901168	0.901196	0.901234
0.200	0.808286	0.808360	0.808659	0.810657	0.811567	0.200	0.804149	0.804342	0.804679	0.805195	0.805908
0.300	0.717077	0.719415	0.722525	0.725013	0.726706	0.300	0.708566	0.709553	0.711397	0.714011	0.716674
0.400	0.627857	0.634184	0.640136	0.643723	0.645924	0.400	0.614022	0.617237	0.622822	0.628522	0.632773
0.500	0.539910	0.552357	0.560570	0.564866	0.567425	0.500	0.520187	0.528207	0.538926	0.546720	0.551995
0.600	0.452463	0.472177	0.481801	0.486542	0.489333	0.600	0.426739	0.442572	0.457346	0.466458	0.472414
0.700	0.364450	0.391108	0.401391	0.406322	0.409201	0.700	0.333240	0.358568	0.375596	0.385400	0.391692
0.800	0.273889	0.305242	0.315385	0.320168	0.322942	0.800	0.238916	0.272577	0.290111	0.299860	0.306034
0.900	0.175278	0.205672	0.214360	0.218404	0.220738	0.900	0.141276	0.177257	0.192787	0.201205	0.206479
0.925	0.147386	0.175766	0.183698	0.187380	0.189503	0.925	0.115349	0.149709	0.164000	0.171705	0.176521
0.950	0.116446	0.141463	0.148327	0.151506	0.153337	0.950	0.087837	0.118799	0.131267	0.137954	0.142124
0.975	0.079156	0.098366	0.103589	0.105994	0.107379	0.975	0.056764	0.081093	0.090628	0.095717	0.098883
0.990	0.048491	0.061439	0.064922	0.066531	0.067457	0.990	0.033176	0.049794	0.056219	0.059638	0.061763

ϵ/m	$n=2$					ϵ/m	$n=3$				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.100	0.902229	0.902176	0.902102	0.902010	0.901907	0.100	0.902254	0.902243	0.902228	0.902206	0.902178
0.200	0.807686	0.806985	0.806218	0.805624	0.805307	0.200	0.808044	0.807848	0.807525	0.807055	0.806509
0.300	0.714343	0.712007	0.710708	0.710150	0.711925	0.300	0.715856	0.714671	0.712983	0.711562	0.710990
0.400	0.620395	0.616892	0.617308	0.620649	0.624623	0.400	0.623901	0.620249	0.617587	0.617663	0.619961
0.500	0.524994	0.522883	0.528400	0.535634	0.541477	0.500	0.530104	0.524265	0.524299	0.529039	0.534316
0.600	0.428219	0.431583	0.443481	0.453192	0.460240	0.600	0.433031	0.428809	0.435604	0.444261	0.451334
0.700	0.330379	0.343361	0.359744	0.370868	0.378621	0.700	0.332894	0.336148	0.349554	0.360447	0.368635
0.800	0.231482	0.255407	0.273697	0.285227	0.293059	0.800	0.230589	0.245489	0.262411	0.274284	0.282841
0.900	0.130486	0.161080	0.178158	0.186440	0.195289	0.900	0.126214	0.150782	0.167608	0.178587	0.186265
0.925	0.104573	0.134612	0.150513	0.159992	0.166278	0.925	0.099514	0.124315	0.140684	0.150887	0.157975
0.950	0.077304	0.105441	0.119472	0.127759	0.133232	0.950	0.072187	0.098612	0.110791	0.119279	0.125985
0.975	0.047932	0.070722	0.081577	0.087930	0.092110	0.975	0.043279	0.063742	0.074847	0.081793	0.086559
0.990	0.026878	0.042729	0.050100	0.054391	0.057306	0.990	0.025402	0.037920	0.045520	0.050235	0.053457

ข) ตาราง γ'_{nm}

ϵ/m	$n=0$					ϵ/m	$n=1$				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.100	0.902285	0.902334	0.902411	0.902512	0.902633	0.100	0.901135	0.901148	0.901168	0.901196	0.901234
0.200	0.808515	0.809218	0.810180	0.811155	0.811975	0.200	0.804149	0.804342	0.804679	0.805195	0.805908
0.300	0.718151	0.721094	0.721983	0.722407	0.722407	0.300	0.708566	0.709553	0.711397	0.714011	0.716674
0.400	0.630987	0.637802	0.642410	0.645123	0.646857	0.400	0.614022	0.617237	0.622822	0.628522	0.632773
0.500	0.546819	0.557815	0.563454	0.566577	0.568552	0.500	0.520187	0.528207	0.538926	0.546720	0.551995
0.600	0.464937	0.478993	0.483140	0.488494	0.490510	0.600	0.426739	0.442572	0.457346	0.466458	0.472414
0.700	0.383462	0.398759	0.403011	0.408417	0.410564	0.700	0.333240	0.358568	0.375596	0.385400	0.391692
0.800	0.298433	0.313090	0.319017	0.322251	0.324291	0.800	0.238916	0.272577	0.290111	0.299860	0.306034
0.900	0.200547	0.212575	0.217499	0.220192	0.221891	0.900	0.141276	0.177257	0.192787	0.201205	0.206479
0.925	0.171195	0.182090	0.186563	0.189009	0.190553	0.925	0.115349	0.149709	0.164000	0.171705	0.176521
0.950	0.137559	0.146942	0.150801	0.152911	0.154242	0.950	0.087837	0.118799	0.131267	0.137954	0.142124
0.975	0.095409	0.102527	0.105453	0.107051	0.108059	0.975	0.056764	0.081093	0.090628	0.095717	0.098883
0.990	0.059399	0.064195	0.066161	0.067233	0.067909	0.990	0.033176	0.049794	0.056219	0.059638	0.061763

ϵ/m	$n=2$					ϵ/m	$n=3$				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.100	0.902242	0.902204	0.902140	0.902057	0.901958	0.100	0.902257	0.902249	0.902236	0.902218	0.902193
0.200	0.807887	0.807337	0.806572	0.805870	0.805411	0.200	0.808103	0.807957	0.807702	0.807304	0.806783
0.300	0.715202	0.713091	0.711095	0.710495	0.711171	0.300	0.716185	0.715336	0.713331	0.712163	0.711124
0.400	0.622354	0.617844	0.616418	0.618620	0.622608	0.400	0.625076	0.622103	0.618531	0.617176	0.618566
0.500	0.527572	0.522161	0.524658	0.532010	0.538721	0.500	0.533084	0.526450	0.523234	0.526238	0.531679
0.600	0.429498	0.426950	0.437167	0.448696	0.457036	0.600	0.438101	0.428806	0.431020	0.439968	0.447981
0.700	0.327523	0.333346	0.352169	0.365951	0.375206	0.700	0.337882	0.330979	0.342649	0.355378	0.364882
0.800	0.221735	0.241751	0.265888	0.280329	0.289707	0.800	0.231127	0.234772	0.254665	0.268995	0.279031
0.900	0.112495	0.147969	0.171292	0.184213	0.192424	0.900	0.118188	0.138755	0.160442	0.173869	0.182926
0.925	0.084676	0.122439	0.144196	0.156119	0.163639	0.925	0.089108	0.113406	0.134023	0.146533	0.154906
0.950	0.056657	0.094712	0.113953	0.124388	0.130958	0.950	0.059714	0.086364	0.104912	0.115964	0.123307
0.975	0.028433	0.042388	0.077333	0.085351	0.090374	0.975	0.030012	0.055636	0.070284	0.078855	0.084505
0.990	0.011398	0.037025	0.047220	0.052646	0.056035	0.990	0.012042	0.032308	0.042404	0.048240	0.052067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) ตาราง $\gamma_{0,mm}$

$r \setminus m$	$n = 1$					$n = 2$				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.100	0.903402	0.903414	0.903433	0.903457	0.903486	0.100	0.902269	0.902280	0.902295	0.902315
0.200	0.812397	0.812567	0.812806	0.813080	0.813361	0.200	0.808278	0.808433	0.808656	0.808939
0.300	0.725464	0.726205	0.727096	0.727947	0.728673	0.300	0.717039	0.717768	0.718769	0.719934
0.400	0.641329	0.643282	0.635214	0.646753	0.647915	0.400	0.627742	0.629861	0.632498	0.635116
0.500	0.558787	0.562636	0.565729	0.567880	0.569394	0.500	0.539641	0.544294	0.549230	0.553367
0.600	0.476507	0.482733	0.486851	0.489468	0.491238	0.600	0.451922	0.460274	0.467573	0.472944
0.700	0.392671	0.401326	0.406171	0.409075	0.410987	0.700	0.363470	0.376176	0.385336	0.391524
0.800	0.304075	0.314546	0.319671	0.322621	0.324529	0.800	0.272242	0.288791	0.298890	0.305340
0.900	0.202616	0.213101	0.217736	0.220326	0.221977	0.900	0.172735	0.190329	0.199740	0.205514
0.925	0.172532	0.182433	0.186717	0.189097	0.190609	0.925	0.144636	0.161469	0.170229	0.175558
0.950	0.138278	0.147128	0.150885	0.152959	0.154271	0.950	0.113579	0.128820	0.136552	0.141218
0.975	0.095658	0.102593	0.105483	0.107068	0.108070	0.975	0.076458	0.088557	0.094548	0.098134
0.990	0.059461	0.064211	0.066168	0.067238	0.067912	0.990	0.046362	0.054724	0.058802	0.061229

$r \setminus m$	$n = 3$					$n = 4$				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.100	0.902234	0.902245	0.902234	0.902222	0.902210	0.100	0.902256	0.902250	0.902242	0.902232
0.200	0.808070	0.807975	0.807977	0.807864	0.807896	0.200	0.808084	0.807996	0.807839	0.807775
0.300	0.716127	0.715921	0.715998	0.716418	0.717127	0.300	0.716129	0.715766	0.715440	0.715285
0.400	0.625310	0.625430	0.626281	0.628462	0.630589	0.400	0.625091	0.624372	0.624270	0.625007
0.500	0.534764	0.536399	0.539921	0.543901	0.547507	0.500	0.533783	0.533348	0.534905	0.537818
0.600	0.443838	0.448759	0.455435	0.461368	0.466142	0.600	0.441282	0.442908	0.447719	0.453151
0.700	0.351858	0.361720	0.371316	0.378663	0.384211	0.700	0.346961	0.353082	0.361587	0.369018
0.800	0.257588	0.272822	0.284257	0.292261	0.298074	0.800	0.250090	0.262314	0.273548	0.282094
0.900	0.157275	0.175413	0.186623	0.194019	0.199242	0.900	0.148190	0.164965	0.176655	0.184840
0.925	0.129829	0.147573	0.158117	0.164990	0.169816	0.925	0.120871	0.137715	0.148840	0.156802
0.950	0.100145	0.116545	0.125945	0.132002	0.136230	0.950	0.091795	0.107729	0.117756	0.124557
0.975	0.065767	0.079038	0.086394	0.091080	0.094332	0.975	0.058946	0.072120	0.080049	0.085348
0.990	0.038961	0.048241	0.053280	0.056467	0.058670	0.990	0.034165	0.043494	0.048962	0.052582

ตาราง $\gamma'_{0,mm}$

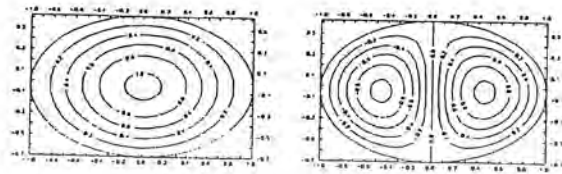
$r \setminus m$	$n = 1$					$n = 2$				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.100	0.904348	0.903491	0.903455	0.904461	0.903482	0.100	0.902268	0.902274	0.902287	0.902304
0.200	0.815808	0.812779	0.812801	0.813006	0.813764	0.200	0.808267	0.808355	0.808342	0.8085795
0.300	0.732145	0.726449	0.726908	0.727682	0.728425	0.300	0.716693	0.717402	0.718265	0.719361
0.400	0.652193	0.643248	0.644741	0.646297	0.647548	0.400	0.627516	0.628814	0.631202	0.633903
0.500	0.573843	0.562344	0.565001	0.567797	0.568958	0.500	0.539113	0.540078	0.547006	0.551565
0.600	0.494782	0.482041	0.485970	0.488827	0.490775	0.600	0.450859	0.456545	0.464515	0.475025
0.700	0.413048	0.400338	0.405241	0.408432	0.410532	0.700	0.361527	0.371015	0.381755	0.389082
0.800	0.324145	0.318428	0.318779	0.320273	0.324111	0.800	0.268913	0.282793	0.29167	0.302892
0.900	0.218063	0.212005	0.216967	0.219824	0.221631	0.900	0.167359	0.184576	0.196413	0.203382
0.925	0.185745	0.181322	0.186002	0.186635	0.190292	0.925	0.138710	0.156063	0.167150	0.173596
0.950	0.148620	0.146137	0.150246	0.152551	0.153994	0.950	0.107251	0.123985	0.133842	0.139502
0.975	0.102251	0.101751	0.104971	0.106747	0.107852	0.975	0.070328	0.084734	0.092444	0.096810
0.990	0.063066	0.063584	0.065804	0.067012	0.067760	0.990	0.041428	0.052067	0.057360	0.060328

$r \setminus m$	$n = 3$					$n = 4$				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.100	0.902258	0.902250	0.902240	0.902228	0.902216	0.100	0.902258	0.902253	0.902246	0.902237
0.200	0.808111	0.808070	0.807929	0.807871	0.807869	0.200	0.808118	0.808041	0.807943	0.807830
0.300	0.716278	0.715987	0.715908	0.716160	0.716739	0.300	0.716285	0.715944	0.715585	0.715326
0.400	0.625576	0.625220	0.625874	0.627459	0.629528	0.400	0.625507	0.624663	0.624198	0.624519
0.500	0.534933	0.535252	0.538024	0.541958	0.545813	0.500	0.534517	0.533283	0.533855	0.536247
0.600	0.443361	0.445873	0.452184	0.458651	0.463990	0.600	0.442025	0.441488	0.445972	0.450491
0.700	0.349877	0.356665	0.367024	0.375455	0.381790	0.700	0.346753	0.349301	0.357441	0.365591
0.800	0.253132	0.266037	0.279473	0.288897	0.295606	0.800	0.247397	0.256099	0.268518	0.278318
0.900	0.149766	0.168346	0.182156	0.190995	0.197069	0.900	0.141682	0.157779	0.171721	0.181335
0.925	0.121681	0.140841	0.153951	0.162193	0.167814	0.925	0.113455	0.130750	0.144194	0.153239
0.950	0.091648	0.110454	0.122252	0.129544	0.134479	0.950	0.083752	0.101331	0.113603	0.121672
0.975	0.057782	0.074177	0.083511	0.089178	0.092983	0.975	0.051140	0.066943	0.076781	0.083104
0.990	0.032692	0.044851	0.051301	0.055170	0.057754	0.990	0.027931	0.039855	0.046708	0.051047

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

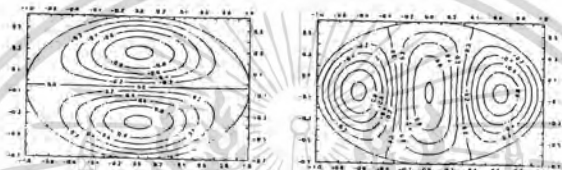
ภาคผนวก ข

คอนทัวร์สนาม E_z ในโหมด TM เมื่อ $e = 0.75$



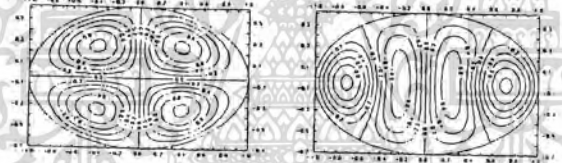
(ก) TM_{C01}

(ข) TM_{C11}



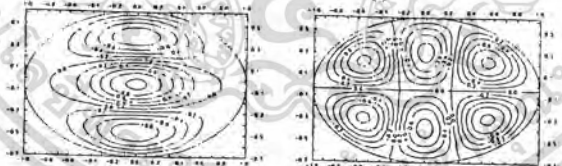
(ค) TM_{S11}

(ง) TM_{C02}



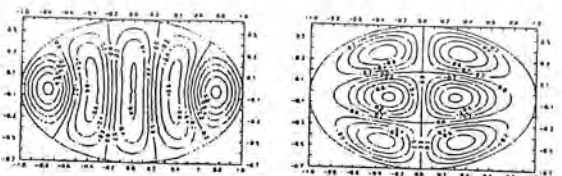
(จ) TM_{C21}

(ฉ) TM_{C12}



(ซ) TM_{S02}

(ซ) TM_{C31}



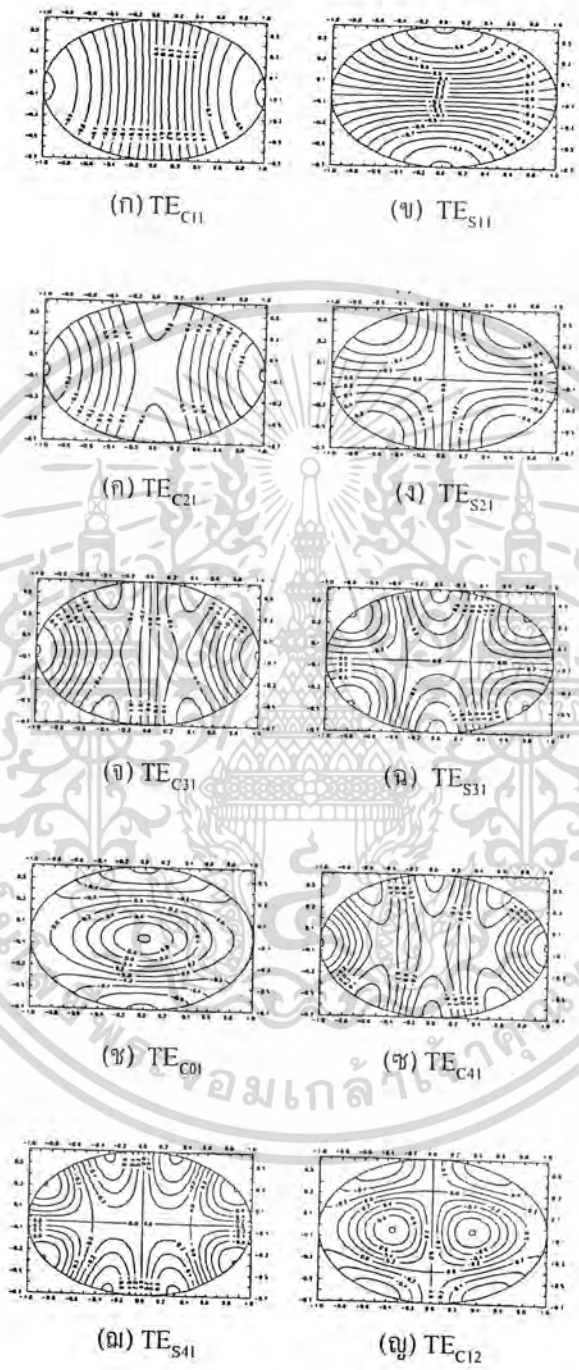
(ณ) TM_{C13}

(ญ) TM_{S31}

รูปที่ ข.1 คอนทัวร์สนาม E_z ในโหมด TM เมื่อ $e = 0.75$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนทัวร์สนาม H_z ในโหมด TE เมื่อ $e = 0.75$



รูปที่ ข.2 คอนทัวร์สนาม H_z ในโหมด TE เมื่อ $e = 0.75$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำทางด้านเทคนิคและดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้เกิดขึ้นได้ เพราะคณะผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จาก คุณ กฤตยา นาคประสิทธิ์ ที่ได้ให้คำชี้แนะและความรู้ทางด้านต่างๆ อีกทั้งยังคอยตรวจตรางานของกลุ่มผู้วิจัยเสมอมา

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] โมไนย ไกรฤกษ์ "ทฤษฎีสายอากาศ", คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [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., 1997
- [4] R. E. Collin, "Antennas and Radiowave Propagation," McGraw-Hill International Editions, 1985
- [5] L. J. Chu, "Electromagnetic waves in elliptic hollow pipes of metal," J. Appl. Phys., vol. 9, pp. 583-591, Sept. 1938.
- [6] N. W. McLachlan, "Theory and Application of Math Functions," New York: Dover, 1964.
- [7] F. A. Alhargan and S. R. Judah, "Tables of Normalized cutoff wave numbers of elliptic cross section resonators," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 42, no. 2, pp. 333-338, Feb. 1994.
- [8] J. G. Kretzschmar, "Wave propagation in hollow conducting elliptical waveguides," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-18, pp. 547-554, Sept. 1970.
- [9] B. K. Wang, K. Y. Lam, M. S. Leong, and P. S. Kool, "Elliptical waveguide analysis using improved polynomial approximation," IEEE Proc. Microw. Antennas Propag. Vol. 141, No. 6, pp.483-488, Dec. 1994.
- [10] Micrologic research, "Cellular2002: A Study of the Worldwide Cellular Telephone Market," Prentice -Hall, 2002.
- [11] G. J. Burke A.J. Poggio. Numerical Electromanetics Code (NEC) – Methode of Moments, Parts I-III. Lawrence Livermore Nat. Lab. Livermore, CA, 1981

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้