

สายอากาศแฉกลำดับแบบเกลียวบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลมที่ให้ลำคลื่นรูปกรวย
และการโพลาไรซ์แบบวงกลม

A CIRCULAR HELIX ARRAY ANTENNA RADIATING CIRCULARLY
POLARIZED CONICAL BEAM PATTERN



โดย
นายดำรง บุญรอด
นายอุทัย ทองขาว

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

รพ.
๑๙๙๓
๙๕๙

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 46443
วัน, เดือน, ปี..... 2 JUL 2546

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแถวลำดับแบบเกลียวบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลมที่ให้ลำคลื่นรูปกรวย
และการโพลาไรซ์แบบวงกลม

A CIRCULAR HELIX ARRAY ANTENNA RADIATING CIRCULARLY
POLARIZED CONICAL BEAM PATTERN



โดย

นายดำรง บุญรอด 42015056

นายอุทัย ทองขาว 42015083

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. สมผล โกศลวิตร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศแถวลำดับแบบเกลียวบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลมที่ให้ลำคลื่นรูปกรวยและการโพลาไรซ์
แบบวงกลม

A Circular Helix Array Antenna Radiating Circularly Polarized Conical Beam Pattern

ผู้จัดทำ

1. นายดำรง นุญรอด 42015056
2. นายอุทัย ทองขาว 42015083

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร. สมพล โกศลวิตร)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแฉวลำดับแบบเกลียวบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลม
ที่ให้ลำคลื่นรูปกรวยและการโพลาไรซ์แบบวงกลม

A Circular Helix Array Antenna Radiating Circularly
Polarized Conical Beam Pattern

โดย นาย ดำรง บุญรอด 42015056

นาย อูทัย ทองขาว 42015083

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สมผล โกศลวิตร

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรนำเสนอกการศึกษา การคำนวณ การวิเคราะห์ การออกแบบ การสร้าง และการทดสอบสายอากาศแฉวลำดับของสายอากาศชนิดเกลียวที่จัดวางบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลมโดยส่วนแรก จะทำการวิเคราะห์หองค้ประกอบของสายอากาศชนิดเกลียวในโหมดตั้งฉาก ในส่วนนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่า อัตราส่วนแกนของสายอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆเช่น ค่าตัวประกอบของขดเกลียว และค่า มุมเอียงของเกลียว เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการใช้งาน

ในส่วนที่สองเป็นการนำสายอากาศชนิดเกลียวในส่วนแรกที่มีมากกว่าสององค้ประกอบ มาจัด เรียงเป็นแฉวลำดับวงกลม แล้วทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อเปลี่ยนค่า พารามิเตอร์ต่างๆ คือ ขนาดรัศมีของแฉวลำดับวงกลม จำนวนองค้ประกอบของแฉวลำดับ อัตราส่วนแกน ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และค่ามุมที่สนามสูงสุดใบนระนาบมุมยก ข้อดีของสายอากาศชนิดนี้คือจะให้ลำ คลื่นรูปกรวยที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม ซึ่งมีประโยชน์ในการนำไปใช้สำหรับระบบสื่อสารดาวเทียม เคลื่อนที่โดยไม่ต้องมีระบบติดตามเป้าหมาย

ABSTRACT

This project presents the study, calculation, analysis, design, fabrication and experiment of an array antenna using helix on circular plane. The first part, we will analyse helical antenna in normal mode. This part investigates the axial ratio for various parameters such as winding factor and pitch angle for obtaining optimum parameters.

The second part, helical antenna in part one of more than two elements are placed to form circular array. Then the radiation pattern for various parameters viz.,the array radius and the number of elements are demonstrated. Guidelines for the antenna design to realize the desired directivity and elevation angle are illustrated. The advantages of this antenna have realized the conical beam pattern with the circular polarization which is useful for using in the mobile satellite communication that the tracking system is not necessary.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีหรือหลักการ	3
2.1 สายอากาศ	3
2.2 หลักการพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่น	5
2.3 คุณสมบัติของสายอากาศ	8
2.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	9
2.5 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทซ์	15
2.6 ความหนาแน่นของพลังงานที่แพร่กระจาย	15
2.7 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	16
2.8 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)	17
2.9 ชนิดของสายอากาศ	20
2.10 สายอากาศชนิดคลื่นเกลียว (Helical antenna)	23
2.11 แถวลำดับ (Array)	26
2.12 สายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแถวลำดับวงกลม (Helical Circular Array)	29
2.13 การออกแบบไมโครสตริปใช้เป็นจุดป้อนสัญญาณ	30
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	32
3.1 โครงสร้างของสายอากาศ	32
3.2 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศชนิดเกลียวในกรณีขนาดรัศมีของแผ่นระนาบ ตัวนำมีขนาดอนันต์	33
3.3 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ในการออกแบบ	34
3.4 คุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	39
3.5 โครงสร้างของสายอากาศ (วางแบบแถวลำดับวงกลม)	44
3.6 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	44
3.7 คุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	45
3.8 การออกแบบสายอากาศ	53
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	55
4.1 การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR)	55
4.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์	56
4.3 การทดสอบวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss)	57
4.4 ช่วงกว้างแถบความถี่ใช้งาน	57
4.5 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	58

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	63
ภาคผนวก	64
กิตติกรรมประกาศ	98
เอกสารอ้างอิง	99



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สายอากาศเป็นเสมือนอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งผ่านคลื่น	3
รูปที่ 2.2 Transmission- line- Thevenin equivalent ของสายอากาศในโหมดการส่ง	4
รูปที่ 2.3 เงื่อนไขขอบเขตความเข้มสนามแม่เหล็ก	7
รูปที่ 2.4 ระบบ โคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	10
รูปที่ 2.5 แบบรูปของสายอากาศชี้ทิศทาง (ออมนิไดเรกชันแนล)	11
รูปที่ 2.6 แบบรูปหลักสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร	11
รูปที่ 2.7 a) ลำคลื่น (Lobe) ต่างๆและความกว้างลำคลื่น (Beam width) ของแบบรูปสายอากาศ b) แบบรูปในแบบลิเนียร์	12
รูปที่ 2.8 แสดงการแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	13
รูปที่ 2.9 รูปแสดงค่าจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน	14
รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบของโคเรคทีวิตีที่เป็น 2 มิติ และ 3 มิติของสายอากาศไดโพล ความยาว $\lambda/2$	19
รูปที่ 2.11 สายอากาศแบบเส้นลวด	20
รูปที่ 2.12 สายอากาศแบบช่องเปิด	20
รูปที่ 2.13 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและวงกลม	21
รูปที่ 2.14 สายอากาศแบบเรียงแถวลำดับของสายอากาศเส้นลวด ไมโครสตริป และ สายอากาศช่องเปิด	22
รูปที่ 2.15 สายอากาศแบบสะท้อน	22
รูปที่ 2.16 สายอากาศแบบเลนส์	23
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของแถวลำดับแบบวงกลม	28
รูปที่ 2.18 โครงสร้างของไมโครสตริป	31
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลม	32
รูปที่ 3.2 ค่าตัวประกอบของขดเกลียว (ξ) ของสายอากาศชนิดเกลียว	33
รูปที่ 3.3 ค่าสนามในองค์ประกอบแนวตั้งและแนวนอนที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียง ของเกลียวเมื่อเปลี่ยนค่าองค์ประกอบของขดเกลียวของสายอากาศ	35
รูปที่ 3.4 ค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของค่าตัวประกอบของขดเกลียวของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่ามุมเอียงของเกลียว	36
รูปที่ 3.5 ค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียงของเกลียวเมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมี ของขดเกลียว	37
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบของขดเกลียวและค่ามุมเอียงของเกลียวที่ ทำให้มีการ โพลาริซวงกลมเมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมีของขดเกลียว	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียงของเกลียว เมื่อกำหนดให้ค่าตัวประกอบของขดเกลียว มีค่าเท่ากับ 0.5	38
รูปที่ 3.8 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เป็นฟังก์ชันของค่าตัวประกอบของขดเกลียว เมื่อกำหนดค่ามุมเอียงของเกลียวมีค่าเท่ากับ 14 องศา	39
รูปที่ 3.9 แสดงระดับความแตกต่างระหว่างการ โพลาริซ์ร่วม และการ โพลาริซ์ไขว้ในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาด	40
รูปที่ 3.10 (ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก (ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด	41
รูปที่ 3.11 ค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อ $\alpha = 14$ องศา และ $\xi = 0.5$	42
รูปที่ 3.12 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อ $\alpha = 14$ องศา และ $\xi = 0.5$	43
รูปที่ 3.13 โครงสร้างของสายอากาศแฉวลำดับชนิดเกลียวบนแผ่นระนาบตัวนำ	44
รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด เมื่อเปลี่ยนรัศมีของแฉวลำดับ	46
รูปที่ 3.15 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยกที่เป็นฟังก์ชันของขนาดรัศมีแฉวลำดับ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแฉวลำดับเป็น 2, 4 และ 8	47
รูปที่ 3.16 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยกที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแฉวลำดับเป็น 2, 4 และ 8	48
รูปที่ 3.17 ค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างในระนาบมุมกวาดระหว่างองค์ประกอบของแฉวลำดับ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแฉวลำดับเป็น 2, 4 และ 8	49
รูปที่ 3.18 ค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดที่เป็นฟังก์ชันของขนาดรัศมีแฉวลำดับ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแฉวลำดับเป็น 2, 4 และ 8	49
รูปที่ 3.19 ค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของขนาดรัศมีของแฉวลำดับ เมื่อเปลี่ยนจำนวน องค์ประกอบของแฉวลำดับเป็น 2, 4 และ 8	50
รูปที่ 3.20 ค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแฉวลำดับเป็น 2, 4 และ 8	51
รูปที่ 3.21 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากที่สุดที่เป็นฟังก์ชันของขนาดรัศมีของแฉวลำดับ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแฉวลำดับเป็น 2, 4 และ 8	52
รูปที่ 3.22 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากที่สุดที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแฉวลำดับเป็น 2, 4 และ 8	52
รูปที่ 3.23 โครงสร้างของสายอากาศแฉวลำดับชนิดเกลียวบนแผ่นระนาบตัวนำ	53
รูปที่ 3.24 ดันแบบของสายอากาศที่สร้างขึ้นมา	54
รูปที่ 3.25 สายอากาศเมื่อนำไปประกอบกับแท่นวาง	54

รูปที่ 4.1 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแฉวลำดับที่ได้จากการทดลอง	55
รูปที่ 4.2 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแฉวลำดับที่ได้จากการทดลอง	56
รูปที่ 4.3 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศชนิดเกลียวที่ได้จากการทดลอง	57
รูปที่ 4.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก	58
รูปที่ 4.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด	59
รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกของสายอากาศชนิดเกลียวองค์ประกอบ เดี่ยวเมื่อรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเท่ากับ 0.394λ และเทียบกับทางทฤษฎี	60
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดของสายอากาศชนิดเกลียวองค์ประกอบ เดี่ยวเมื่อรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเท่ากับ 0.394λ และเทียบกับทางทฤษฎี	60
รูปที่ 4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกของสายอากาศชนิดเกลียวองค์ประกอบ เดี่ยวเมื่อรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเท่ากับ 0.78λ และเทียบกับทางทฤษฎี	61
รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดของสายอากาศชนิดเกลียวองค์ประกอบ เดี่ยวเมื่อรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเท่ากับ 0.78λ และเทียบกับทางทฤษฎี	61
รูปที่ 4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแฉว ลำดับวงกลม 4 องค์ประกอบ และเทียบกับทางทฤษฎี	62
รูปที่ 4.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแฉว ลำดับวงกลม 4 องค์ประกอบ และเทียบกับทางทฤษฎี	62

บทที่ 1

บทนำ

สายอากาศเป็นที่ยอมรับว่าเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบสื่อสารที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave ; EW) ส่งผ่านบรรยากาศทั้งหลาย โดยสายอากาศทำหน้าที่รับ-ส่งสัญญาณที่ถูกผสม (Modulation) ด้วยกรรมวิธีต่างๆ โดยส่วนมากจะเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยวิธีเหนี่ยวนำกระแสกลายเป็นคลื่นวิทยุ (Radio wave) ส่งผ่านตัวกลางอากาศไปยังเครื่องรับ สายอากาศที่เครื่องรับก็จะรับสัญญาณที่เข้ามาเปลี่ยนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำส่งไปยังระบบอื่นๆเพื่อการสื่อสารต่อไป ซึ่งเป็นเหตุผลให้สายอากาศได้รับการพัฒนาให้ตอบสนองความต้องการของการใช้งานโดยเสมอมา ประกอบกับในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายและการสื่อสารแบบเคลื่อนที่ไม่ว่าจะเป็นระบบเซลลูลาร์ ระบบพังก์ (Trunk) โมบายล์ (Mobile) เรดิโอ (Radio) และการสื่อสารดาวเทียมโดยตรง ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก จึงได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาสายอากาศที่จะประยุกต์ใช้กับระบบเหล่านี้

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศเป็นจำนวนมาก ซึ่งสายอากาศแต่ละชนิดได้นำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต่างกัน สายอากาศที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวก็ได้รับความนิยมการประยุกต์ใช้งานเป็นสายอากาศที่สถานีฐานของโทรศัพท์ระบบเคลื่อนที่ โดยทั่วไปนิยมใช้สายอากาศไดโพล ซึ่งให้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวและมีการโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear polarization) แต่หากต้องการแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวและมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular polarization) จำเป็นต้องใช้สายอากาศชนิดเกลียว (Helical antenna)

ความเป็นมาของสายอากาศชนิดเกลียว

- ในปี ค.ศ.1947 H.A. Wheeler [3] ได้รายงานว่าสายอากาศที่ประกอบด้วยขดลวดหลายรอบและมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นนั้นสามารถกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นรูปโดนัทนอกจากนี้ถ้าปรับเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศกับระยะห่างระหว่างรอบของสายอากาศให้พอเหมาะ สายอากาศจะมีการแพร่กระจายคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม ซึ่งช่วงกว้างแถบความถี่ (Frequency bandwidth) ของสายอากาศแบบนี้ค่อนข้างแคบ
- ต่อมาในปี ค.ศ.1949 J.D. Kraus ได้แสดงให้เห็นว่าสายอากาศชนิดเกลียวนั้น นอกจากจะสามารถกระจายคลื่นในแนวตั้งฉากกับแกนของสายอากาศและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นรูปโดนัทแล้วยังสามารถกระจายคลื่นตามแนวแกนของสายอากาศได้อีกด้วย ถ้าสายอากาศนั้นมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่น และเมื่อใช้สายอากาศแบบนี้กับ กราวด์เพลน (Ground plane) คลื่นก็จะกระจายออกไปทิศทางเดียว ทำให้เหมาะต่อการนำไปใช้ติดต่อสื่อสารระหว่างคู่สถานี

สายอากาศชนิดเกลียวสามารถแบ่งประเภทตามโหมดการแพร่กระจายคลื่นได้สองประเภทกล่าว

คือ โหมดตามแกน (Axial mode) ซึ่งจะมีการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นหลักทิศทางเดียว (Unidirectional) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

beam) ตามแนวแกน และโหมดตั้งฉาก (Normal mode) ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว (Omnidirectional beam)

โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับชนิดเกลียวประกอบด้วยสายอากาศชนิดเกลียวจำนวน N องค์ประกอบ มาจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบวงกลมบนแผ่นระนาบตัวนำ เพื่อให้มีการแพร่กระจายคลื่นครึ่งเดียวและมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงขึ้น โดยสายอากาศชนิดเกลียวที่นำมาจัดเรียงนี้ถูกออกแบบให้มีการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริไรซ์วงกลมชนิดหมุนขวา รวมทั้งได้วิเคราะห์ค่าอัตราส่วนแกนเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นอกจากนี้ยังได้คำนวณค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เป็นฟังก์ชันของตัวประกอบของชนิดเกลียวและค่ามุมเอียงของเกลียวด้วย เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศชนิดเกลียว แล้วทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับชนิดเกลียวเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กล่าวคือ ขนาดรัศมีของแถวลำดับวงกลม จำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับ อัตราส่วนแกน ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง และค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยกเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศที่สมบูรณ์



บทที่ 2

ทฤษฎีหรือหลักการ

2.1 สายอากาศ

ในระบบสื่อสารมีการใช้คลื่นเพื่อรับ-ส่งข้อมูล คลื่นดังกล่าวได้จากการป้อนกำลังงานจากเครื่องส่งผ่านสายส่งสัญญาณ (Transmission Line) ไปยังสายอากาศ และสายอากาศจะแผ่รังสีพลังงานออกไปในอากาศด้วยความเร็วประมาณเท่ากับความเร็วของคลื่นแสง ส่วนทางด้านรับก็จะรับพลังงานผ่านสายอากาศผ่านสายส่ง ไปยังเครื่องรับ

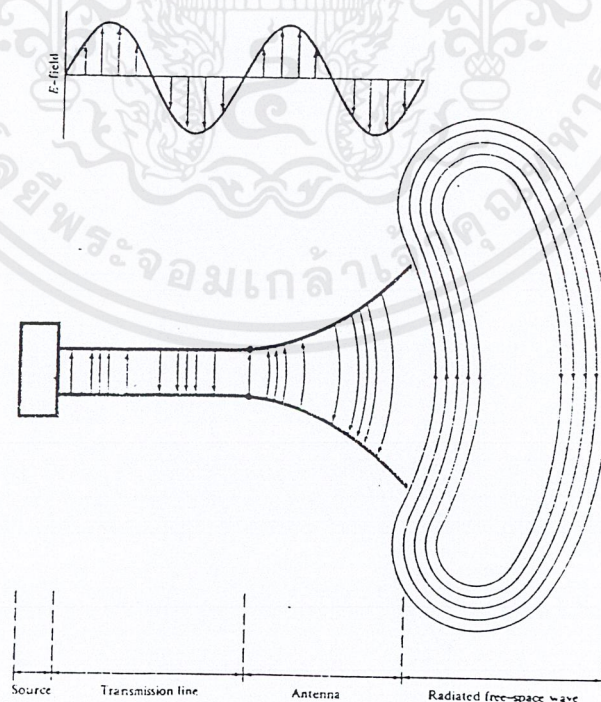
สายอากาศเป็นส่วนสำคัญของทางเครื่องส่งและเครื่องรับ สายอากาศส่วนใหญ่ทำจากลวดตัวนำ เป็นท่อนกลวงหรือตัน โครงสร้างเป็นเส้นตรงหรือโค้งงอแล้วแต่ชนิดของสายอากาศ ซึ่งสายอากาศมักจะมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่น สายอากาศสามารถทำหน้าที่ได้ทั้งส่งและรับ จึงมีคุณสมบัติเหมือนกัน ดังนั้น จึงมีคำจำกัดความของสายอากาศไว้ต่าง ๆ ดังนี้

สายอากาศ ได้มีผู้ให้คำจำกัดความของสายอากาศไว้หลายอย่าง ดังนี้

“สายอากาศ คือ อุปกรณ์ประเภทโลหะที่อาจเป็นแท่งกลมหรือเส้นลวด ใช้สำหรับการแพร่กระจายคลื่น หรือรับคลื่นวิทยุ”

“สายอากาศ หมายถึง การแพร่กระจายคลื่น หรือการรับคลื่นวิทยุ”

“สายอากาศ คือ สิ่งที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการส่งผ่านคลื่นระหว่างช่องว่างอิสระ (free-space) กับอุปกรณ์นำคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.1”

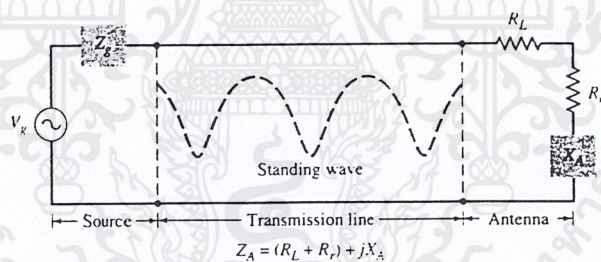


รูปที่ 2.1 สายอากาศเป็นเสมือนอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งผ่านคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์นำคลื่นหรือสายส่งสัญญาณอาจเป็นสายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial Cable) หรือท่อนำคลื่น (Waveguide) ซึ่งใช้ในการส่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดเครื่องส่ง ผ่านไปยังสายอากาศ หรือจากสายอากาศไปยังเครื่องรับ โดยที่จะต้องมียาสอากาศส่งก่อนแล้วจึงค่อยมีสายอากาศรับในภายหลัง

สายส่งสัญญาณพร้อมระบบสายอากาศตามรูปที่ 2.1 สามารถที่จะเขียนเป็นสมการเทเวนิน (Thevenin Equivalent) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งแหล่งกำเนิดแทนด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในอุดมคติ (Ideal Generator) และสายส่งแทนด้วยเส้นขีดโดยมีอิมพีแดนซ์ลักษณะ (Characteristic Impedance) เป็น Z_c และสายอากาศแทนด้วย load Z_A [$Z_A = (R_L + R_r) + j X_A$] ต่ออยู่กับสายส่ง สำหรับความต้านทานของโหลด (Load resistance ; R_L) ใช้เพื่อแทนการสูญเสียเนื่องจากตัวนำและฉนวนที่สัมพันธ์กับโครงสร้างของสายอากาศ ขณะที่ R_r คือ ความต้านทานในการแผ่กระจาย (Radiation resistance) ใช้แทนการแผ่กระจายของสายอากาศ รีแอกแตนซ์ (Reactance ; X_A) ใช้แทนค่าอิมพีแดนซ์ในทางจินตภาพที่สัมพันธ์กับการแผ่กระจายคลื่นโดยสายอากาศ ภายใต้กรณีที่ เป็นอุดมคติพลังงานที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดควรจะเป็นพลังงานรวมทั้งส่งผ่านไปยังความต้านทานในการแผ่กระจาย (R_r) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียในตัวนำและฉนวนอันเนื่องมาจากธรรมชาติในสายส่งและสายอากาศเกิดขึ้น เช่นเดียวกันก็จะมี การสูญเสียอันเนื่องจากการสะท้อนกลับของคลื่นบางส่วนที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งและสายอากาศ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งกับสายอากาศไม่สอดคล้องกัน (Mismatch impedance) ด้วย



รูปที่ 2.2 Transmission - line Thevenin equivalent ของสายอากาศในโหมดการส่ง

คลื่นสะท้อน (Reflected waves) ที่เกิดขึ้นจะวิ่งไปตามทางพร้อมๆ กับคลื่นเดินทาง (Travelling wave) ที่มาจากแหล่งกำเนิดตรงไปยังสายอากาศผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นคลื่นนิ่ง (Standing waves) และภายในสายส่งจะมีพลังงานสะสมอยู่ ซึ่งถือว่าสายส่งเป็นอุปกรณ์รีโซแนนซ์ รูปภาพของคลื่นนิ่งแสดงด้วยเส้นขีดในรูปที่ 2.2 ถ้าระบบสายอากาศไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ นั่นคือในสายส่งจะมีการเก็บพลังงานของอีลิเมนต์ไว้เป็นจำนวนมาก แทนที่จะเป็นการนำคลื่น (Wave guiding) ก็จะกลายเป็นอุปกรณ์ในการส่งพลังงานออกไป ถ้าค่าสูงสุดของความเข้มสนามของคลื่นนิ่งถูกทำให้มีค่ามากๆ ก็จะสามารถเป็นเหตุให้เกิดคลื่นนิ่ง (Standing wave) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในสายส่ง

การสูญเสียอันเนื่องมาจากสายส่ง สายอากาศ และ การเกิดคลื่นนิ่ง เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ การสูญเสียในสายส่งสามารถทำให้ลดน้อยลงได้ โดยการเลือกใช้สายส่งที่มีการสูญเสียต่ำ ขณะที่สายอากาศ

สามารถลดการสูญเสียได้โดยการลดค่าความต้านทานการสูญเสีย ซึ่งแทนด้วย R_L ดังในรูปที่ 2.2 สำหรับคลื่นนิ่งสามารถลดลงได้และพลังงานที่สะสมอยู่ในสายส่งก็ทำให้ต่ำสุดได้ โดยการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Load) ให้มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง

2.2 หลักการพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่น

สายอากาศเป็นโครงสร้างซึ่งมักจะถูกสร้างจากวัสดุที่เป็นตัวนำที่ดี ที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีรูปร่างและขนาดที่จะแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นที่ทราบกันดีว่ากระแสซึ่งมีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นสายอากาศจึงมีโครงสร้างซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งมักจะทำได้โดยใช้สายส่งกำลังหรือท่อนำคลื่นซึ่งอาจมีรูปร่างแตกต่างกันไปมากมาย อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติโครงสร้างซึ่งมีรูปร่างที่ทำได้ง่ายประหยัดจะได้รับคามนิยมนิยมนในการใช้งาน ในการที่แพร่กระจายคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างน้อยที่สุดสายอากาศต้องมีขนาดเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นที่แพร่กระจาย

ถ้ารู้ความหนาแน่นของกระแส \mathbf{J} ที่ป้อนให้กับสายอากาศ เราสามารถที่จะคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายได้แต่ความยุ่งยากอยู่ที่การคำนวณหาความหนาแน่นของกระแส \mathbf{J} บนสายอากาศที่จะทำให้สนามที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตบนสายอากาศนั้นไม่ใช่เรื่องง่าย

เนื่องจากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) เป็นสมการเชิงเส้น ดังนั้นถ้ารู้การแพร่กระจายคลื่นจากฟิลาเมนต์ขนาดจิ๋ว คือ IdL แล้วเราสามารถที่ใช้หลักการทับซ้อน (Superposition) เพื่อหาสนามที่แพร่กระจาย จากกระแสซึ่งมีการแจกแจงรูปร่างใด ๆ ได้ โดยรวมสนามที่ถูกสร้างแต่ละองค์ประกอบของกระแสเข้าด้วยกัน วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ใช้ทั่วไปในการคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศสมการแมกซ์เวลล์และเงื่อนไขขอบเขต โดยจะเกี่ยวข้องกันโดยพื้นฐานกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาลักษณะสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal) ดังนั้นจะวิเคราะห์ตามแบบเฟสเซอร์ทั่วๆ ไป ซึ่งจะไม่แสดงแพคเตอร์ที่แสดงการแปรผันกับเวลา $e^{j\omega t}$ จะแสดงกระแสและสนามเป็นเวกเตอร์ฟังก์ชันของตำแหน่งโคออดิเนต และโดยทั่วไปแต่ละส่วนประกอบจะเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนซึ่งประกอบด้วยส่วนของค่าจริงและค่าจินตภาพตัวอย่างจะเขียนสนามไฟฟ้าอยู่ในรูปต่อไปนี้

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_x(\vec{r})\vec{a}_x + \vec{E}_y(\vec{r})\vec{a}_y + \vec{E}_z(\vec{r})\vec{a}_z \quad (2.1)$$

ในโคออดิเนตทรงสี่เหลี่ยม แต่ละส่วนประกอบ เช่น E_x เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนอยู่ในรูป $E_{xr} + jE_{xi}$ โดย E_{xr} เป็นค่าจริง และ E_{xi} เป็นค่าจินตภาพ ถ้าต้องการรู้สนามไฟฟ้าทางกายภาพจริงๆ จะหาได้โดยคูณ $\vec{E}(\vec{r})$ ด้วย $e^{j\omega t}$ แล้วหาค่าจริงของผลคูณนี้ นั่นคือ

$$\mathcal{E}(\vec{r}, t) = \text{Re } \vec{E}(\vec{r})e^{j\omega t} \quad (2.2)$$

ซึ่งจะได้

$$\mathcal{E}_x(\vec{r}, t) = E_{xr}(\vec{r})\cos\omega t + E_{xi}(\vec{r})\sin\omega t \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับส่วนประกอบของ X ของสนามในทางกายภาพ

ปริมาณของสนาม 4 ปริมาณที่เราสนใจได้แก่ ความเข้มสนามไฟฟ้า $\vec{E}(\vec{r})$ ความเข้มสนามแม่เหล็ก $\vec{H}(\vec{r})$ ความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า $\vec{D}(\vec{r})$ และ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก $\vec{B}(\vec{r})$ สนามเหล่านี้ตลอดจนต้นกำเนิดของสนามคือความหนาแน่นของกระแส $\vec{J}(\vec{r})$ และความหนาแน่นของประจุสัมพันธ์กันด้วยสมการแมกซ์เวลล์ ดังนี้คือ

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (\text{กฎของฟาราเดย์}) \quad (2.4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \vec{D} + \vec{J} \quad (\text{กฎทั่วไปของแอมแปร์}) \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{กฎของเกาส์}) \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{ความต่อเนื่องของเส้นแรงแม่เหล็ก}) \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = -j\omega \rho \quad (\text{กฎความต่อเนื่อง}) \quad (2.8)$$

ในช่องว่างอิสระมีความสัมพันธ์ว่า

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.9)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.10)$$

เมื่อ $\epsilon_0 = 10^9/36\pi$ ฟารัดต่อเมตร เป็นค่าสภาพยอม (Permittivity) ของช่องว่างอิสระและ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรีต่อเมตรเป็นค่าความซาบซึมได้ (Permeability) ของช่องว่างอิสระในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียพลังงาน ซึ่งมีค่าสภาพยอม ϵ และค่าความนำ σ จะมีกระแสนำ (Conduction Current) \vec{J}_c ไหลมีค่าเท่ากับ $\sigma \vec{E}$ ถ้ารวมกระแสนำ \vec{J}_c นี้เข้ากับกระแสที่เราป้อนเข้าไป \vec{J} สมการ(2.5) จะกลายเป็นดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= (j\omega\epsilon + \sigma) \vec{E} + \vec{J} \\ &= j\omega \left(\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \right) \vec{E} + \vec{J} \end{aligned} \quad (2.11)$$

อาจเรียกเทอม $\left(\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \right)$ ว่าเป็นค่าสภาพยอมเชิงซ้อนโดยทั่วไปสารไดอิเล็กตริกจะมีค่าสูญเสียพลังงานรวมอยู่นอกเหนือจากค่าความนำ ดังนั้นแม้ว่า σ จะเป็นศูนย์ แต่ก็ยังเป็นค่าเชิงซ้อนอยู่ในรูป $\epsilon' - j\epsilon''$ เมื่อไรก็ตามที่เราต้องเกี่ยวข้องกับสารไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียพลังงานเราจะใช้ค่าสภาพยอมเชิงซ้อนและคิดการสูญเสียจากการนำกระแสว่าเป็นส่วนของค่าจินตภาพ ϵ''

คำตอบของสมการแมกซ์เวลล์จะยังไม่สมบูรณ์จนกว่าจะได้ใส่เงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมเข้าไป สำหรับในกรณีสนามที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมได้แก่

$$\vec{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J}_s \quad (2.12)$$

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \times \vec{n} = \vec{M}_s \quad (2.13)$$

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ผิว J_s และกระแสแม่เหล็กที่ผิว M_s ไหลอยู่ในบริเวณรอยต่อของตัวกลางที่เป็นแบบโฮโมจีเนียส (Homogeneous) 2 ชนิด ซึ่งมีพารามิเตอร์เป็น $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$ และ $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$ ตามลำดับ จะเป็นศูนย์ นอกเสียจากจะใช้แผ่นแม่เหล็กสมบูรณ์ และหน่วยที่ตั้งฉากที่ผิว จะชี้จากตัวกลางที่ 1 ไปยังตัวกลางที่ 2 ผลคูณเชิงเวกเตอร์ (Cross Product) ของเวกเตอร์กับหน่วยที่ตั้งฉากจะทำให้เกิดเป็นส่วนประกอบของสนามในแนวสัมผัสกับรอยต่อและสมการข้างต้นสามารถเขียนได้ใหม่เป็นดังนี้

$$H_{\tan 2} = H_{\tan 1} + J_s \quad (2.14)$$

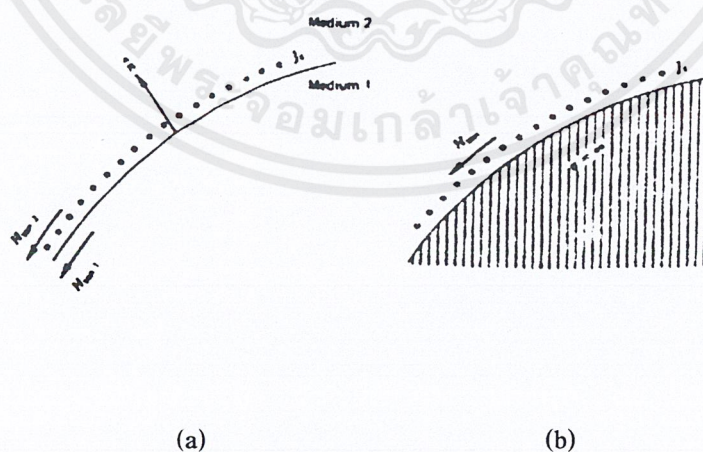
$$E_{\tan 2} = E_{\tan 1} + M_s \quad (2.15)$$

ถ้าด้านหนึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์เงื่อนไขขอบเขตจะกลายเป็นดังต่อไปนี้

$$H_{\tan} = J_s \quad (2.16)$$

$$E_{\tan} = 0 \quad (2.17)$$

เงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัส สำหรับกรณีทั่วไปแสดงไว้ในรูป 2.3 (a) สำหรับในกรณีที่ตัวนำข้างหนึ่งเป็นสมบูรณ์ ได้แสดงไว้ในรูป 2.3 (b) จะสังเกตว่าสนามทั้งหมดในสมการของขอบเขตถูกคำนวณที่รอยต่อ และสมการนี้ใช้ได้ตลอดทุกจุดตลอดแนวรอยต่อ



รูปที่ 2.3 เงื่อนไขขอบเขตความเข้มสนามแม่เหล็ก

(a) กรณีทั่วไป

(b) กรณีที่ตัวกลางหนึ่งเป็นตัวนำที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์เกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากต้นกำเนิดของสนามที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งได้รวบรวมกฎต่าง ๆ เขียนเป็นสมการทั่วไปเรียกว่าสมการแมกซ์เวลล์ หากแก้สมการเหล่านี้ให้เป็นตามเงื่อนไขของต้นกำเนิดสนามอย่างเหมาะสมแล้วจะสามารถทำนายปรากฏการณ์เกี่ยวกับสายอากาศได้ สำหรับในการศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศสิ่งแรกที่เราจะต้องหาได้คือสนามไฟฟ้า เพราะจะนำไปสู่การคำนวณหาคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ

2.3 คุณสมบัติของสายอากาศ

การเลือกใช้สายอากาศขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณที่ใช้ ยิ่งสัญญาณมีความถี่สูงมากเท่าไรก็จะทำให้ต้องใช้ตัวนำของสายอากาศสั้นมากเท่านั้น สายอากาศที่เป็นแบบเรโซแนนซ์ ดังเช่นสายอากาศที่ใช้ในย่านความถี่ 30 ถึง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ มักจะมีความยาวครึ่งลูกคลื่น สายอากาศยังมีความยาวเท่าใดก็สามารถส่งหรือรับสัญญาณได้มากเท่านั้น ที่ความยาวเรโซแนนซ์ของสายอากาศจะทำให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด สำหรับคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศมีดังต่อไปนี้

2.3.1 การต่อสายอากาศกับดิน (Grounded)

สายอากาศที่ทำงานโดยไม่มี การเชื่อมต่อกับดิน (Ungrounded) จะถูกเรียกว่ามีสองขั้วหรือที่เรียกว่า ไดโพล (Dipole) ในแต่ละขั้วจะมีกระแสไหล โดยมีแหล่งกำเนิดสัญญาณเดียวกันอยู่ที่ตรงกลาง การต่อเทียบดินไม่มีความจำเป็น เพราะตัวคาปาซิเตอร์ของสายอากาศจะอยู่ระหว่างขั้วทั้งสอง ส่วนสายอากาศที่มีการเชื่อมต่อกับดินจะมีการต่อขั้วหนึ่งของสายอากาศลงดิน ส่วนอีกข้างหนึ่งทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กระแสในสายอากาศจะไหลเข้าตัวนำข้างเดียว สายอากาศดังกล่าวเรียกว่าชนิดแอลหัวกลับ (Inverted-L type)

2.3.2 การกระจายของตัวนำ (Inductance) และตัวเก็บประจุ (Capacitance)

บนสายอากาศที่เป็นสายตัวนำหรือแท่งตัวนำนั้น ที่ความถี่สูงในทางไฟฟ้าจะเป็นตัวนำ กระจายอยู่บนสายอากาศข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่งอย่างอนุกรม (L) และในขณะเดียวกันก็จะมีตัวเก็บประจุต่ออยู่อย่างขนานตลอดสายตัวนำ (C) สำหรับสายอากาศแบบไดโพลจะมีค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างขั้วทั้งสองแต่สายอากาศแบบต่อลงดินจะมีค่าคาปาซิแตนซ์เทียบกับดิน

2.3.3 งานสายอากาศแบบเรโซแนนซ์ (Resonant Antennas)

ค่าของตัวนำ (L) และคาปาซิเตอร์ (C) ทำให้สายอากาศเสมือนเป็นวงจรเรโซแนนซ์ที่ต่ออย่างอนุกรม ถึงแม้จะไม่มีตัวนำและตัวเก็บประจุต่ออยู่จริง สายอากาศก็จะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับวงจร LC ความยาวของสายอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นจะเป็นตัวกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ โดยทั่วไปที่ความยาวครึ่งลูกคลื่นของความถี่ที่ต้องการ มักจะใช้เป็นความยาวของสายอากาศ ความยาวดังกล่าวใช้กับสายอากาศที่ไม่ต่อลงดิน หรือที่เรียกว่า ไดโพลครึ่งคลื่น สำหรับสัญญาณความถี่ต่ำสายอากาศแบบเรโซแนนซ์ที่ความยาวหนึ่งในสี่ของคลื่น จะเหมาะสมและมักจะใช้กับสายอากาศแบบต่อลงดิน

2.3.4 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายนั้นเป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป ที่อธิบายทิศทาง และขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแสดงโพลาไรเซชัน จะแสดงการกวาดของยอดแอมพลิจูดสนามไฟฟ้า ที่เวลาต่าง ๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป

สำหรับโพลาไรเซชันของสายอากาศ ในทิศทางหนึ่งทิศทางใด จะเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายส่ง) หรือเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้น จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีเกนมากที่สุด ดังนั้นโพลาไรเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกันจะแตกต่างกัน

ตัวนำสายอากาศสามารถติดตั้งในแนวตั้งหรือแนวนอนก็ได้ ไม่ว่าจะเป็นอย่างใด สนามไฟฟ้าก็จะมีทิศทางเดียวกับแนวการตั้งสายอากาศ ทิศทางการโพลาไรเซชันของคลื่นวิทยุจะขึ้นอยู่กับทิศทางของแนวสนามไฟฟ้า (E) สำหรับสายอากาศในแนวตั้ง คลื่นวิทยุที่ส่งออกมาจะมีทิศทางเป็นโพลาไรเซชันในแนวตั้ง (Vertical Polarization) เช่นกัน หากสายอากาศด้านส่งเป็นโพลาไรเซชันในแนวนอน (Horizontal Polarization) เช่นเดียวกันเพื่อที่จะรับสัญญาณได้ดีที่สุดสายอากาศทางด้านรับก็ต้องเป็นโพลาไรเซชันในแนวนอนด้วย ตัวอย่างเช่นในระบบโทรทัศน์นั้นคลื่นที่ส่งออกมาจะเป็นโพลาไรเซชันในแนวนอน นอกเหนือสายอากาศที่มีการโพลาไรเซชันในแต่ละแนว ก็ได้มีการพัฒนาสายอากาศที่มีทั้งโพลาไรเซชันในแนวตั้งและแนวนอนอยู่ร่วมกันในลักษณะที่ตั้งฉากกัน เรียกว่าโพลาไรเซชันแบบวงกลม (Circular Polarization) ข้อดีของแบบนี้คือ สามารถรับสัญญาณได้ทั้งสองทิศทาง

การแบ่งชนิดของโพลาไรเซชันอาจแบ่งออกได้เป็นแบบโพลาไรเซชันเชิงเส้น (Linearly Polarization) โพลาไรเซชันแบบวงกลม และโพลาไรเซชันแบบวงรี (Elliptically Polarization) ขึ้นอยู่กับลักษณะ ของการหมุนยอด ของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า ถ้าแอมพลิจูดที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในสเปซ ซึ่งเป็นเส้นตรงเสมอจะเรียกว่าเป็น โพลาไรเซชันแบบเส้นตรงหรือโพลาไรเซชันเชิงเส้น แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีการหมุนรูปวงรีจะเรียกสนามแบบนี้ว่าเป็นโพลาไรเซชันแบบวงรี ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา คือเมื่อมองตามหลังคลื่นแล้วจะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกาจะเรียกว่าโพลาไรเซชันหมุนขวา ในขณะที่สนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จะเรียกว่าเป็นโพลาไรเซชันหมุนซ้าย

2.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

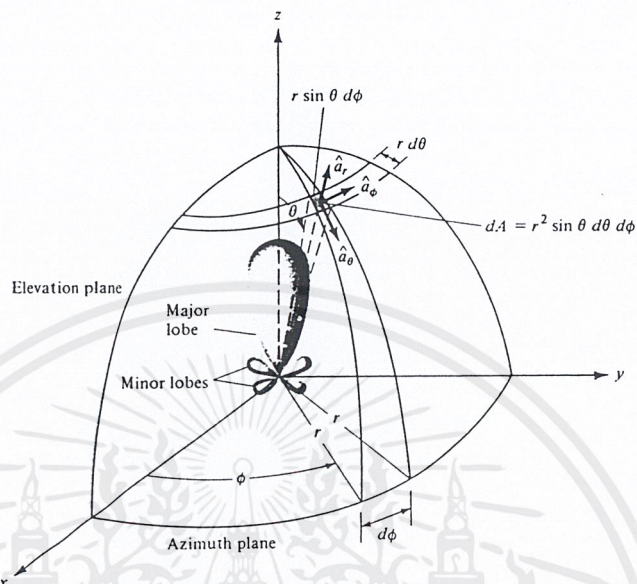
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far field)

การอธิบายคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) เฟส (Phase) หรือ โพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงของพลังงานเป็นฟังก์ชัน ของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.4 ระบบโคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power Pattern)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่มีชื่อเรียกว่าแบบรูปของสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น



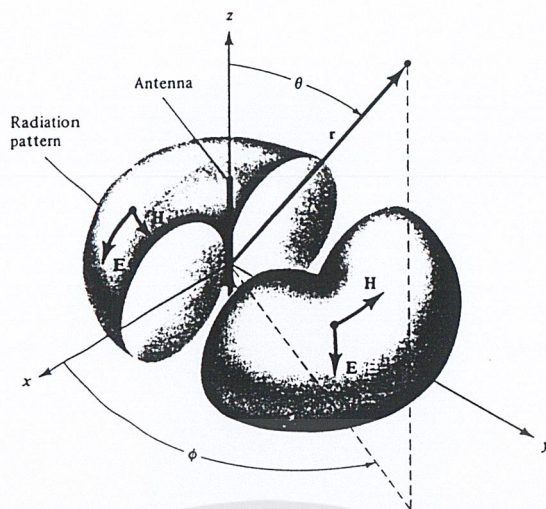
รูปที่ 2.4 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

2.4.1 แบบรูปแบบไอโซทรอปิก ไครเรชันแนล และออมนิไดเรชันแนล

ตัวแพร่คลื่นไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) คือ สายอากาศที่ถูกสมมติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น พอยท์ซอร์ส (Point Source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional Antenna) ซึ่งคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้มีดังแสดงในรูปที่ 2.5

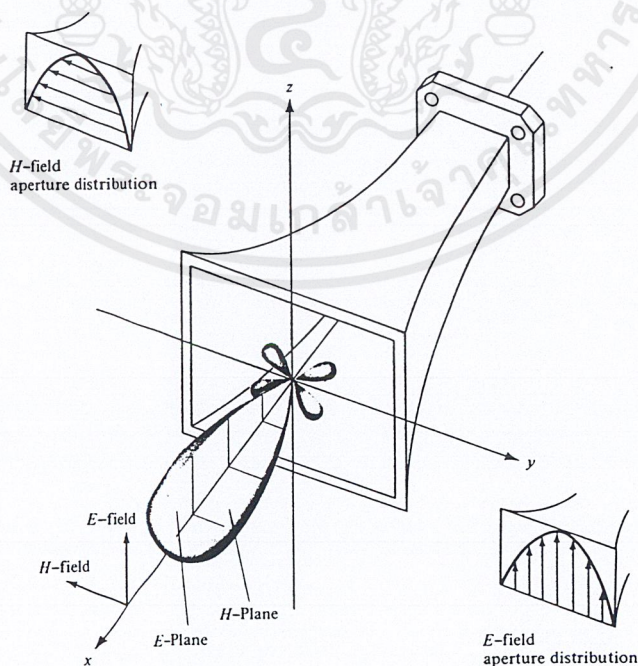
ตามรูปจะเห็นว่าแบบรูปแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) [$f(\phi)$, $\theta =$ ค่าคงที่] แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบมุมยก (Elevation Plane) [$g(\theta)$, $\phi =$ ค่าคงที่] แบบรูปแบบรอบทิศทางนี้เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปของสายอากาศชี้ทิศทาง



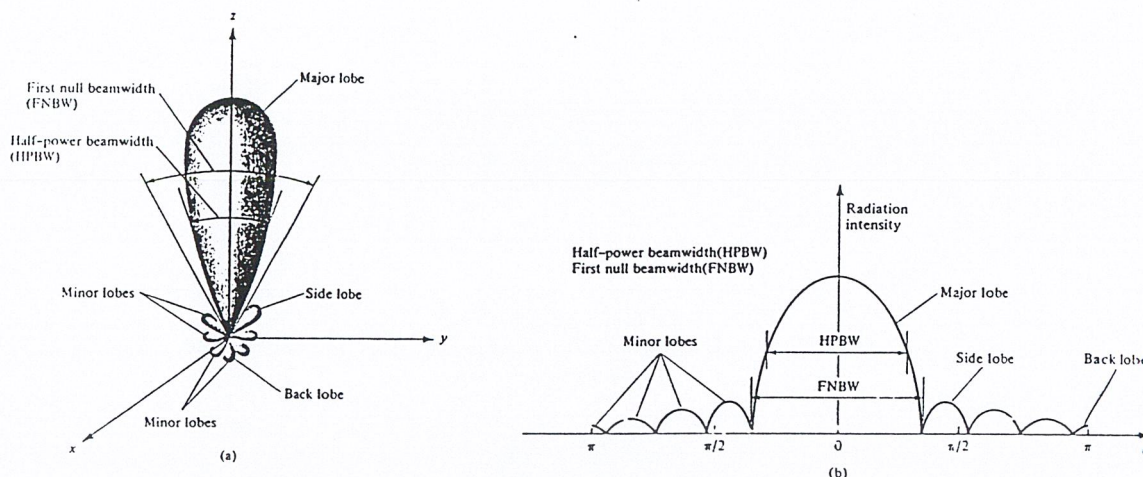
รูปที่ 2.5 แบบรูปของสายอากาศชีทิศทาง (ออมนิไดเรกชันแนล)

2.4.2 แบบรูปหลัก

เราอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแบบรูปหลัก (Principal Pattern) ของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H สำหรับสายอากาศที่โพลาไรซ์เชิงเส้น แบบรูปในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปหลักมีดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยมีระนาบ XZ (ระนาบยก, $\phi = 0$) เป็นระนาบ E หลักและมีระนาบ XY (ระนาบกวาด, $\theta = \pi/2$) เป็นระนาบ H หลัก



รูปที่ 2.6 แบบรูปหลักสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร



รูปที่ 2.7 (a) ลำคลื่น (Lobe) ต่างๆและความกว้างลำคลื่น (Beam width) ของแบบรูปสายอากาศ
(b) แบบรูปในแบบเชิงเส้น

2.4.3 ลำคลื่น (Lobe) ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

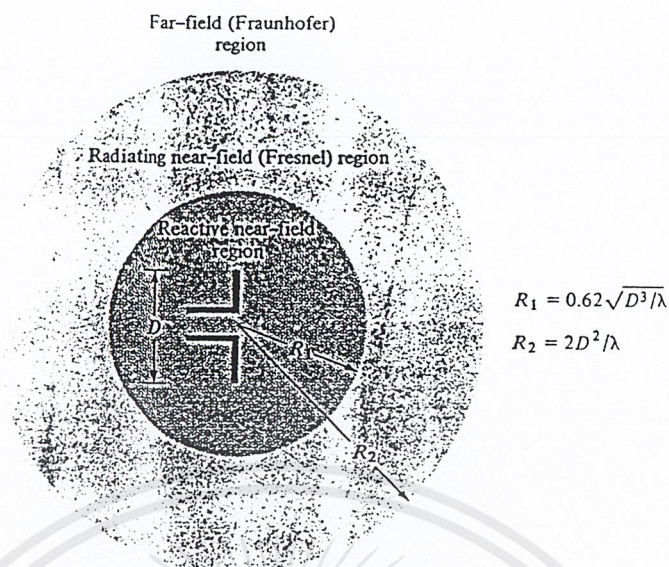
ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูปที่ 2.7 แสดงแบบรูปเชิงขั้ว (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นลำคลื่นแบบต่าง ๆ ดังนี้

ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 2.7 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิด อาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่นสายอากาศแยก빔 (Split Beam Antenna)

ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ลำคลื่นอื่น ๆ นอกเหนือไปจากลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ติดกับลำคลื่นหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้น้อยที่สุด ระดับของลำคลื่นย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe Ratio) หรือระดับของลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของลำคลื่นด้านข้างน้อยกว่า -20dB



รูปที่ 2.8 แสดงการแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

2.4.4 บริเวณต่าง ๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive - Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating - Near Field) และสนามระยะไกล (Far Field) ดังแสดงใน รูปที่ 2.8

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ จากผิวของสายอากาศ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศเมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R \leq \frac{2D^2}{\lambda}$

บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง R มากกว่า $\frac{2D^2}{\lambda}$ จากสายอากาศ

ในบริเวณนี้สนามมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า R เท่ากับ $\frac{2D^2}{\lambda}$ และขอบนอกเป็นอนันต์

2.4.5 เรเดียนและสเตอเรเดียน

การวัดมุมบนระนาบจะมีหน่วยเป็นเรเดียน หนึ่งเรเดียนเป็นมุมบนระนาบ ซึ่งยอดของมุมอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมรัศมีที่มีรัศมี r และถูกปิดด้วยส่วนของเส้นรอบวง ซึ่งยาว r ดังแสดงในรูปที่ 2.9(a) เนื่องจากเส้นรอบวงที่มีรัศมี r มีความยาว $c = 2\pi r$ ดังนั้นบนหนึ่งรอบของวงกลม จะมี 2π เรเดียน ($\frac{2\pi r}{r}$)

การวัดมุมตันมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน (sr) หนึ่งสเตอเรเดียนเป็นมุมตันที่มียอดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมที่มีรัศมี r ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (b) เนื่องจากพื้นที่ของทรงกลมรัศมี r มีค่าเท่ากับ $4\pi r^2$ ดังนั้นตลอดทรงกลมจะมี 4π sr ($\frac{4\pi r^2}{r^2}$)

ตามรูปที่ 2.4 พื้นที่ขนาดจิ๋ว dA บนผิวของทรงกลมรัศมี r จะคำนวณได้เป็น

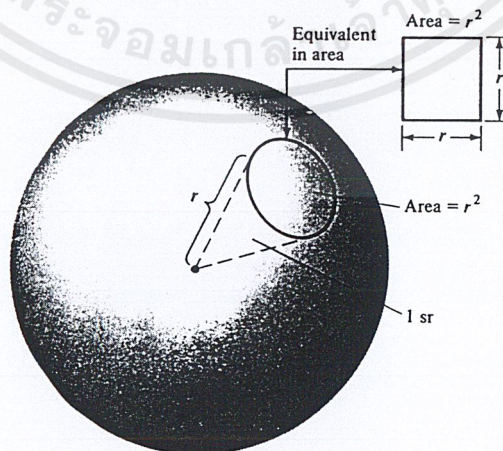
$$dA = r^2 \sin(\theta)d\theta d\phi \quad (\text{m}^2) \quad (2.18)$$

ดังนั้นเอเลเมนต์ ของมุมตัน ของทรงกลมเขียนได้เป็น

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin(\theta)d\theta d\phi \quad (\text{sr}) \quad (2.19)$$



(a) Radian



(b) Steradian

รูปที่ 2.9 รูปแสดงคำจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์

ความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth : HPBW) เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุดหรือที่ตำแหน่งที่ -3dB ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เพื่อความสะดวกต่อไปจะใช้คำย่อ HPBW แทน

2.6 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลางถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานและกำลังงานไฟฟ้า โดยใช้ตัวความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้แก่ พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (Instantaneous Poynting Vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\omega = \mathcal{E} \times \mathcal{H} \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$\omega = \text{พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (W/m}^2\text{)}$$

$$\mathcal{E} = \text{ความเข้มสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลานั้น (V/m)}$$

$$\mathcal{H} = \text{ความเข้มสนามแม่เหล็กชั่วขณะเวลานั้น (A/m)}$$

เนื่องจากพอยดิงเวกเตอร์มีความหมายแสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นผิวปิดจะสามารถหาได้โดยอินทิเกรตส่วนของพอยดิงเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวทั้งหมด ซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$\mathcal{P} = \oint \omega_0 \cdot \bar{ds} = \oint \omega_0 \cdot \bar{nda} \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$\mathcal{P} = \text{กำลังงานทั้งหมดซึ่งขณะเวลานั้น (W)}$$

$$da = \text{พื้นที่จันวนพื้นที่ปิด (m}^2\text{)}$$

ในกรณีของสนามที่แปรผันกับเวลา มักจะหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของกำลังงานได้โดยการอินทิเกรตค่าพอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น ตลอด 1 คาบ แล้วหารด้วยคาบเวลานั้นสำหรับสนามที่แปรผันกับเวลา ซึ่งกระจายฮาร์โมนิกในรูป $e^{j\omega t}$ เมื่อกำหนดสนาม \vec{E} และ \vec{H} เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชิงซ้อน แล้วจะหาความสัมพันธ์กับค่า และ ชั่วขณะเวลาใดๆได้จาก

$$\mathcal{E}(x,y,z;t) = \text{Re}[\vec{E}(x,y,z) e^{j\omega t}] \quad (2.22)$$

$$\mathcal{H}(x,y,z;t) = \text{Re}[\vec{H}(x,y,z) e^{j\omega t}] \quad (2.23)$$

จาก (2.22), (2.23) และโดยอาศัย $\text{Re}[\tilde{E} e^{j\omega t}] = \frac{1}{2}[\tilde{E} e^{j\omega t} + \tilde{E}^* e^{-j\omega t}]$ (2.20) จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$\mathcal{W} = \mathcal{E} \times \mathcal{H} = \frac{1}{2}\text{Re}[\mathcal{E} \times \mathcal{H}^*] + \frac{1}{2}\text{Re}[\mathcal{E} \times \mathcal{H} e^{j2\omega t}] \quad (2.24)$$

เทอมแรกของ (2.24) ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลาและเทอมที่สองมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพอยดิงเวกเตอร์จึงสามารถที่จะหาได้เป็น

$$\bar{W}_{av}(x,y,z) = [\mathcal{W}(x,y,z;t)]_{av} = \frac{1}{2}\text{Re}[\tilde{E} \times \tilde{H}^*] \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.25)$$

ตัวประกอบ $\frac{1}{2}$ ในเทอม (2.24) และ (2.25) เกิดขึ้น เพราะสนาม E และ H เป็นค่าสูงสุด ไม่ใช่ค่า rms จาก (2.25) กำลังงานเฉลี่ยที่แพร่กระจายจากสายอากาศ จะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} P_{rad} &= P_{av} = \iint_S \bar{w}_{rad} \cdot \bar{ds} \\ &= \iint_S \bar{w}_{av} \cdot \bar{ds} \\ &= \frac{1}{2} \iint_S \text{Re}[\tilde{E} \times \tilde{H}^*] \cdot \bar{ds} \end{aligned} \quad (2.26)$$

2.7 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

คำจำกัดความของคำว่าความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากตัวสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น และผลจากกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.27)$$

เมื่อ U = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

W_{rad} = ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น (W/m²)

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น เขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศใน ระยะไกลได้คือ

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= \frac{r^2}{2\eta} |\tilde{E}(r, \theta, \phi)|^2 \\ &\cong \frac{r^2}{2\eta} [|E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\cong \frac{r^2}{2\eta} [|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2] \quad (2.28)$$

เมื่อ E = ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

E_θ, E_ϕ = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศระยะไกล

η = อินทรีนลิตีอิมพีแดนซ์ ของตัวกลาง

ดังนั้นแบบรูปของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ได้เช่นกัน

กำลังงานทั้งหมดนี้หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นตาม (2.27) ตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมด ซึ่งจะได้

$$P_{\text{rad}} = \iiint_{\Omega} U d\Omega = \iint_{00}^{2\pi} U \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (2.29)$$

2.8 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

เพื่อที่จะเข้าใจถึงคำว่าสภาพเจาะจงทิศทาง เราจำเป็นต้องรู้จักโคเรคทีฟเฟนไว้ก่อน โคเรคทีฟเฟนในทิศทางที่กำหนด คืออัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงจะใช้ ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางคือค่าของโคเรคทีฟเฟน ในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด หรือกล่าวง่าย ๆ ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของต้นกำเนิด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซโทรปิก คืออัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = U/U_0 = 4\pi U/P_{\text{rad}} \quad (2.30)$$

$$D_0 = U_{\text{max}}/U_0 = 4\pi U_{\text{max}}/P_{\text{rad}} \quad (2.31)$$

D_g = โคเรคทีฟเฟน (ไม่มีหน่วย)

D_0 = โคเรคทีฟเฟน (ไม่มีหน่วย)

U = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/ต่อหน่วยมุมตัน)

U_{max} = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/ต่อหน่วยมุมตัน)

U_0 = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (W/หน่วยมุมตัน)

P_{rad} = กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.30) และ (2.31) เราจะทราบว่า โดเรคทีฟเกนและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส มีค่าเป็นหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า U_{\max} และ U_0 ต่างมีค่าเท่ากัน

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะว่ามันแพร่กระจายกำลังงานออกไปทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากกว่าหนึ่งเสมอ

ข้อสรุปอีกอย่างหนึ่งในที่นี้ก็คือ ค่าของโดเรคทีฟเกนจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

โดยทั่วไปสูตรของโดเรคทีฟเกนและค่าสภาพเจาะจงทิศทาง อาจจะเป็นฟังก์ชันของทั้งมุม θ และ ϕ ด้วย ค่าสภาพเจาะจงทิศทางรวมสูงสุดจะสามารถแสดงได้เป็น

$$D_0 = D_\theta + D_\phi \quad (2.32)$$

โดยค่าสภาพเจาะจงทิศทางของแต่ละส่วนของ แสดงได้เป็น

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{\text{rad}})_\theta + (P_{\text{rad}})_\phi} \quad (2.33)$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{(P_{\text{rad}})_\theta + (P_{\text{rad}})_\phi} \quad (2.34)$$

โดยที่

U_θ = ส่วนประกอบของความเข้มของการแพร่กระจายที่มีทิศทางในสนาม

U_ϕ = ส่วนประกอบของความเข้มของการแพร่กระจายที่มีทิศทางในสนาม

$(P_{\text{rad}})_\theta$ = ส่วนประกอบของกำลังงานของการแพร่กระจายที่มีทิศทางในสนาม

$(P_{\text{rad}})_\phi$ = ส่วนประกอบของกำลังงานของการแพร่กระจายที่มีทิศทางในสนาม

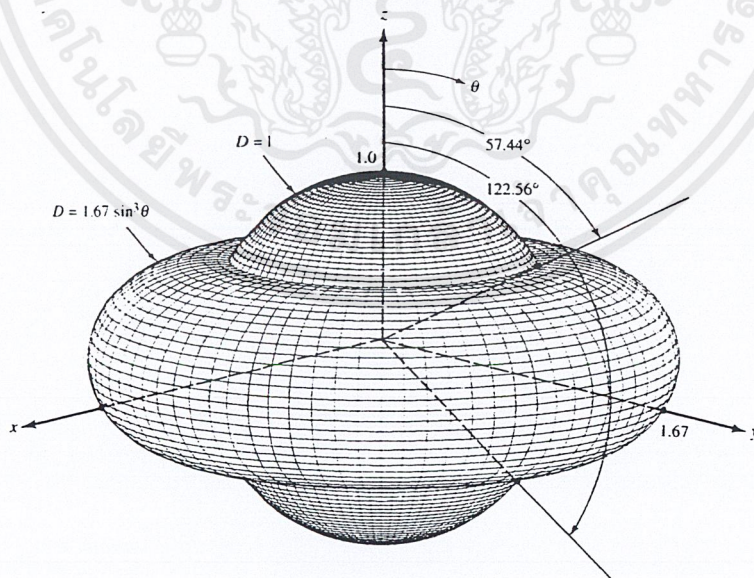
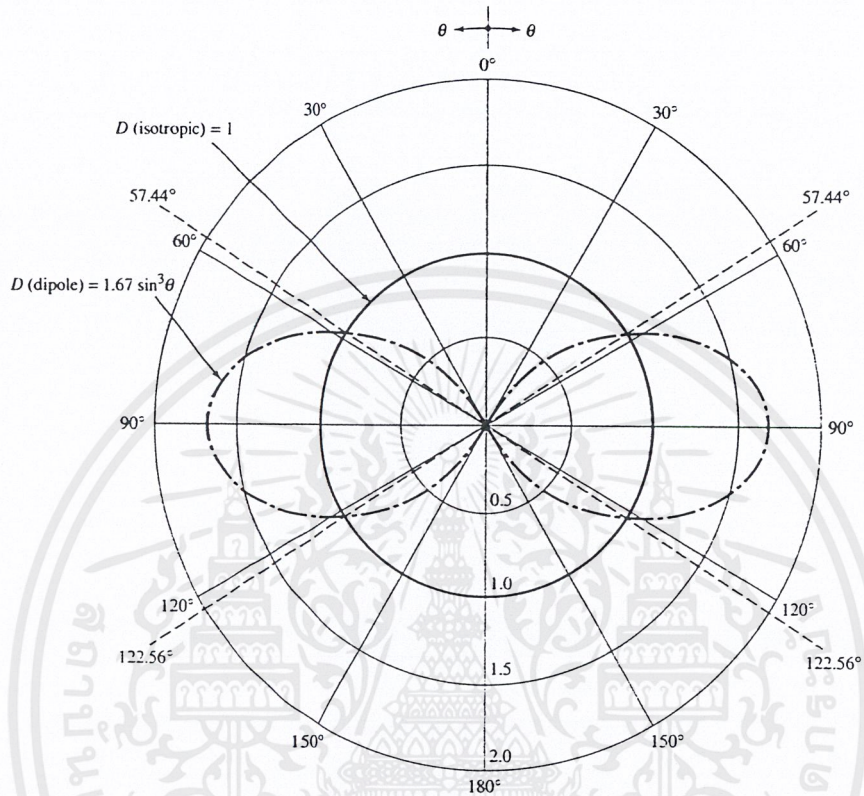
ในกรณีที่สายอากาศที่มีลำคลื่นหลักเพียงลำคลื่นเดียวหรือมีลำคลื่นย่อยขนาดน้อยมากจนสามารถตัดออกได้เราสามารถหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางได้โดย ใช้วิธีหาค่ามุมตันของลำคลื่นแล้วใช้สูตรของเกาส์ (Kraus Equation)

$$D_0 \approx \frac{4\pi \left(\frac{180}{\pi}\right)^2}{\theta_H \times \theta_V} = \frac{41,253}{\theta_H \times \theta_V} \quad (2.35)$$

โดยที่

θ_H คือค่ามุมที่ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามแม่เหล็ก

θ_V คือ ค่ามุมที่ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของระนาบสนามไฟฟ้า

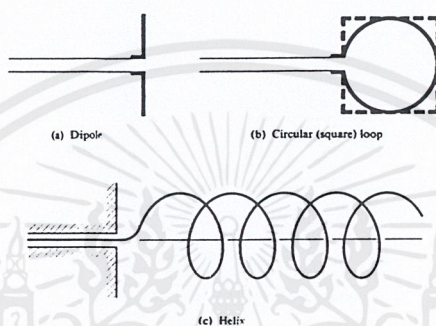


รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบของไดเรกทิวิตีที่เป็น 2 มิติ และ 3 มิติของสายอากาศไดโพลความยาว $\frac{\lambda}{2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

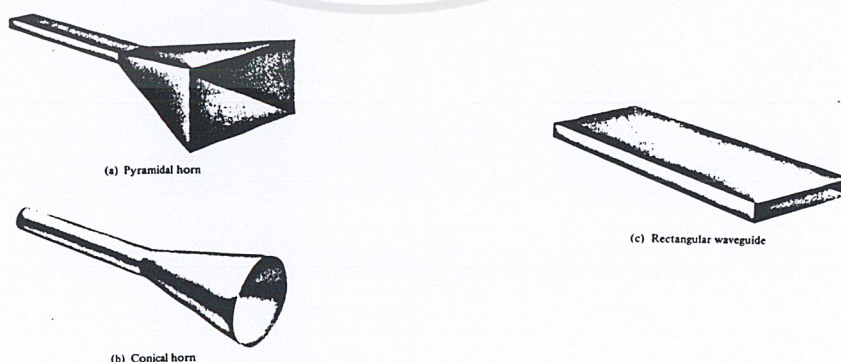
2.9 ชนิดของสายอากาศ แบ่งเป็น 6 ชนิด ดังนี้

2.9.1. สายอากาศแบบเส้นลวด (Wire Antenna) เป็นสายอากาศที่นิยมใช้กันมาก สามารถมองเห็นได้ทั่วทุกหนทุกแห่ง เช่น รถยนต์ เรือ เครื่องบิน และอื่น ๆ อีกมาก มีรูปร่างลักษณะหลากหลาย เช่น เป็นแบบเส้นตรงสองขั้ว แบบวงรอบ (Loop) และแบบขดชนิดเกลียว แสดงดังรูปที่ 2.11 สายอากาศแบบวงรอบ ไม่จำเป็นต้องเป็นวงกลม อาจเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือรูปทรงแบบอื่นๆ ก็ได้ สำหรับแบบวงรอบวงกลม จะเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะมีรูปทรงธรรมดาง่าย ๆ



รูปที่ 2.11 สายอากาศแบบเส้นลวด

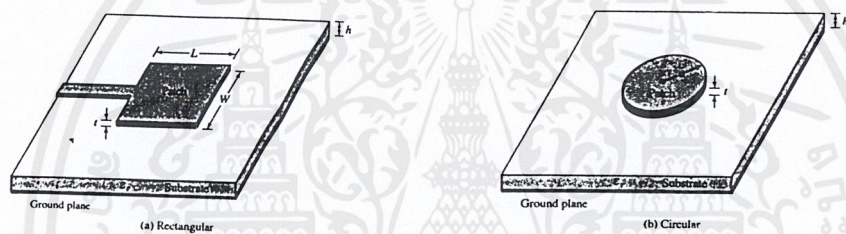
2.9.2. สายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture Antenna) สายอากาศแบบช่องเปิด อาจจะเป็นที่นิยมใช้กันมากขึ้นกว่าในอดีต เพราะความต้องการในด้านรูปแบบที่ทันสมัยและการนำไปใช้ประโยชน์ด้านความถี่สูง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.12 สายอากาศชนิดนี้มีประโยชน์สำหรับการนำไปใช้ในเครื่องบิน และประเภทยานอวกาศ เพราะสามารถติดตั้งให้ปากเสมอกับผิวของเครื่องบินหรือยานอวกาศได้ โดยที่จะต้องเคลือบสายอากาศด้วยสารที่เป็นฉนวน (Dielectric) เพื่อป้องกันสายอากาศจากกรณีอันตรายที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.12 สายอากาศแบบช่องเปิด

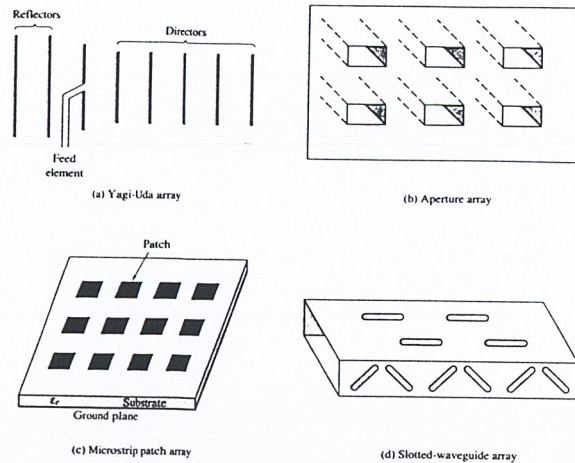
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3. สายอากาศแบบไมโครสตริป (Microstrip Antenna) สายอากาศแบบนี้กำลังเป็นที่นิยมกันมาก ปัจจุบันถูกนำมาใช้ประโยชน์ในภาคีรัฐบาลและภาคเอกชน สายอากาศนี้ประกอบด้วย โลหะเป็นแผ่นเพลท (Patch) วางอยู่บนฐานที่เรียกว่า ซับสเตรท (Substrate) รูปทรงของเพลท สามารถมีแตกต่างกันไปได้หลายรูปแบบ แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นรูปร่างที่กำลังอยู่ในความนิยมมากที่สุด เพราะสร้างและวิเคราะห์ได้ง่าย และมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นที่ดึงดูดความสนใจได้ดี เพราะมีการโพลาไรซ์ไขว้ต่ำ สายอากาศไมโครสตริปมีลักษณะหน้าตัดข้างต่ำ (Low-profile) ที่เหมาะกับผิวที่เป็นแผ่นระนาบ (Planar) และไม่ระนาบ (Nonplanar) การสร้างง่ายและราคาไม่แพงมาก สามารถสร้างโดยใช้เทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit) ที่ทันสมัย สายอากาศชนิดนี้สามารถคิดให้เสมือนกับผิวของเครื่องบิน ยานอวกาศ ดาวเทียม จรวด รถยนต์ และแม้แต่โทรศัพท์มือถือก็ได้



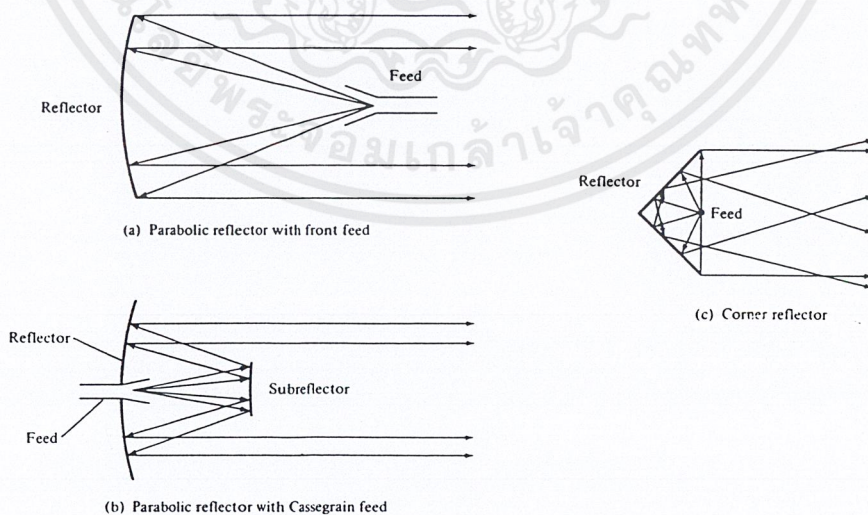
รูปที่ 2.13 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและวงกลม

2.9.4. สายอากาศแบบเรียงแถวลำดับ (Array Antenna) เนื่องจากการนำสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว ไปใช้งานจะไม่สามารถให้คุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นตามความต้องการได้ ดังนั้นสิ่งที่เป็นไปได้ก็คือการรวมองค์ประกอบจำนวน N องค์ประกอบ เพื่อให้สายอากาศทำการแพร่กระจายคลื่นออกไป โดยการจัดวางในเชิงไฟฟ้าและเชิงเรขาคณิต (ให้เรียงลำดับกัน) ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ออกมาตามคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องการ การจัดวางเรียงลำดับกันเพื่อทำให้การแพร่กระจายคลื่นจากองค์ประกอบที่นำมารวมเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นได้สูงสุดในทิศทางเฉพาะหรือในทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นนั้น รูปร่างของสายอากาศชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.14 โดยปกติความหมายของแถวลำดับ (Array) จะใช้กับการจัดวางตัวแพร่กระจายคลื่นที่แยกตามชนิดของสายอากาศแสดงรูปที่ 2.14 (a-c)



รูปที่ 2.14 สายอากาศแบบเรียงแถวลำดับของสายอากาศเส้นลวด ไมโครสตริป และ สายอากาศช่องเปิด

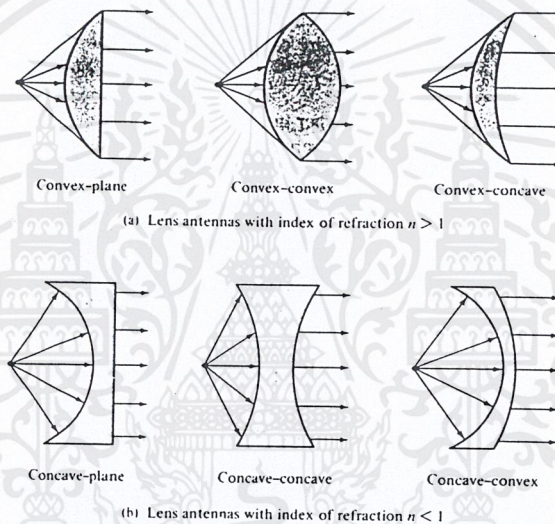
2.9.5. สายอากาศแบบสะท้อนกลับ (Reflector Antenna) เนื่องจากความต้องการในการสื่อสารในที่ห่างไกลมากๆ สามารถทำได้เมื่อใช้สายอากาศชนิดที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจึงมีความต้องการในการออกแบบเพื่อให้ได้สายอากาศที่จะสามารถส่งและรับสัญญาณได้ โดยมีการเดินทางเป็นระยะล้านไมล์ สายอากาศชนิดที่ได้รับการออกแบบให้ใช้งานได้ดีก็คือสายอากาศที่มีรูปทรงเป็นรูปพาราโบลา (Parabolic Reflector) แสดงดังรูปที่ 2.15 (a) และ (b) สายอากาศชนิดนี้จะถูกสร้างให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่มากๆ ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่จะทำให้ได้รับอัตราขยาย (Gain) สูง ซึ่งก็ตรงตามความต้องการของการส่งและรับสัญญาณในระยะไกลมากกว่าล้านไมล์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบสายอากาศ ให้มีรูปร่างเป็นแบบที่ให้สัญญาณสามารถสะท้อนกลับไปได้ รูปทรงแบบอื่นของตัวสะท้อนกลับที่ไม่เป็นพาราโบลา ก็คือแบบ Conner Reflector แสดงดังรูปที่ 2.15 (c)



รูปที่ 2.15 สายอากาศแบบ สะท้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.6. สายอากาศแบบเลนส์ (Lens Antennas) เป็นสายอากาศที่ไม่ทำให้สัญญาณแตกกระจายไปในทิศทางที่ไม่ต้องการ รูปร่างเป็นแบบเลนส์ สายอากาศชนิดนี้มีการใช้น้อยกว่าสายอากาศชนิดอื่น ๆ เนื่องจากคุณสมบัติของรูปทรงทางเรขาคณิต รวมทั้งการใช้วัสดุที่จะนำมาทำเป็นเลนส์ให้เหมาะสม การใช้รูปร่างแบบเลนส์เพื่อให้สามารถแปรรูปทรงต่างๆ ของพลังงานที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงสายอากาศให้หักเหเข้ามาเป็นคลื่นระนาบ (Plan Wave) สายอากาศชนิดนี้ใช้เหมือนสายอากาศแบบสะท้อนกลับ ซึ่งใช้ได้ดีในย่านความถี่สูงๆ ขึ้นไป เนื่องจากขนาดความกว้างและน้ำหนักซึ่งใหญ่มากเกินไป จึงไม่สามารถแพร่กระจายพลังงานทั้งหมดออกไปในทิศทางที่ต้องการเพียงทิศเดียว หรือหลายทิศ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ สิ่งที่ทำได้คือ พยายามให้ใกล้เคียงกับความต้องการให้มากที่สุด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบสายอากาศแต่ละชนิดให้มีรูปร่างต่าง ๆ เพื่อช่วยให้มีการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ



รูปที่ 2.16 สายอากาศแบบ เลนซ์

2.10 สายอากาศชนิดเกลียว (Helical Antenna)

สายอากาศชนิดเกลียว หมายถึงสายอากาศแบบเกลียวที่พันเป็นรอบเพื่อให้มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมซึ่งประกอบด้วยขดลวดเกลียวที่ทำหน้าที่กระจายคลื่นและแผ่นสะท้อน (Ground Plane) ซึ่งขนาดของแผ่นสะท้อนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า $3\lambda/4$ การป้อนกำลังงานนั้นจะป้อนจากสายโคแอกเซียลจากทางด้านหลังของแผ่นสะท้อน โดยให้ตัวนำในต่ออยู่กับขดลวดเกลียว และตัวนำนอกต่ออยู่กับแผ่นสะท้อน

คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศชนิดเกลียว จะเปลี่ยนแปลงตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือความยาวของเส้นลวดที่นำมาพันเอียง ความสูงตรงของสายอากาศ ขนาดของมุมเอียง (Pitch Angle) ขนาดรัศมีของขดเกลียว และค่าตัวประกอบของขดเกลียว (Winding Factor) เช่นเมื่อมุมเอียงเท่ากับศูนย์ สายอากาศชนิดเกลียวจะกลายเป็นสายอากาศแบบวงรอบ (Loop Antenna) จำนวน N รอบ และเมื่อมุมเอียงเท่ากับ 90° สายอากาศชนิดเกลียวก็จะกลายเป็นสายอากาศแบบไดโพลเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศชนิดเกลียวแบ่งเป็น 2 ประเภท

1.สายอากาศชนิดเกลียวในโหมดตามแกน (Axial Mode) คือสายอากาศชนิดเกลียวที่มีจำนวนรอบของเกลียวมากและมีความยาวของสายอากาศมากกว่า $\lambda/10$ จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น แบบทิศทางเดียว (Uni - Directional) คือสนามไฟฟ้าสูงสุดจะแพร่กระจายทิศทางตามแนวแกนของสายอากาศ

2.สายอากาศชนิดเกลียวในโหมดตั้งฉาก (Normal Mode) คือสายอากาศชนิดเกลียวที่มีจำนวนรอบต่ำและมีความยาวของสายอากาศไม่เกิน $\lambda/10$ และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว (Omni - Directional) ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่กับระนาบที่ตั้งฉากกับแกนของสายอากาศ ที่บริเวณตามแกนของสายอากาศจะมีค่าสนามการแพร่ที่น้อยมากหรือไม่มีเลย

สายอากาศชนิดเกลียวจะกลายเป็นวงกลมเมื่อขนาดมุมเอียงเท่ากับ 0° และจะเป็นไดโพลเชิงเส้นเมื่อมุมเอียงเท่ากับ 90° ดังนั้นค่าจำกัดของสายอากาศชนิดเกลียว คือวงกลมและไดโพลเมื่อพิจารณาที่การแพร่กระจายคลื่นของสนามระยะไกล ของสายอากาศชนิดเกลียวในโหมดตั้งฉากพบว่ามอดูล์ประกอบของสนามไฟฟ้าสององค์ประกอบ คือสนามไฟฟ้าในแนวนอน (E_ϕ) ซึ่งเป็นผลมาจากวงกลม กับค่าสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง (E_θ) ซึ่งเป็นผลมาจากไดโพลแสดงดังสมการ

$$E_\theta = jE_0 \sin \alpha \{ \cos u + \cos v \} \frac{\cos(w)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w^2} \sin \theta \quad (2.36)$$

$$E_\phi = E_0 \cos \alpha \{ \sin u \cos \phi + \sin v \sin \phi \} \frac{\cos(w)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w^2} \quad (2.37)$$

โดยที่

$$E_0 = \frac{2h^2 I_m}{\lambda} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad a = \frac{\lambda \cos \alpha}{8\pi \xi}$$

$$I_m = 1 \quad \eta = 120\pi \quad u = ka \sin \theta \cos \phi$$

$$v = ka \sin \theta \sin \phi \quad w = kh \cos \theta \quad h = l \sin \alpha$$

$$l = \frac{a\xi}{\cos \alpha}$$

ค่าสนามไฟฟ้าในนอนและแนวตั้งนี้จะเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ในลักษณะที่ตั้งฉากกันในโหมดตั้งฉากนี้จะให้การโพลาไรซ์แบบวงกลมที่สมบูรณ์ได้นั้นจะพิจารณาจากค่าอัตราส่วนแกน (Axial Ratio ; AR)

$$AR = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \frac{|E_{\theta}|}{|E_{\phi}|} = \frac{|E_{\phi}|}{|E_{\theta}|} \quad (2.38)$$

ถ้าขนาด $E_{\theta} = E_{\phi}$ จะได้ค่า $AR=1$ จะทำให้เกิดการโพลาไรซ์ช่วงกลมที่สมบูรณ์ตามคุณลักษณะของสายชนิดเกลียวโหมคตั้งฉาก

จากองค์ประกอบของสนาม E_{θ} และ E_{ϕ} ดังกล่าว สนามที่เกิดจากการโพลาไรซ์ร่วมกัน (Co Polarization) สามารถคิดได้จากสมการ

$$E_{co} = \frac{|E_{\theta}| + |E_{\phi}|}{\sqrt{2}} \quad (2.39)$$

สนามที่เกิดจากโพลาไรซ์ไขว้กัน (Cross Polarization) สามารถคิดได้จากสมการ

$$E_{cross} = \frac{|E_{\theta}| - |E_{\phi}|}{\sqrt{2}} \quad (2.40)$$

กำลังงานเฉลี่ยที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศสามารถที่จะหาได้จากค่า E_{co} และ E_{cross} ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} (|E_{co}|^2 + |E_{cross}|^2) \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.41)$$

ค่าสภาพเจาะงทศทางของสายอากาศสามารถหาได้จากค่า E_{co} และ P_{rad} ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.42

$$D_0 = \frac{4\pi |E_{co}|_{\max}^2}{P_{rad}} \quad (2.42)$$

2.11 แอลลีย์ (Array)

โดยทั่วไปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเดี่ยวซึ่งมีลำคลื่นค่อนข้างกว้างและมีอัตราขยายต่ำ แต่ในบางงานที่ต้องการใช้สายอากาศที่มีอัตราขยายสูง การเพิ่มอัตราขยายนี้อาจทำได้โดยการเพิ่มขนาดของสายอากาศเดี่ยวจะทำให้คุณสมบัติในการชี้ทิศทางดีขึ้นก็ตาม แต่ยังมีวิธีอื่นที่สามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศโดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของสายอากาศที่นำมาทำเป็นองค์ประกอบ (Element) ซึ่งทำได้โดยจัดองค์ประกอบที่แพร่กระจายคลื่นให้เหมาะสมทั้งทางไฟฟ้าและรูปทรง ซึ่งเรียกว่า แอลลีย์ ปกติแล้วจะเลือกให้แต่ละองค์ประกอบของแอลลีย์เหมือนกันในการหาสนามลัพธ์ของแอลลีย์สามารถหาได้โดยการบวกเวกเตอร์ของสนามที่แพร่กระจายจากแต่ละองค์ประกอบ สนามจะรวมกันในทุกทิศทางที่ต้องการติดต่อสื่อสาร และหักล้างกันในทุกทิศทางที่ไม่ต้องการติดต่อสื่อสาร

การควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีอยู่ 5 วิธี โดยทำการควบคุมสิ่งต่างๆ ต่อไปนี้คือ การจัดเรียงองค์ประกอบของแอลลีย์ (เป็นเส้นตรง วงกลม สี่เหลี่ยม เป็นต้น) ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ ขนาดของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ เฟสของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแต่ละองค์ประกอบ

การแบ่งวิธีการจัดแบบแอลลีย์ตามระยะห่างระหว่างสายอากาศและขนาดของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบซึ่งรวมถึงเฟสของกระแสนั้นด้วย แบ่งออกได้เป็น

1. แอลลีย์สม่ำเสมอ (Uniform array) เป็นการจัดแอลลีย์ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบและขนาดของเฟสของกระแสเท่ากันหมด
2. แอลลีย์ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบไม่เท่ากัน แต่ขนาดและเฟสของกระแสไม่เท่ากัน (Uniformly spaced but nonuniformly excited array)
3. แอลลีย์ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบไม่เท่ากัน แต่ขนาดและเฟสของกระแสเท่ากัน (Nonuniformly spaced but uniformly excited array)
4. แอลลีย์ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศ ขนาด และเฟสของกระแสในแต่ละองค์ประกอบ (Nonuniformly spaced and nonuniformly excited array)

ในการออกแบบนี้จะกล่าวเฉพาะวิธีการจัดแบบแอลลีย์สม่ำเสมอ โดยจัดเรียงเป็นแอลลีย์แบบวงกลม

2.11.1 แอลลีย์แบบวงกลม (Circular array)

แอลลีย์แบบวงกลมเป็นการจัดวางองค์ประกอบหลายๆ องค์ประกอบในลักษณะแบบวงแหวน แอลลีย์แบบวงกลมประยุกต์ใช้ในการหาทิศทางช่วงกว้างคลื่นวิทยุ ระบบนำร่องสัญญาณ เรดาร์ โซนาร์ และอีกหลายๆ ระบบ

2.11.2 ตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor)

จากรูป (2.17) สมมติให้องค์ประกอบไอโซทรอปิก N องค์ประกอบ ถูกวางบนระนาบ $x-y$ ด้วยระยะห่างเท่าๆ กันแบบวงแหวนมีรัศมี a สนามของแถวลำดับสามารถเขียนได้

$$E_n(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N a_n \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \quad (2.43)$$

ให้ R_n คือระยะห่างจากองค์ประกอบที่ n ไปยังจุดสังเกต

$$R_n = (r^2 + a^2 - 2a_r \cos \phi)^{1/2} \quad (2.44)$$

เมื่อ $R_r \gg a$ จะได้

$$R_n \approx r - a \cos \phi_n = r - a(\hat{a}_\phi \cdot \hat{a}_r) = r - a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} \hat{a}_\theta \cdot \hat{a}_r &= (\hat{a}_x \cos \phi_n + \hat{a}_y \sin \phi_n) \cdot (\hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta) \\ &= \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) \end{aligned} \quad (2.46)$$

สมมติให้ $R_n \approx r$ สำหรับตัวแปรขนาด ดังนั้นสมการ (2.43) สามารถได้เป็น

$$E_n(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jkR}}{r} \sum_{n=1}^N a_n e^{jka \sin \theta \cos(\phi - \phi_n)} \quad (2.47)$$

เมื่อ $a_n =$ สัมประสิทธิ์การกระตุ้น(ขนาดและเฟส) ขององค์ประกอบที่ n

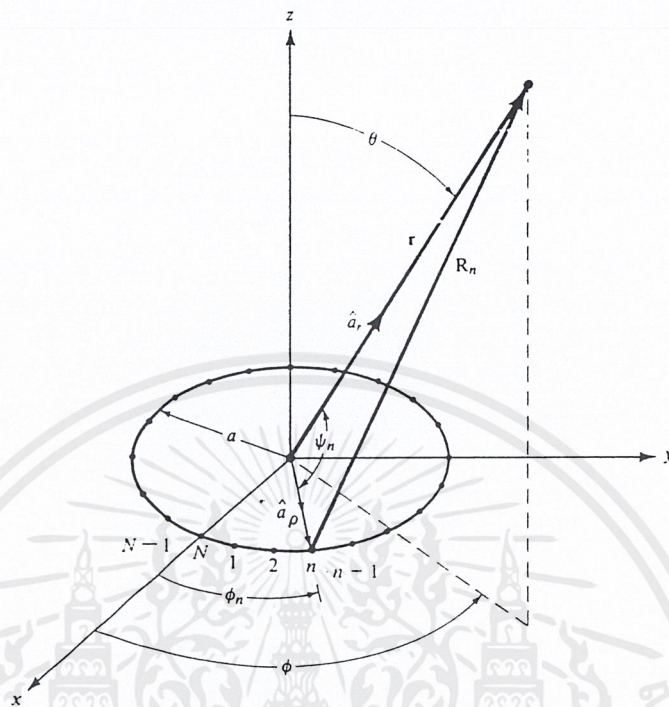
$$\phi_n = 2\pi\left(\frac{n}{N}\right) = \text{ตำแหน่งของมุมขององค์ประกอบที่ } n \text{ บนระนาบ } x-y$$

โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์การกระตุ้นขององค์ประกอบที่ n สามารถเขียนได้

$$a_n = I_n e^{ja_n} \quad (2.48)$$

เมื่อ $I_n =$ การกระตุ้นทางขนาดขององค์ประกอบที่ n

$a_n =$ การกระตุ้นทางเฟสขององค์ประกอบที่ n



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของแฉวลำดับแบบวงกลม

จาก (2.48) และ (2.47) สามารถแสดงได้

$$E_n(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jkr}}{r} [AF(\theta, \phi)] \quad (2.49)$$

เมื่อ

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j[ka \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \alpha_n]} \quad (2.50)$$

สมการ (2.50) แสดงตัวประกอบแฉวลำดับของแฉวลำดับแบบวงกลมขององค์ประกอบ N องค์ประกอบ จัดวางระยะห่างเท่าๆ กันการกระตุ้นเฟสขององค์ประกอบที่ n เพื่อได้การชี้ทิศทางสูงสุดของลำคลื่นหลัก ที่ (θ_0, ϕ_0) คือ

$$\alpha_n = -k_a \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n) \quad (2.51)$$

ดังนั้นตัวประกอบแฉวลำดับของสมการ (2.50) สามารถเขียนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{jka[\sin \theta \cos(\phi - \phi_n) - \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)]} \quad (2.52)$$

$$= \sum_{n=1}^N I_n e^{jka(\cos \psi - \psi_0)} \quad (2.53)$$

2.12 สายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแถวลำดับวงกลม (Helical Circular Array)

เป็นการนำสายอากาศชนิดเกลียวองค์ประกอบเดี่ยวมาจัดวางเป็นแถวลำดับแบบวงกลมซึ่งสมการการแพร่กระจายคลื่นของสนามจะประกอบด้วย สมการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว รวมกับส่วนของตัวประกอบแถวลำดับสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E_{T,\phi} = \sum_{n=1}^N \frac{he^{-jkr}}{\lambda r} \pi h l \cos \alpha \{ \sin u \cos \phi + \sin v \sin \phi \} \frac{\cos w}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w^2} e^{jkr_a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n)} \quad (2.54)$$

$$E_{T,\theta} = \sum_{n=1}^N \frac{he^{-jkr}}{\lambda r} \pi h l \sin \alpha \{ \cos u + \cos v \} \sin \theta \frac{\cos w}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w^2} e^{jkr_a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n)} \quad (2.55)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \xi &= 0.5 & \alpha &= 14^\circ & k &= \frac{2\pi}{\lambda} \\ \eta &= 120\pi & \phi_n &= 2\pi \frac{n}{N} & u &= ka \sin \theta \cos \phi \\ v &= ka \sin \theta \sin \phi & w &= kh \cos \theta & a &= \frac{\lambda \cos \alpha}{8\pi \xi} \\ l &= \frac{a\xi}{\cos \alpha} & h &= l \sin \alpha \end{aligned}$$

ซึ่งอัตราส่วนแกน ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศ สนามที่เกิดจากการโพลาไรซ์ร่วม สนามที่เกิดจากการโพลาไรซ์ไขว้ สามารถหาได้เช่นเดียวกับสมการของสายอากาศชนิดเกลียวองค์ประกอบเดี่ยว

2.13 การออกแบบไมโครสตริปใช้เป็นจุดป้อนสัญญาณ

สายอากาศแถวลำดับชนิดเกลียวบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลมแต่ละองค์ประกอบจะถูกป้อนสัญญาณด้วยตัวแบ่งกำลังงานโดยใช้โครงสร้างของไมโครสตริปซึ่งทำหน้าที่เป็นสายนำสัญญาณป้อนกำลังให้แก่สายอากาศแบบเกลียวแต่ละองค์ประกอบให้กำลังงานและเฟสเท่ากัน วิธีการออกแบบไมโครสตริปจะพิจารณากรณีที่ซับซ้อนที่สุดคือแบบไอโซโทรปิกเป็นหลัก วัตถุประสงค์หลักของการออกแบบไมโครสตริปคือ การกำหนดค่าความกว้างของสตริปและความหนาของชั้นสเตรตเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance ; Z_c) ตามต้องการ

การออกแบบไมโครสตริปโดยใช้วิธีคำนวณจากสูตรนั้นวิลเลอร์ได้ทำการศึกษาไว้ และโอเวนส์ได้รวบรวมเป็นสูตรที่ละเอียดขึ้นโดยระบุช่วงของค่าต่างๆ ที่สูตรเหล่านั้นจะใช้งานได้ดีโดยแบ่งเป็นช่วงสตริปแคบและกว้างเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ Z_c และ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Permittivity relation ; ϵ_r) ถูกกำหนดมาให้จะได้สูตรในการคำนวณต่างๆ ดังต่อไปนี้

กรณีสตริปแคบ เมื่อกำหนดเงื่อนไขของสตริปแคบจาก $Z_c > (44 - 2\epsilon_r) \Omega$ จะได้สูตรคำนวณดังนี้

$$\frac{w}{h} = \left(\frac{e^{H'}}{8} - \frac{1}{4e^{H'}} \right)^{-1} \quad (2.56)$$

โดยที่

$$H' = \frac{Z_c \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right) \quad (2.57)$$

กรณีสตริปกว้าง เมื่อกำหนดเงื่อนไขของสตริปกว้างจาก $Z_c < (44 - 2\epsilon_r) \Omega$ จะได้สูตรคำนวณดังนี้

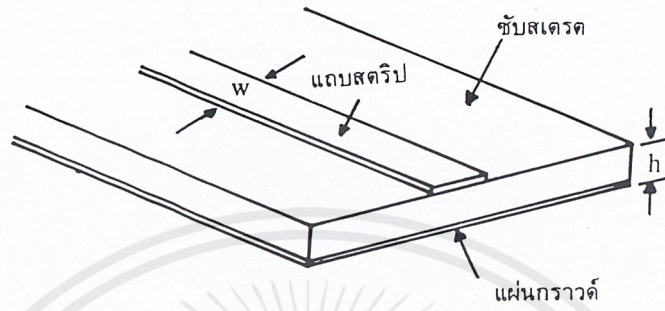
$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \{ (d-1) - \ln(2d-1) \} + \frac{\epsilon_r - 1}{\pi \epsilon_r} \{ \ln(d-1) + 0.293 - \frac{0.517}{\epsilon_r} \} \quad (2.58)$$

โดยที่

$$d = \frac{59.95^2}{Z_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.59)$$

ในการสร้างไมโครสตริปจะใช้สูตร (2.56) และ (2.57) ในการคำนวณ เมื่อกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง $Z_c = 50 \Omega$ และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของอีพ็อกซีเท่ากับ 3.7 จะได้ค่า $w / h = 2.17$ ซึ่งแสดงโครงสร้างของตัวแบ่งกำลังงานโดยใช้แผ่นไมโครสตริปดังรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของไมโครสตริป

บทที่ 3

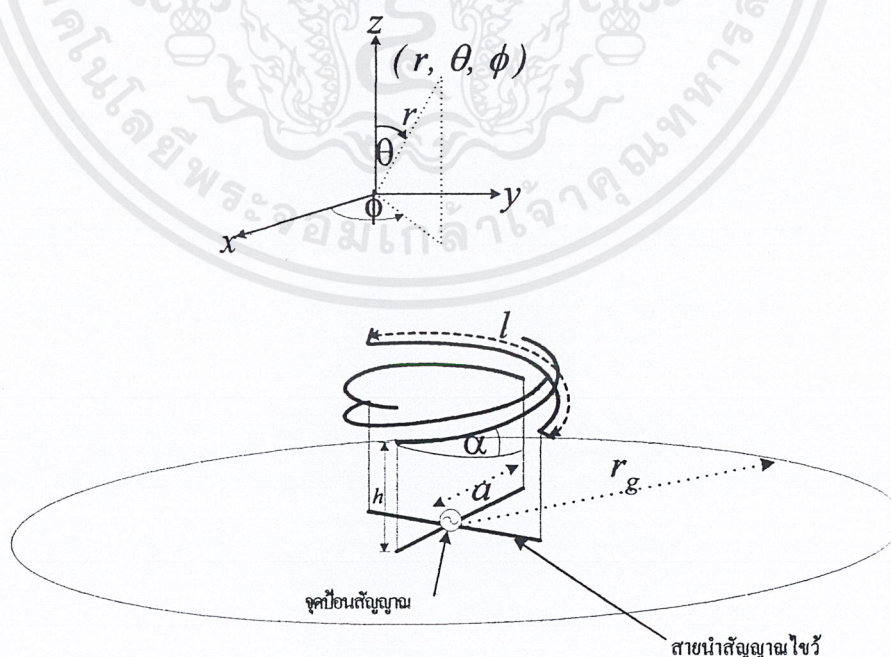
การคำนวณและการสร้าง

บทนำ

ในปัจจุบันการสื่อสารแบบไร้สายและการสื่อสารเคลื่อนที่ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าและการพัฒนาสายอากาศที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเหล่านี้จึงเป็นสิ่งที่มีค่า ซึ่งสายอากาศแต่ละชนิดก็จะนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันไป และสายอากาศที่มีค่าคลื่นรูปกรวยเป็นสายอากาศอีกชนิดหนึ่งที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในระบบการสื่อสารเหล่านี้ ซึ่งในโครงการนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์คุณสมบัติและการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศชนิดเกลียว ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวและมีการโพลาริซ์แบบวงกลม โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยลวดตัวนำที่พันเอียงเป็นเกลียวในทิศทางเดียวกันบนแผ่นระนาบตัวนำเพื่อให้มีการแพร่กระจายคลื่นครึ่งเดียวและมีสภาพเจาะจงทิศทางสูงขึ้น

3.1 โครงสร้างของสายอากาศ (องค์ประกอบเดียว)

โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยจำนวนคู่ของลวดตัวนำ 2 คู่ พันเอียงแบบเกลียวในทิศทางเดียวกันและถูกจัดวางบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลม โดยความยาวของเส้นลวดที่นำมาพันเอียงแบบเกลียวมีค่าเท่ากับ l และความสูงตรงของสายอากาศมีค่าเท่ากับ h รัศมีของเกลียวแต่ละขดมีค่าเท่ากับ a สำหรับค่ามุมเอียงของเกลียวแต่ละขดและค่าตัวประกอบของเกลียวมีค่าเป็น α และ ξ ตามลำดับ และสายอากาศชนิดนี้ถูกจัดวางบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลมขนาดรัศมีเท่ากับ r_g ดังแสดงในรูปที่ 3.1

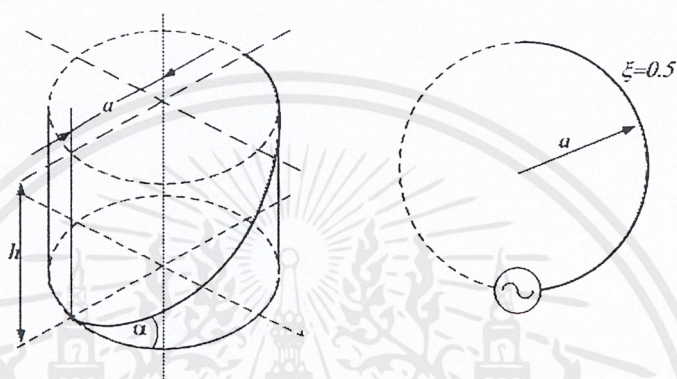


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการป้อนสัญญาณจะป้อนตรงจุดกึ่งกลางของสายส่งที่ไขว้แบบขนาน (cross parallel transmission line) โดยเส้นลวดตัวนำที่ปลายแขนทั้ง 4 ของสายส่งที่ไขว้กันนั้นพิจารณาให้มีเฟสตรงกัน

สำหรับตัวประกอบของขดเกลียวนั้นแต่ละส่วนของรอบที่พื้นเอียงของสายอากาศชนิดเกลียวถ้าพื้นแบบเอียงไปครึ่งรอบนั้นคือค่าตัวประกอบของขดเกลียว (ξ) ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ค่าตัวประกอบของขดเกลียว (ξ) ของสายอากาศชนิดเกลียว

3.2 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศชนิดเกลียวในกรณีขนาดรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำมีขนาดอนันต์

เมื่อพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางบนแผ่นระนาบตัวนำขนาดอนันต์เป็นอนันต์ ($r_g = \infty$) โดยวิธีศัพทศาสตร์ช่วย นิพจน์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่องค์ประกอบในแนวตั้งและองค์ประกอบในแนวอนแสดงได้ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

$$E_\theta(\theta, \phi) = jE_0 \sin \alpha \{ \cos u + \cos v \} \frac{\cos(w)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w^2} \sin \theta \quad (3.1)$$

$$E_\phi(\theta, \phi) = E_0 \cos \alpha \{ \sin u \cos \phi + \sin v \sin \phi \} \frac{\cos(w)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w^2} \quad (3.2)$$

โดยที่

$$E_0 = \frac{2h^2 I_m}{\lambda} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad a = \frac{\lambda \cos \alpha}{8\pi \xi}$$

$$I_m = 1 \quad \eta = 120\pi \quad u = ka \sin \theta \cos \phi$$

$$v = ka \sin \theta \sin \phi \quad w = kh \cos \theta \quad h = l \sin \alpha$$

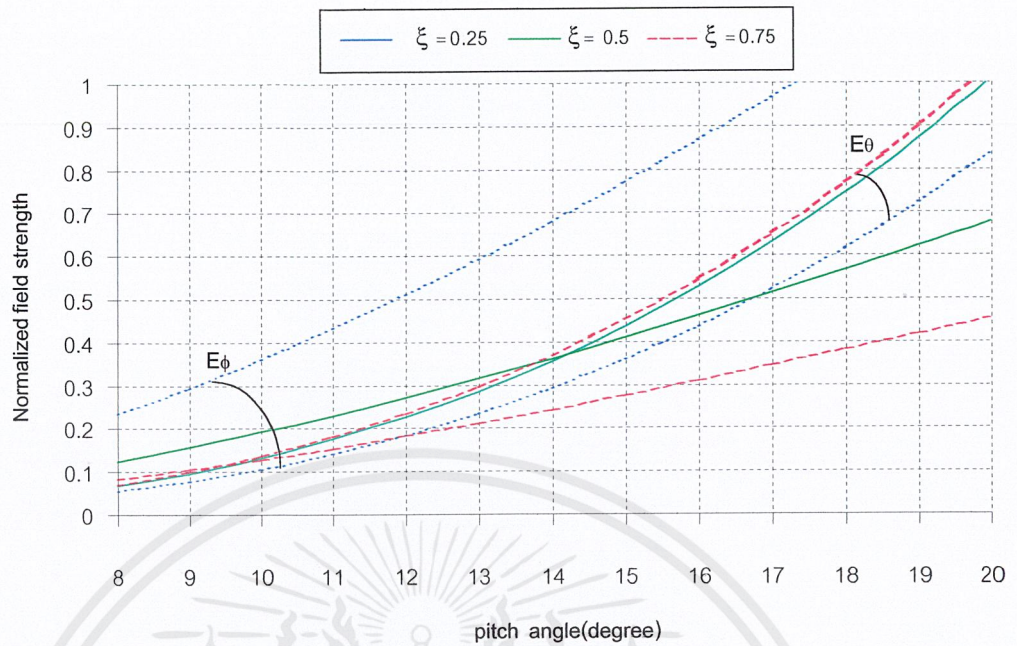
$$l = \frac{a\xi}{\cos \alpha}$$

และ I_m คือค่าขนาดสูงสุดของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศ โดยในที่นี้ได้มีการนอร์มัลไลซ์ให้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1

3.3 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ในการออกแบบ

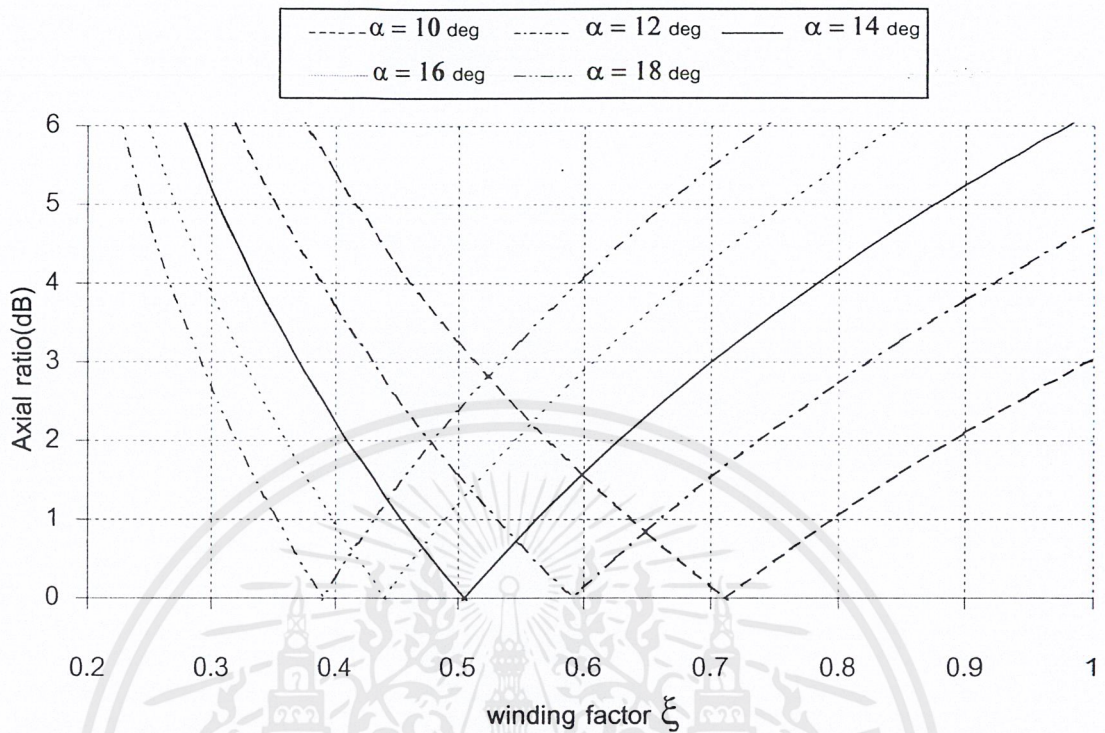
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด ในการออกแบบสายอากาศชนิดเกลียว ที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว และมีการโพลาริไซส์แบบวงกลม ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ รวมทั้งค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นค่าตัวประกอบของขดเกลียว และค่ามุมเอียงของเกลียวเป็นต้น ทั้งนี้เพื่อใช้ในการพิจารณาหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดของสายอากาศ

ในการพิจารณาค่าขนาดสนามไฟฟ้าทั้งองค์ประกอบในแนวตั้ง (E_θ) และองค์ประกอบในแนวนอน (E_ϕ) ของสายอากาศ ถ้าต้องการให้มีการโพลาริไซส์วงกลมนั้นค่าสนามทั้งสององค์ประกอบต้องมีขนาดเท่ากัน ซึ่งในรูปที่ 3.3 ได้แสดงค่าสนามทั้งสององค์ประกอบในแนวนอน และองค์ประกอบในแนวตั้งของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของมุมเอียงโดยเปลี่ยนค่าองค์ประกอบของขดเกลียว สังเกตได้ว่าค่าสนามองค์ประกอบแนวตั้งและองค์ประกอบแนวนอนที่ตัดกันนั้นคือ จุดที่ค่าสนามทั้งสององค์ประกอบมีค่าเท่ากัน ตัวอย่างเช่น ถ้ากำหนดค่าองค์ประกอบขดเกลียวมีค่าเท่ากับ 0.5 ดังนั้นค่าสนามในองค์ประกอบแนวตั้ง และในองค์ประกอบแนวนอนจะมีค่าเท่ากันเมื่อหันลวดเอียงเป็นมุมประมาณ 14 องศา



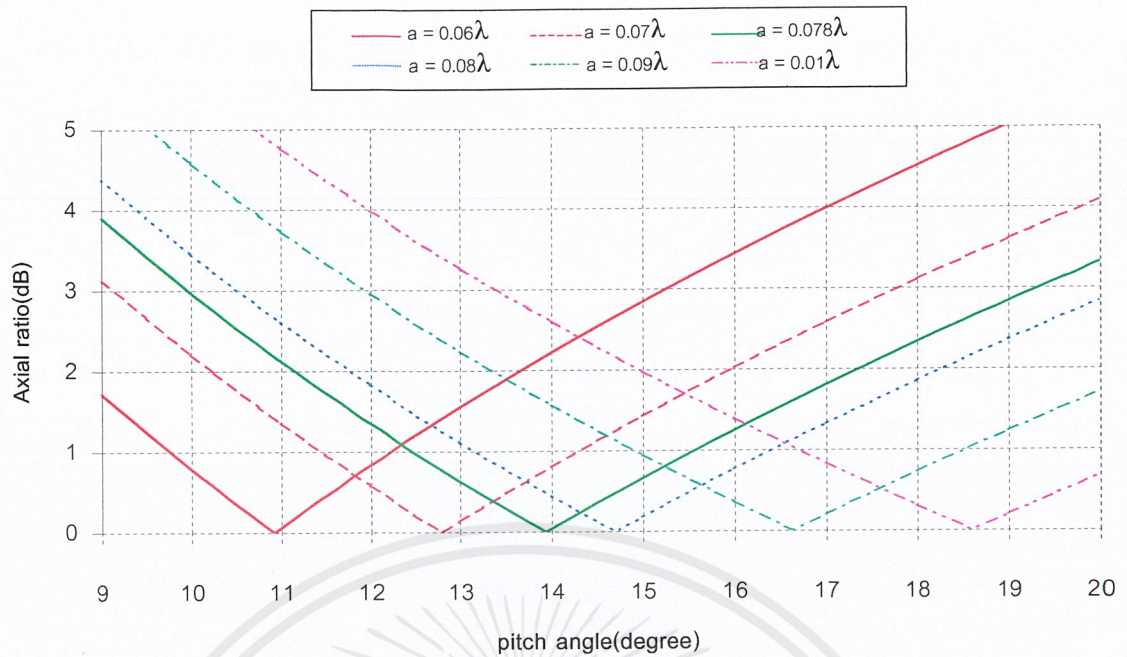
รูปที่ 3.3 ค่าสนามในองค์ประกอบแนวตั้งและแนวนอนที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียงของเกลียวเมื่อเปลี่ยนค่าองค์ประกอบของขดเกลียวของสายอากาศ

ในการออกแบบให้สายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นที่มีการโพลาไรซ์วงกลมแบบหมุนขวาที่สมบูรณ์นั้นนอกจากจะพิจารณาค่าขนาดของสนามทั้งสององค์ประกอบที่เท่ากันแล้ว ค่าสนามในองค์ประกอบแนวนอนจะต้องมีเฟสตามค่าสนามในองค์ประกอบแนวตั้งอยู่ 90 องศาด้วย และการโพลาไรซ์วงกลมที่สมบูรณ์ค่าอัตราส่วนแกนจะต้องมีค่า 0 dB ซึ่งในรูปที่ 3.4 ได้แสดงค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของค่าตัวประกอบของขดเกลียวของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่ามุมเอียงของเกลียว ซึ่งสังเกตได้ว่าที่ค่ามุมเอียงของเกลียวค่าหนึ่ง จะมีค่าตัวประกอบของขดเกลียวค่าหนึ่งเท่านั้นที่จะทำให้มีการโพลาไรซ์วงกลมที่สมบูรณ์กล่าวคืออัตราส่วนแกนมีค่าประมาณ 0 dB ตัวอย่างเช่น เมื่อพันลวดเอียง 14 องศา จะต้องใช้ตัวประกอบขดเกลียวมีค่าประมาณ 0.5 จึงทำให้อัตราส่วนแกนมีค่าประมาณ 0 dB



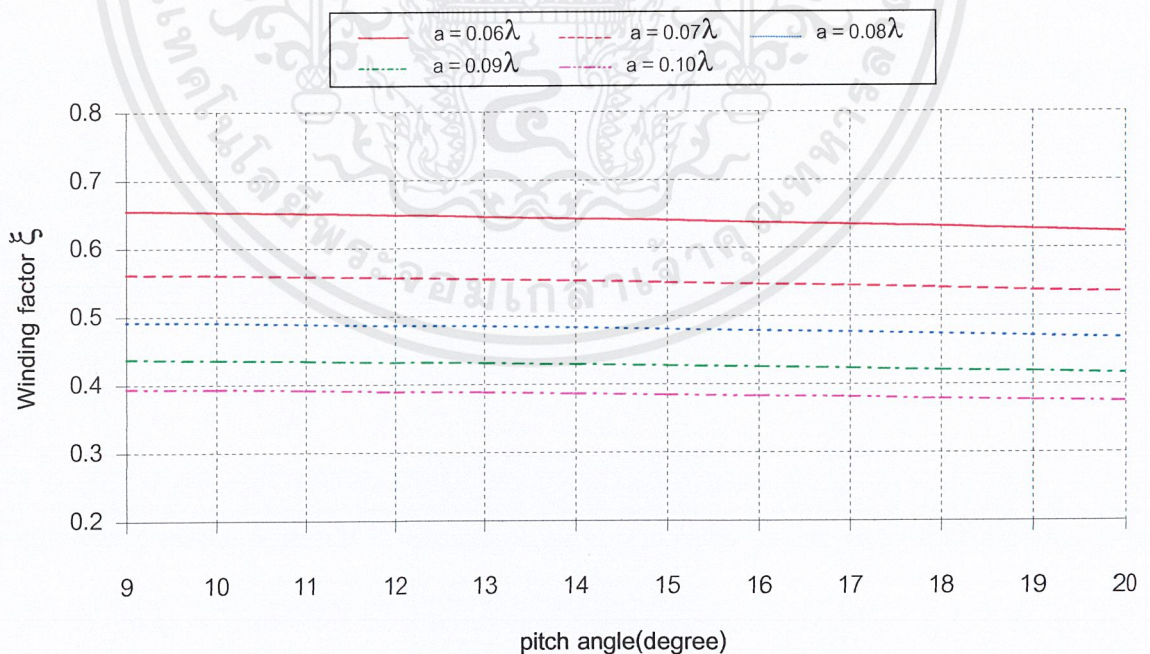
รูปที่ 3.4 ค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของค่าตัวประกอบของขดเกลียวของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่ามุมเอียงของเกลียว

และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียงของเกลียวเมื่อเปลี่ยนค่าขนาดรัศมีของขดเกลียวดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งหากเลือกขนาดรัศมีของขดเกลียวขนาดหนึ่งจะมีค่ามุมเอียงค่าหนึ่งเท่านั้นที่ทำให้มีการโพลาไรซ์วงกลมที่สมบูรณ์ หรือค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 0 dB เช่นรัศมีขดเกลียว 0.06λ จะต้องพันเอียงเป็นมุมประมาณ 11° เป็นต้น



รูปที่ 3.5 ค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียงของเกลียวเมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมีของขดเกลียว

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบของขดเกลียวและค่ามุมเอียงของเกลียวที่ทำให้มีการโพลาไรซ์วงกลม เมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมีของขดเกลียว แสดงได้ดังรูปที่ 3.6

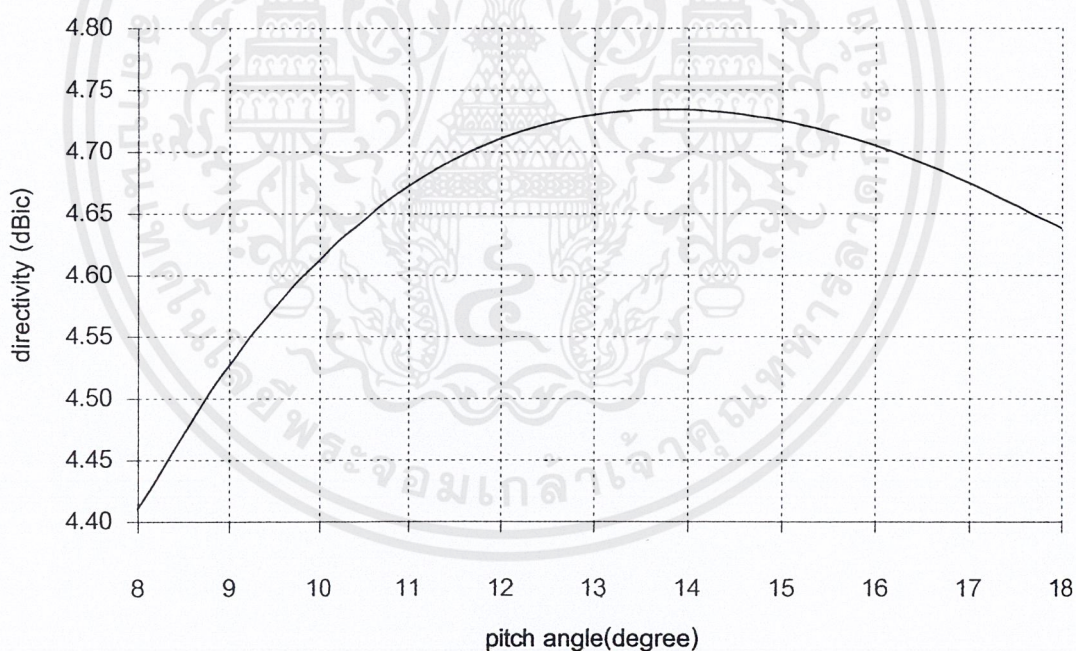


รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบของขดเกลียวและค่ามุมเอียงของเกลียวที่ทำให้มีการโพลาไรซ์วงกลมเมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมีของขดเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

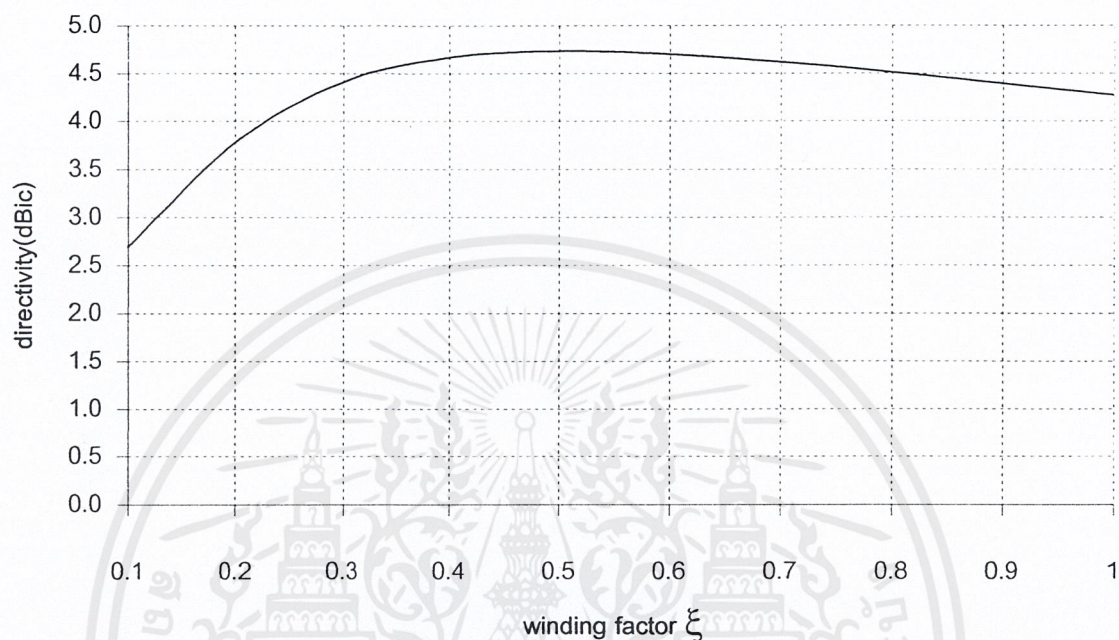
จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาข้างต้น ในการออกแบบสายอากาศชนิดเกลียวสามารถออกแบบได้ง่าย โดยใช้รูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 ได้โดยขั้นตอนแรกเลือกความถี่ใช้งาน ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความยาวคลื่นได้ จากนั้นเลือกขนาดรัศมีของขดเกลียวที่เป็นฟังก์ชันความยาวคลื่นที่จะนำมาทำสายอากาศ แล้วหาค่ามุมเอียงของเกลียวได้จากรูปที่ 3.4 เมื่อได้ค่ามุมเอียงแล้วก็หาค่าตัวประกอบของขดเกลียวได้จากรูปที่ 3.6 ซึ่งจะทำได้สายอากาศชนิดเกลียวที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวและมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมได้ตามต้องการ

จากที่ได้แสดงการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์นั้นในตอนต้นที่เลือกค่าตัวประกอบของขดเกลียว เท่ากับ 0.5 และค่ามุมเอียงของขดเกลียวเท่ากับ 14 องศา เพื่อสนับสนุนผลจากการวิเคราะห์ในตอนต้น จะพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศประกอบด้วย ตามลำดับ ซึ่งในรูปที่ 3.7 ได้แสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียงของเกลียว เมื่อกำหนดให้ค่าตัวประกอบของขดเกลียวมีค่าเท่ากับ 0.5 ซึ่งสังเกตได้ว่าที่มุมเอียงของขดเกลียวเท่ากับ 14 องศา จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากที่สุด ประมาณ 4.73 dBic



รูปที่ 3.7 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียงของเกลียว เมื่อกำหนดให้ค่าตัวประกอบของขดเกลียว มีค่าเท่ากับ 0.5

และเมื่อพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของค่าตัวประกอบของขดเกลียว เมื่อกำหนดค่ามุมเอียงของเกลียวเป็น 14 องศา จะสังเกตได้ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมีค่ามากที่สุดที่ค่าตัวประกอบของขดเกลียวมีค่า 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 3.8



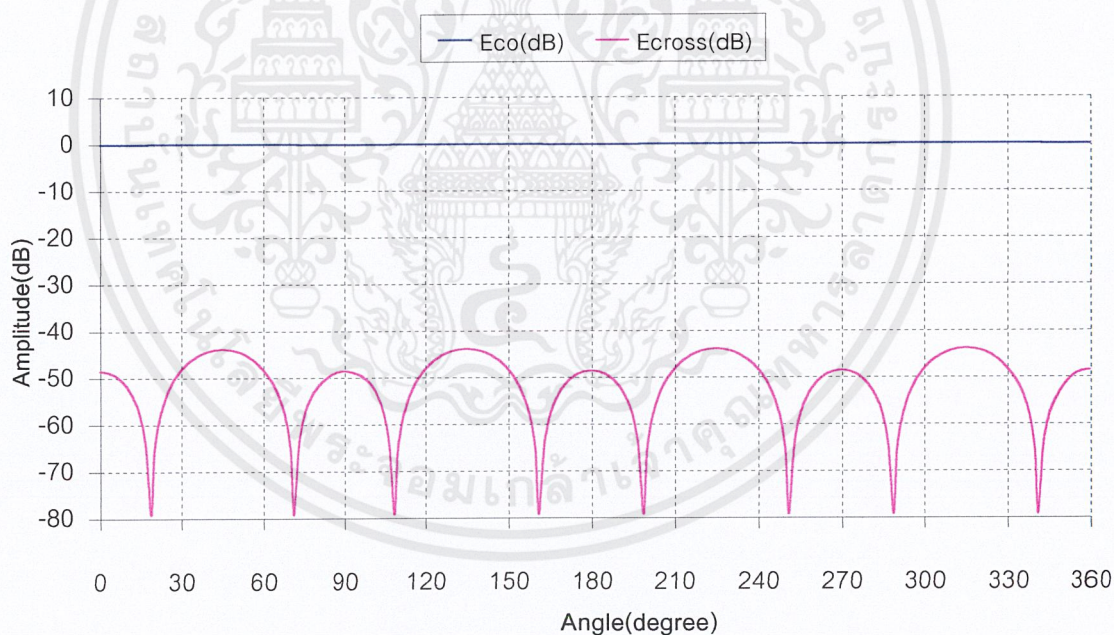
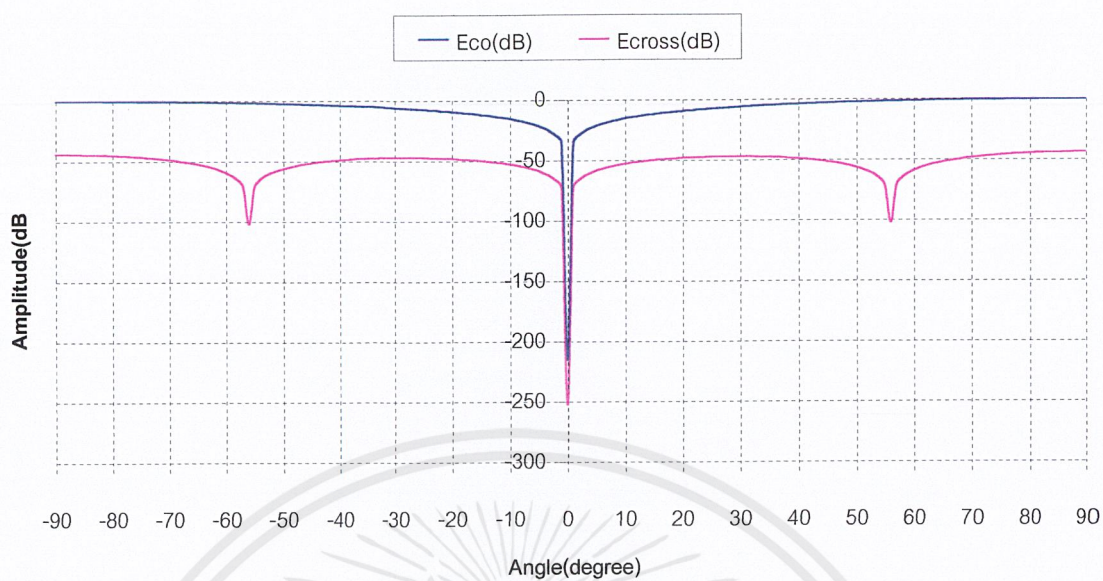
รูปที่ 3.8 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เป็นฟังก์ชันของค่าตัวประกอบของขดเกลียว เมื่อกำหนดค่ามุมเอียงของเกลียวมีค่าเท่ากับ 14 องศา

3.4 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ และค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบคือค่าตัวประกอบของขดเกลียวเท่ากับ 0.5 และค่ามุมเอียงของเกลียวเท่ากับ 14 องศา ซึ่งใช้ค่านี้ในการพิจารณาในบทต่อไป

3.4.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

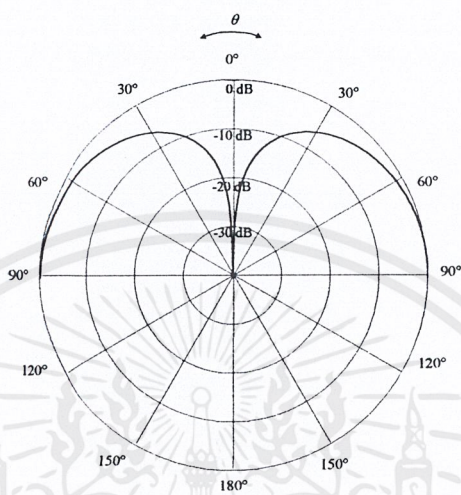
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาดของสายอากาศชนิดเกลียวนั้น เนื่องจากมีนิพจน์ของสนามไฟฟ้าที่องค์ประกอบในแนวตั้งและองค์ประกอบในแนวนอน และออกแบบให้มีการโพลาไรซ์วงกลมชนิดหมุนขวา ดังนั้นจึงได้วิเคราะห์ค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในองค์ประกอบที่มีการโพลาไรซ์ร่วม (วงกลมหมุนขวา) และองค์ประกอบที่มีการโพลาไรซ์ไขว้ (วงกลมหมุนซ้าย) ในระนาบมุมยกและในระนาบมุมกวาด ซึ่งค่าระดับการโพลาไรซ์ไขว้ (cross polar level) จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการโพลาไรซ์ร่วม (co polar level) คือจะมีค่าน้อยกว่า -40 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.9



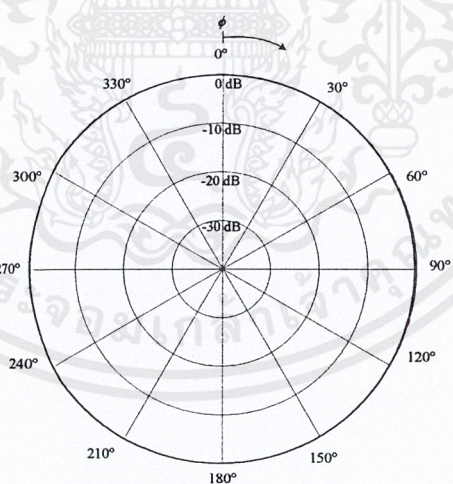
รูปที่ 3.9 แสดงระดับความแตกต่างระหว่างการโพลาไรซ์ร่วมและการโพลาไรซ์ไขว้ในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะมีลักษณะแบบรอบตัวกล่าวคือ การแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกนั้นมีค่าเป็นศูนย์ (null) ในแนวตั้งฉากกับระนาบการวางของสายอากาศและค่ามุมที่มีค่าสนามสูงสุดจะชี้ในทิศทางที่ขนานกับระนาบการวางของสายอากาศ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดจะมีความแรงของสนามเท่ากันทุกทิศทาง (non-directional pattern)



(ก) ระนาบมุมยก

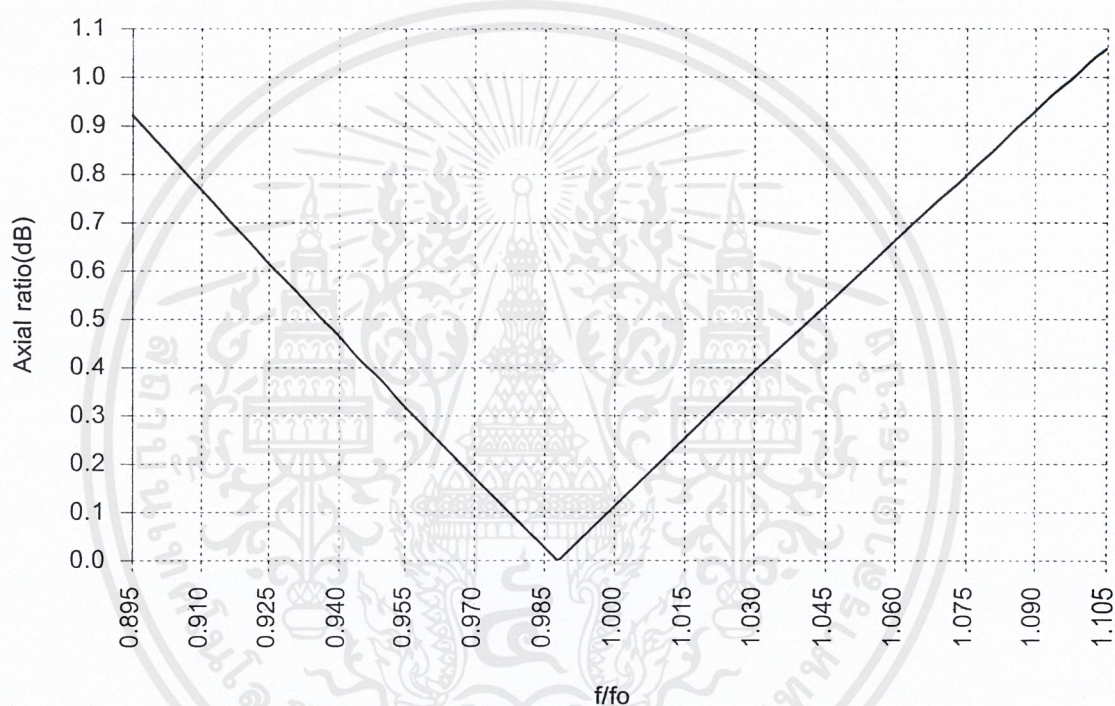


(ข) ระนาบมุมกวาด

รูปที่ 3.10 (ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก และ
(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด

3.4.2 คุณลักษณะเชิงความถี่ของค่าอัตราส่วนแกน

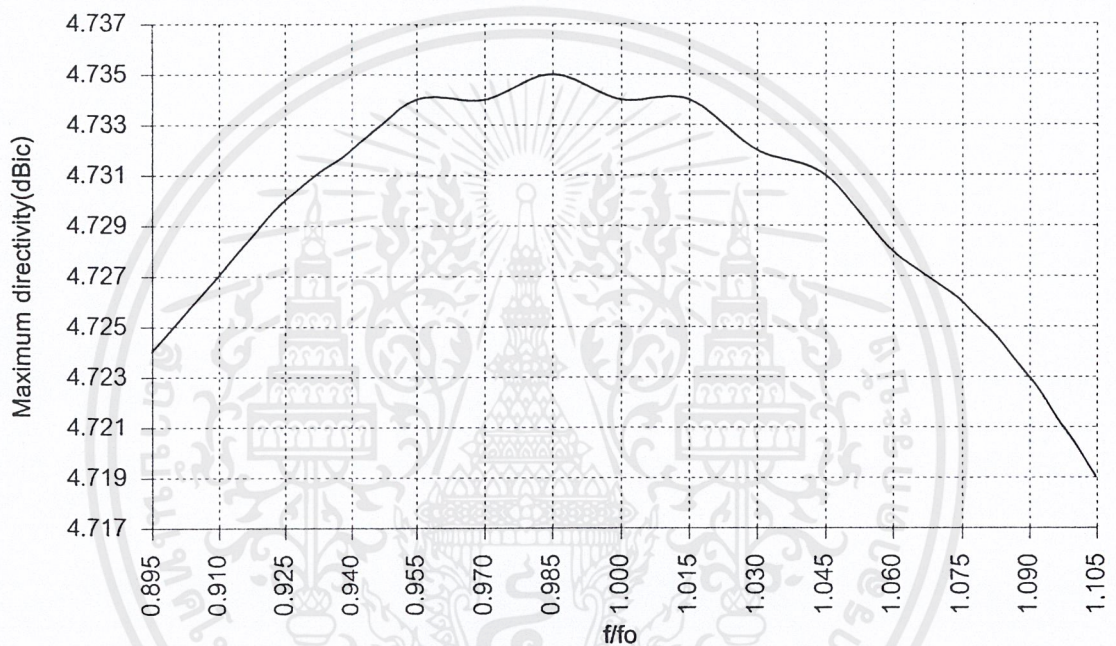
ค่าอัตราส่วนแกนเป็นคุณสมบัติเชิงโพลาริซที่สำคัญของสายอากาศ เพราะเป็นการบ่งบอกถึงชนิดของการโพลาริซ ซึ่งหากต้องการให้ได้การโพลาริซวงกลมที่สมบูรณ์นั้น ค่าอัตราส่วนแกนต้องเท่ากับ 0 dB ซึ่งในรูปที่ 3.11 ได้แสดงค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ จะสังเกตได้ว่าสายอากาศทำงานได้ดีตลอดช่วงกว้างแถบความถี่นี้ ทั้งนี้เพราะค่าอัตราส่วนแกนมีค่าน้อยกว่า 3dB และที่ความถี่ที่ใช้งานจะมีการโพลาริซวงกลมเกือบสมบูรณ์ เพราะได้ค่าอัตราส่วนแกนประมาณ 0.1 dB



รูปที่ 3.11 ค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อ $\alpha=14$ องศา และ $\zeta=0.5$

3.4.3 คุณลักษณะเชิงความถี่ของค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

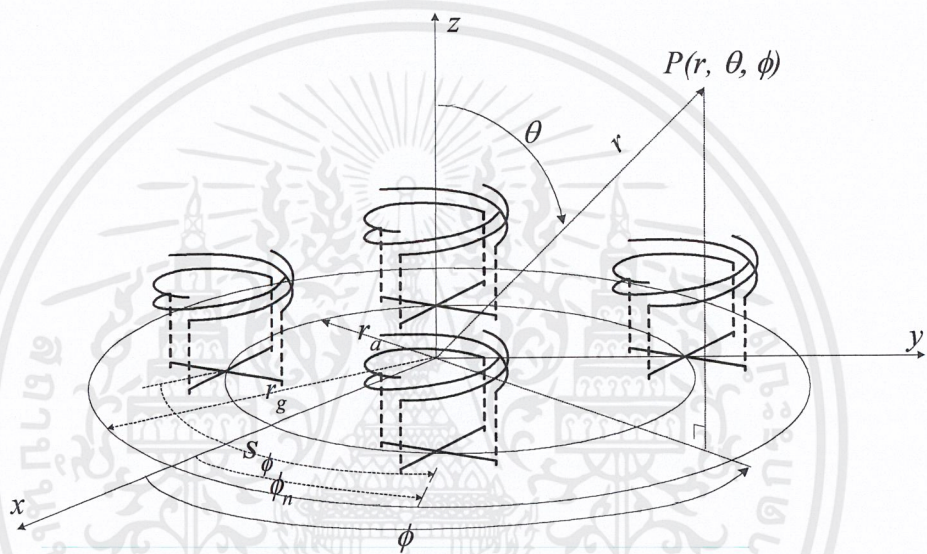
ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเป็นคุณสมบัติหนึ่ง que แสดงค่าความสามารถของสายอากาศ ในการแพร่กระจายคลื่นที่ชี้ไปยังทิศทางที่ต้องการ ในรูปที่ 3.12 แสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เป็นฟังก์ชัน ของความถี่ ซึ่งจะเห็นว่าสายอากาศทำงานได้ดีตลอดช่วงกว้างแถบความถี่เพราะค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ที่ลดลงจากจุดที่มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากที่สุดไม่เกิน 3 dB และพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่ามากกว่า 4 dBic



รูปที่ 3.12 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เมื่อ $\alpha = 14$ องศา และ $\xi = 0.5$

3.5 โครงสร้างของสายอากาศ (วางแบบแถวลำดับวงกลม)

โครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยสายอากาศชนิดเกลียวบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลม โดยขนาดความยาวของเส้นลวดที่นำมาพันเป็นเกลียวในแต่ละขดของสายอากาศชนิดเกลียวมีค่าเท่ากับ l ความสูงตรงของสายอากาศมีค่า h รัศมีของเกลียวแต่ละขดมีค่าเท่ากับ a สำหรับค่ามุมเอียงของเกลียวแต่ละขดและค่าตัวประกอบของขดเกลียวมีค่าเป็น α และ ξ ตามลำดับ สายอากาศชนิดเกลียวนี้ได้ทำการจัดวางบนแผ่นระนาบตัวนำที่มีรัศมีเท่ากับ r_g จัดเรียงในลักษณะแถวลำดับแบบวงกลมมีรัศมีเท่ากับ r_a ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งการจัดวางในแต่ละองค์ประกอบจะอยู่ที่ตำแหน่ง $(r = r_a, 90^\circ, \phi = \phi_n)$



รูปที่ 3.13 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับชนิดเกลียวบนแผ่นระนาบตัวนำ

3.6 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

เมื่อพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าผลรวมของสนามจากสายอากาศแถวลำดับชนิดเกลียวซึ่งมีจำนวนองค์ประกอบ N องค์ประกอบจัดวางบนแผ่นระนาบตัวนำที่มีรัศมีเป็นอนันต์ $(r_g = \infty)$ ค่าผลรวมของสนามทั้งหมดจากสายอากาศสามารถพิจารณาได้เป็นผลรวมทั้งหมดของค่าการกระจายสนามจากสายอากาศแต่ละองค์ประกอบที่วางบนแผ่นระนาบตัวนำ ดังสมการ

$$E_{T,\phi} = \sum_{n=1}^N \frac{he^{-jkr}}{\lambda r} \pi h l \cos \alpha \{ \sin u \cos \phi + \sin v \sin \phi \} \frac{\cos w}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w^2} e^{jkr_a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n)} \quad (3.3)$$

$$E_{T,\theta} = \sum_{n=1}^N \frac{he^{-jkr}}{\lambda r} \pi h l \sin \alpha \{ \cos u + \cos v \} \sin \theta \frac{\cos w}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w^2} e^{jkr_a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n)} \quad (3.4)$$

โดยที่

$$\xi = 0.5$$

$$\alpha = 14^\circ$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\eta = 120\pi$$

$$\phi_n = 2\pi \frac{n}{N}$$

$$u = ka \sin \theta \cos \phi$$

$$v = ka \sin \theta \sin \phi$$

$$w = kh \cos \theta$$

$$a = \frac{\lambda \cos \alpha}{8\pi\xi}$$

$$l = \frac{a\xi}{\cos \alpha}$$

$$h = l \sin \alpha$$

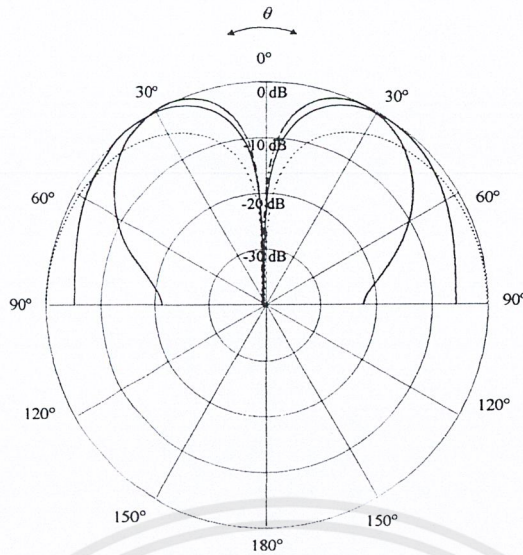
3.7 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก ค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาด ค่าอัตราส่วนแกน และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศชนิดเกลียว คือ $a = 0.078\lambda$ ส่วน α และ ξ มีค่า 14 องศา และ 0.5 ตามลำดับ ซึ่งจะใช้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้ในการวิเคราะห์

3.7.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

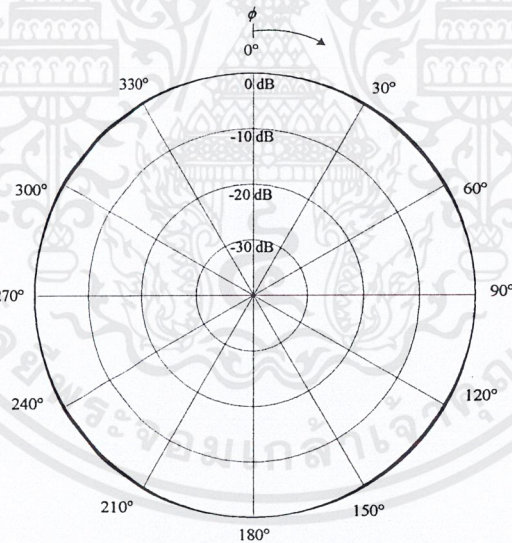
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาดของสายอากาศแถวลำดับเมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมีของแถวลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.14 จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะมีลักษณะเป็นรูปกรวย กล่าวคือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกนั้นจะมีค่าสนามเป็นศูนย์ในแนวตั้งฉากกับระนาบของสายอากาศ ค่าสูงสุดของสนามจะชี้ที่มุมต่างๆระหว่าง 0 องศา และ 90 องศา ตามลำดับและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดจะมีความแรงของสนามเท่ากันหมดทุกทิศทาง นอกจากนี้ยังพบว่ายังขนาดรัศมีของแถวลำดับยังมีขนาดมากขึ้นค่าสูงสุดของมุมในระนาบมุมยกก็จะมีค่าลดลง ซึ่งในการใช้งานจริงนั้นจะใช้แผ่นระนาบตัวนำที่มีขนาดจำกัดแทนแผ่นระนาบตัวนำที่มีขนาดอนันต์ที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ และผลจากขอบแผ่นระนาบตัวนำ จะมีผลทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเปลี่ยนแปลงไป

ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก และระนาบมุมกวาด ที่แผ่นระนาบตัวนำมีขนาดอนันต์แล้วเปลี่ยนขนาดรัศมี (r_g) ของแถวลำดับบนแผ่นระนาบตัวนำแสดงได้ดังรูปที่ 3.14



- - - - - $ra = 0.15\lambda$
 ————— $ra = 0.35\lambda$
 - - - - - $ra = 0.45\lambda$

(ก) ระบายมุมยก



(ข) ระบายมุมกวาด

รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยก และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด เมื่อเปลี่ยนรัศมีของแฉกลำดับ

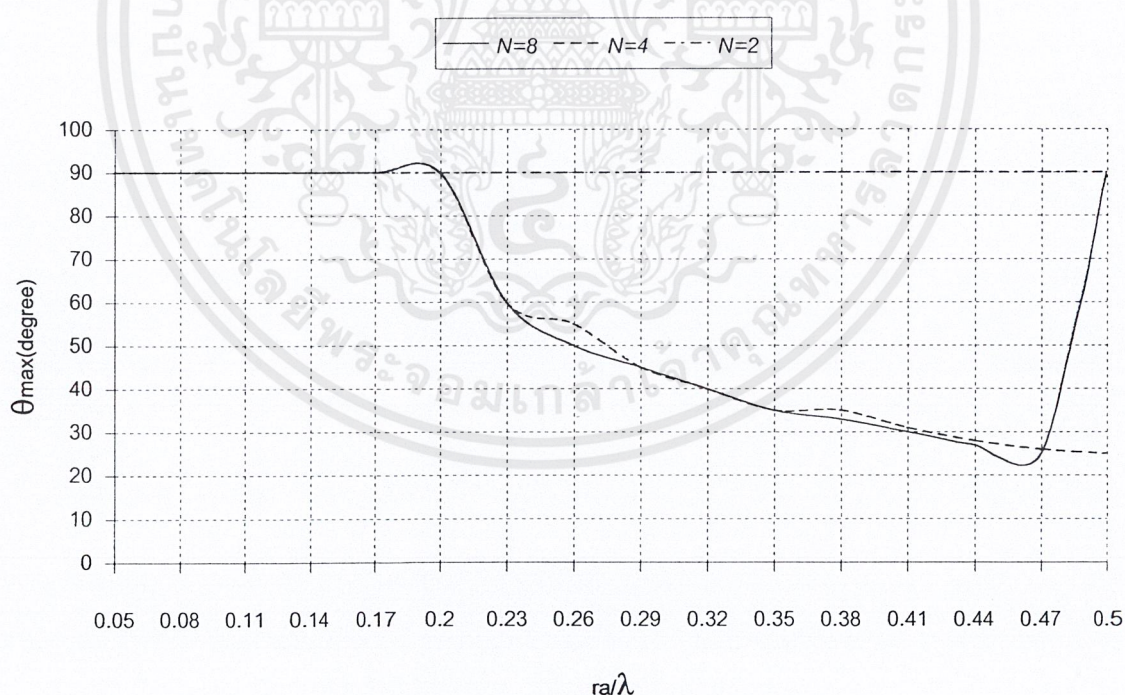
จะสังเกตได้ว่าค่าสนามจะเป็นศูนย์ในแนวตั้งฉากกับระนาบของสายอากาศ ส่วนกรณีสายอากาศชนิดเกลียวองค์ประกอบเดี่ยว เมื่อเพิ่มขนาดรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำจนมีขนาดเป็นอนันต์ ค่ามุมยกที่มีสนามสูงสุดจะมีค่ามากขึ้นจนถึง 90 องศา ส่วนกรณีสายอากาศแฉกลำดับที่มี 4 องค์ประกอบ ค่ามุมยกที่มีสนามสูงสุดจะมีค่าใกล้เคียง 36 องศา และจะมีค่าประมาณ 36 องศา เมื่อเพิ่มขนาดรัศมีของแผ่นระนาบ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ กรุงวอชิงตัน ดี.ซี. การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการยินยอมจากสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ กรุงวอชิงตัน ดี.ซี. จะถือว่าผิดกฎหมาย

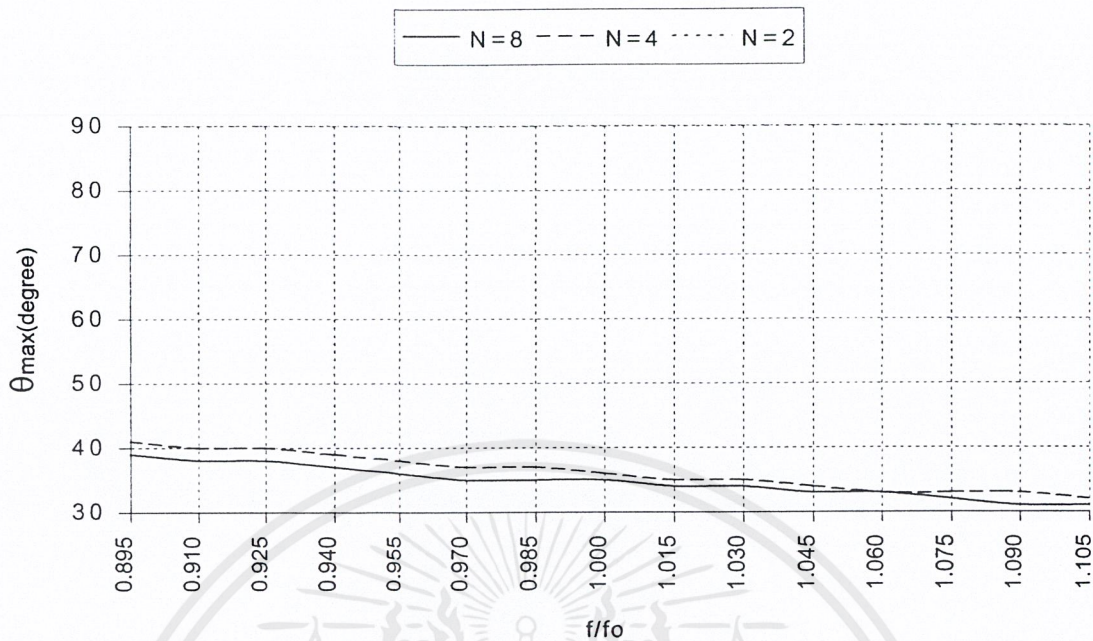
ตัวนำเข้าใกล้อนันต์ ดังที่กล่าวไว้แล้วในตอนต้น และจะสังเกตได้ว่า กรณีสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวจะควบคุมการชี้ทิศทางของลำคลื่น ได้ยากกว่ากรณีการจัดวางเป็นแถวลำดับ

3.7.2 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยก

ในการวิเคราะห์สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรูปกรวยนั้น พารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งคือค่ามุมที่มีสนามสูงสุดในระนาบมุมยก ซึ่งในรูปที่ 3.15 ได้แสดงค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยกเมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมีของแถวลำดับและขนาดรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำ ซึ่งเมื่อจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็น 2 การแพร่กระจายคลื่นจะไม่เป็นรูปกรวย เพราะค่าสนามสูงสุดจะคงที่ที่ 90 องศา การแพร่กระจายคลื่นรูปกรวยจะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับมีค่ามากกว่า 2 และสังเกตได้ว่าเมื่อจำนวนองค์ประกอบในแถวลำดับมีค่ามากขึ้น ค่ามุมยกที่มีสนามสูงสุดยังมีค่าลดลงตั้งแต่ขนาดรัศมี 0.2 λ เป็นต้นไป ส่วนค่ามุมยกที่สนามสูงสุดซึ่งพิจารณาในรูปฟังก์ชันของความถี่ได้นำมาแสดงด้วย ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.16 จะสังเกตได้ว่าค่ามุมยกจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อพิจารณาความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศ โดยพิจารณาจากค่ามุมในระนาบมุมยกพบว่าค่าความกว้างแถบความถี่เพียงพอในการนำไปใช้งาน



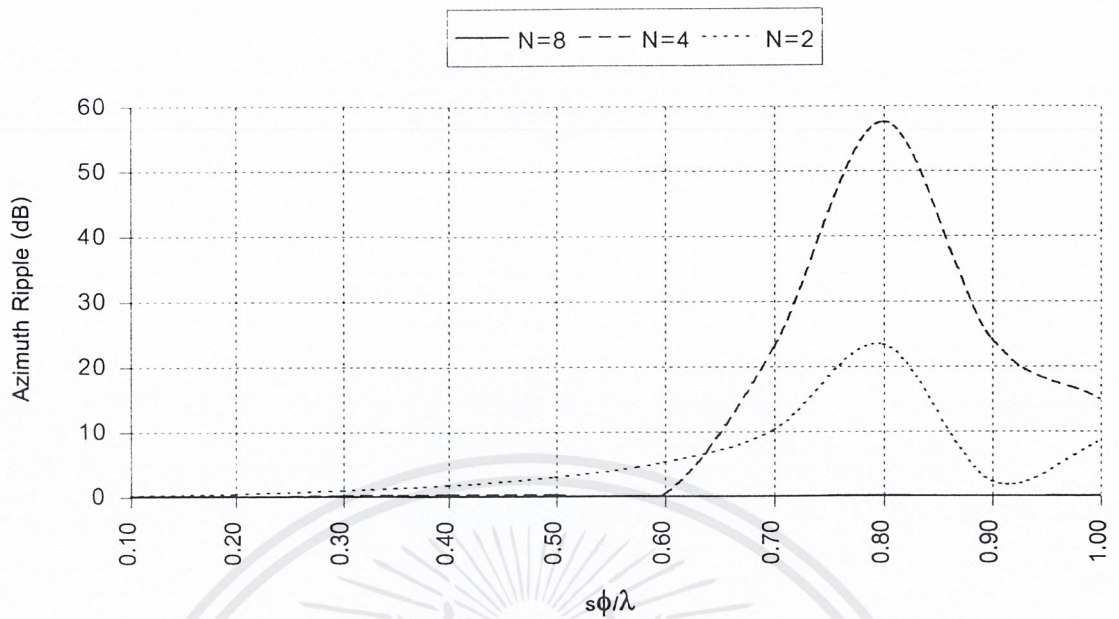
รูปที่ 3.15 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยกที่เป็นฟังก์ชันของขนาดรัศมีแถวลำดับ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็น 2, 4 และ 8



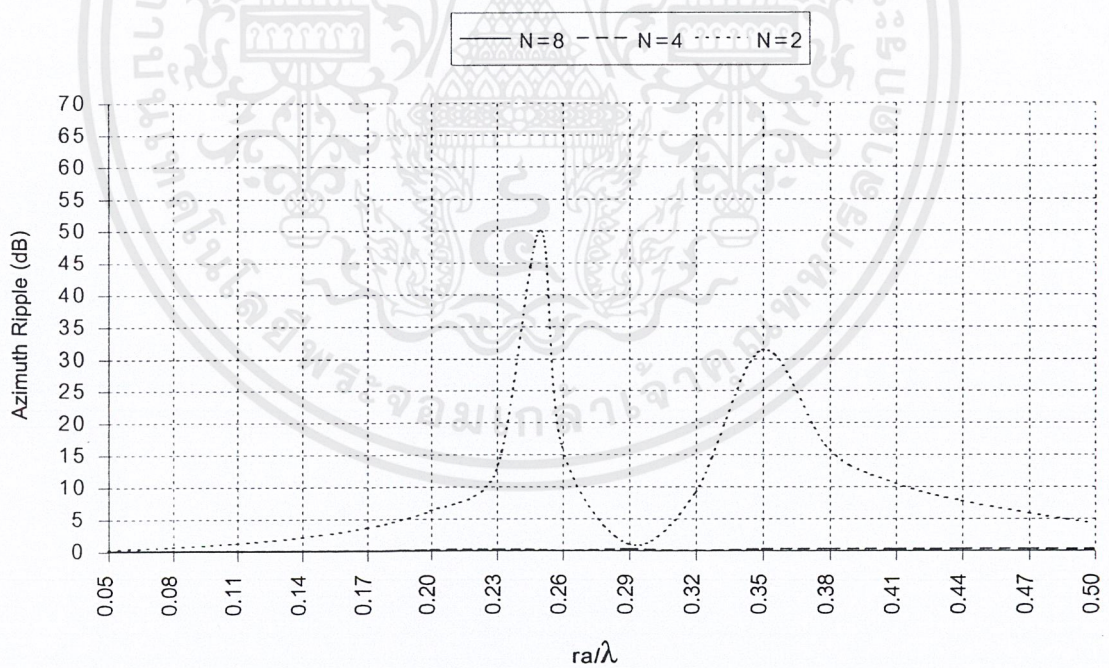
รูปที่ 3.16 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระยะนามุมขกที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแถวของลำดับเป็น 2, 4 และ 8

3.7.3 ค่าการกระเพื่อมในระยะนามุมกวาด

ค่าการกระเพื่อมในระยะนามุมกวาดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการบ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวในระยะนามุมกวาด ซึ่งถ้ามีการกระเพื่อมในระยะนามุมกวาดเกิดขึ้นการแพร่กระจายคลื่นจะไม่เป็นแบบรอบตัวในระยะนามุมกวาด นั่นคือมีการสูญเสียกำลังงานในขณะที่สายอากาศเปลี่ยนทิศทางในการรับส่งคลื่น ค่าการกระเพื่อมในระยะนามุมกวาดในรูปที่ 3.17 เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบในแถวลำดับนั้น ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติการกระเพื่อมในระยะนามุมกวาดแทนการใช้ขนาดรัศมีของแถวลำดับ สังเกตได้ชัดเจนว่าเมื่อระยะห่างระหว่างองค์ประกอบมีค่าน้อยกว่า 0.6λ ที่จำนวนองค์ประกอบในแถวลำดับที่มากกว่า 2 การแพร่กระจายคลื่นจะเป็นรูปกรวยเนื่องจากเกิดการกระเพื่อมในระยะนามุมกวาดน้อยมาก อีกกรณีที่พิจารณาคือเป็นฟังก์ชันของขนาดรัศมีของแถวลำดับ สายอากาศจะมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นรูปกรวยเมื่อจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับมากกว่า 2 เนื่องมาจากขนาดรัศมีแถวลำดับมีค่าน้อยเพียงพอดังแสดงในรูปที่ 3.18



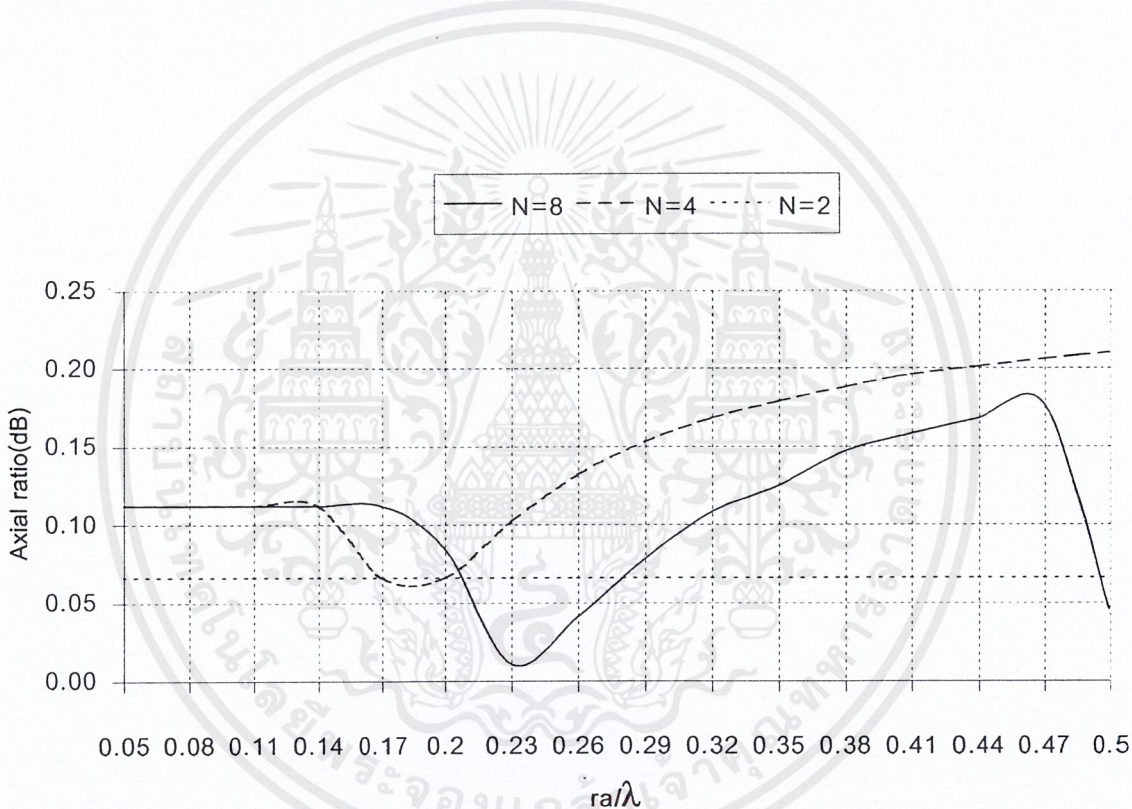
รูปที่ 3.17 ค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างในระนาบมุมกวาดระหว่างองค์ประกอบของแถวลำดับ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็น 2, 4 และ 8



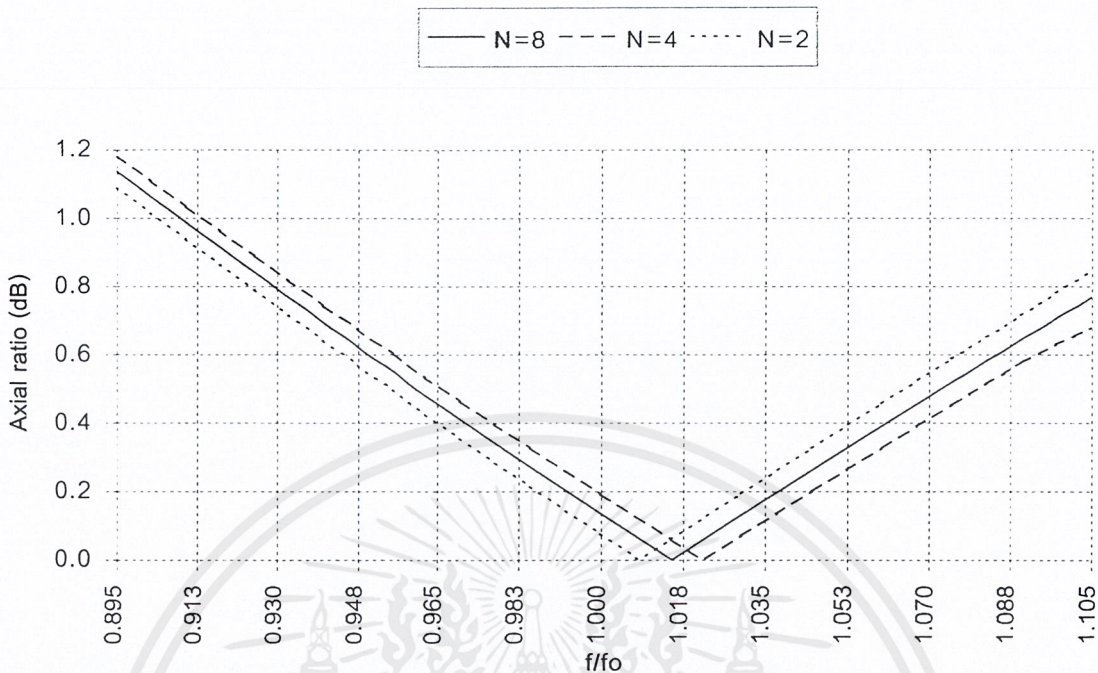
รูปที่ 3.18 ค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดที่เป็นฟังก์ชันของขนาดรัศมีของแถวลำดับ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็น 2, 4 และ 8

3.7.4 อัตราส่วนแกน

อัตราส่วนแกนเป็นคุณสมบัติเชิงการโพลาริไรซ์ที่สำคัญของสายอากาศ เพราะเป็นการบ่งบอกลักษณะของการโพลาริไรซ์ ซึ่งถ้าต้องการให้สายอากาศมีโพลาริไรซ์วงกลมที่สมบูรณ์นั้น ค่าขนาดสนามในแนวแกนตั้งกับแนวแกนนอนต้องมีขนาดเท่ากัน และมีเฟสต่างกัน 90 องศา กล่าวคือค่าอัตราส่วนแกนต้องมีค่า 0 dB ซึ่งในรูปที่ 3.19 ได้แสดงค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของค่าขนาดครีสมิของแฉวลำดับ และรูปที่ 3.20 แสดงค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแฉวลำดับ พบว่าค่าอัตราส่วนแกนที่ได้มีค่าน้อยกว่า 3 dB มากทั้งกรณีองค์ประกอบเดี่ยวและจัดวางแบบแฉวลำดับ ซึ่งแสดงว่ามีการโพลาริไรซ์เกือบจะเป็นวงกลมที่สมบูรณ์ นอกจากนี้สายอากาศยังทำงานได้ดีตลอดช่วงกว้างความถี่ 20 % และค่าอัตราส่วนแกนที่ความถี่ใช้งานก็มีค่าใกล้เคียง 0 dB มาก



รูปที่ 3.19 ค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของขนาดครีสมิของแฉวลำดับ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแฉวลำดับเป็น 2, 4 และ 8

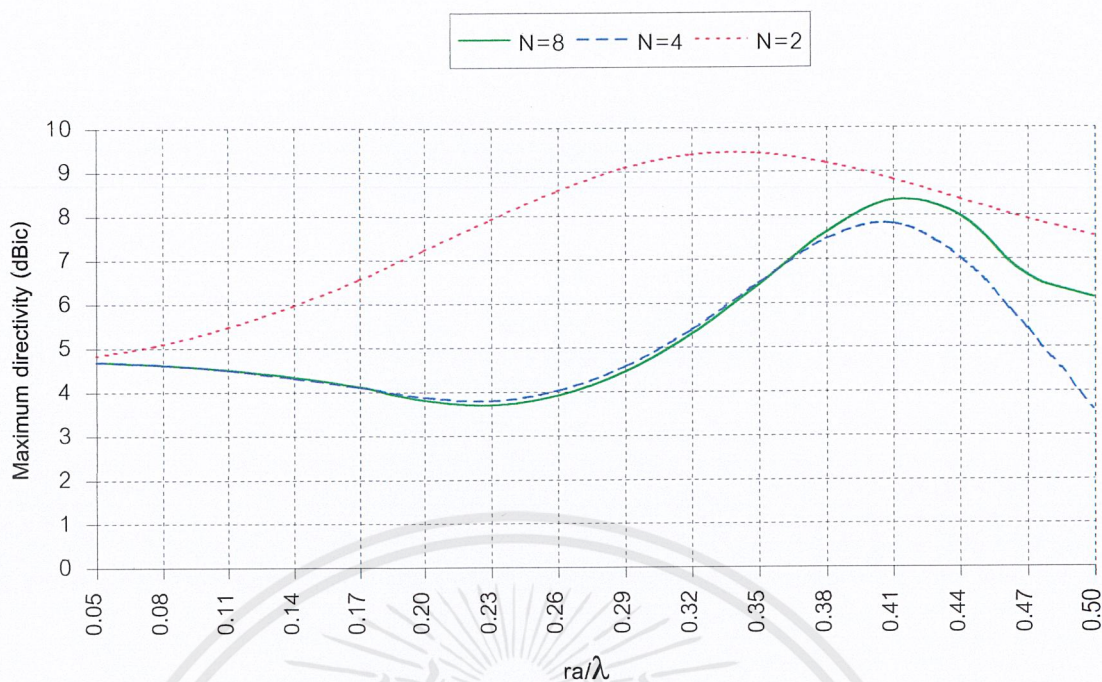


รูปที่ 3.20 ค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็น 2, 4 และ 8

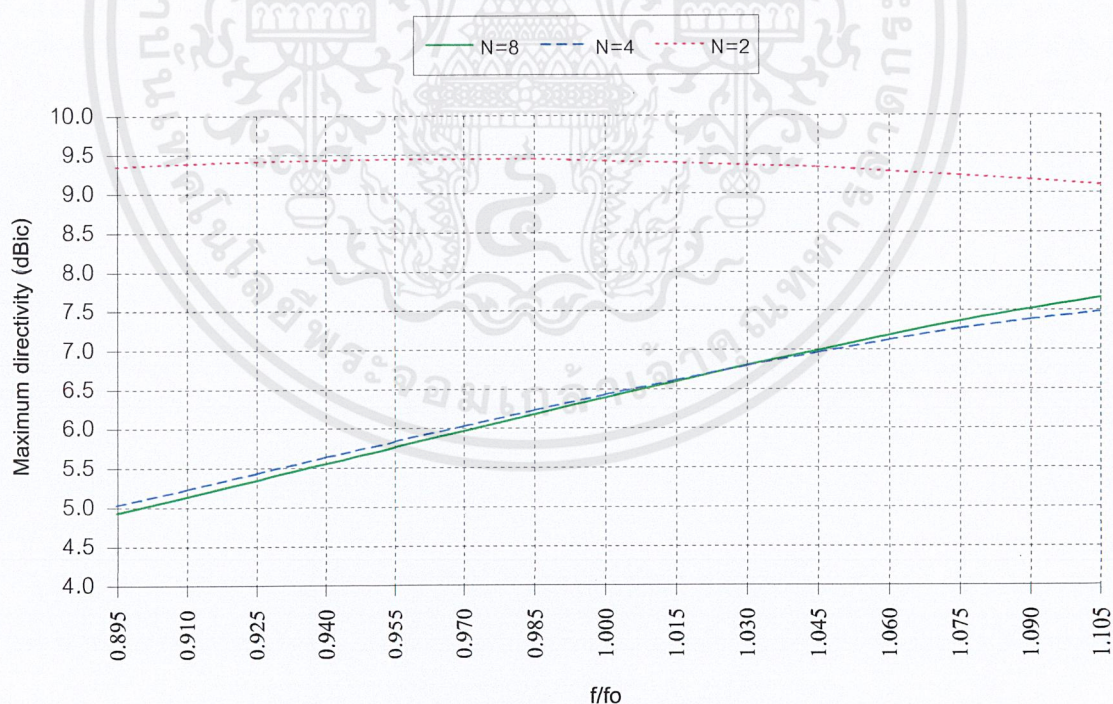
3.7.5 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเป็นคุณสมบัติหนึ่งซึ่งแสดงค่าความสามารถของสายอากาศในการชี้ไปยังเป้าหมายที่ต้องการ รูปที่ 3.21 ได้แสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากที่สุดที่เป็นฟังก์ชันของขนาดครีมีของแถวลำดับ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็น 2, 4 และ 8 ปรากฏว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่รัศมี r_s เท่ากับ 0.41λ และจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของแถวลำดับใหญ่ขึ้น ข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่ง คือเมื่อค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่ามากขึ้นค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมขงจะมีค่าลดลง

และค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดที่เป็นฟังก์ชันของความถี่แสดงไว้ในรูปที่ 3.22 ซึ่งมีแนวโน้มค่าสภาพเจาะจงทิศทางเพิ่มมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเสมือนว่าขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศมีขนาดเพิ่มขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 3.21 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากที่สุดที่เป็นฟังก์ชันของขนาดรัศมีของแถวลำดับ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็น 2, 4 และ 8

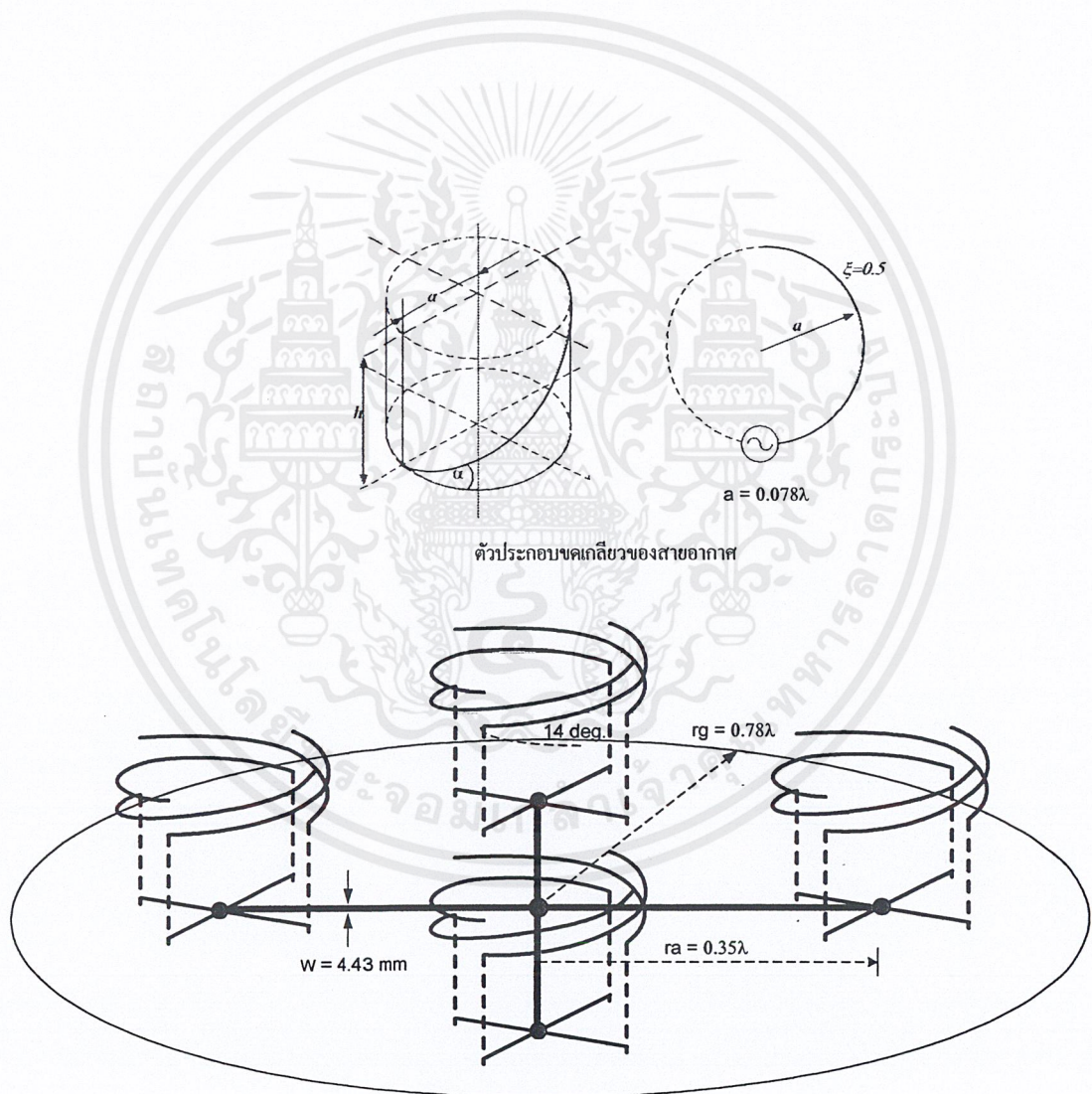


รูปที่ 3.22 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากที่สุดที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็น 2, 4 และ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การออกแบบสายอากาศ

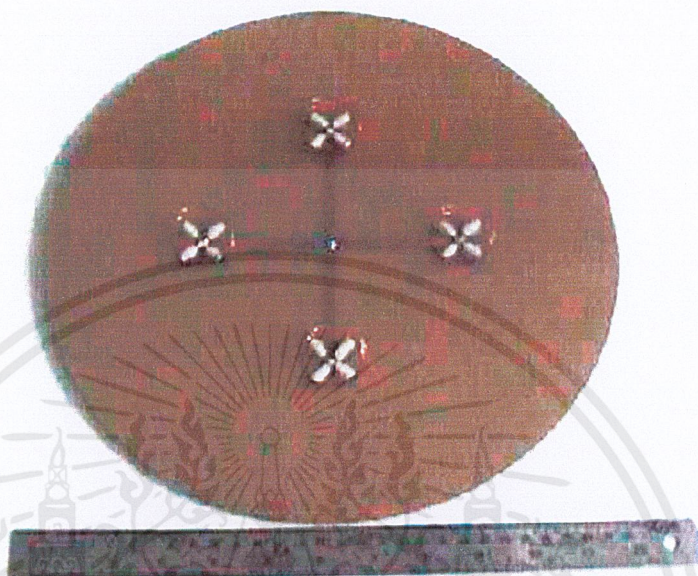
ในการออกแบบสายอากาศชนิดเกลียวที่จัดวางเป็นแถวลำดับวงกลมที่ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ โดยจะพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจากการวิเคราะห์ในกรณีองค์ประกอบเดี่ยวก่อน ซึ่งพบว่า ถ้าต้องการสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวและมีการโพลาไรซ์วงกลมหมุนวนวนั้น ค่ามุมเอียงของเกลียวเท่ากับ 14 องศา ค่าตัวประกอบของขดเกลียวเท่ากับ 0.5 และค่ารัศมีของเกลียวแต่ละขดเท่ากับ 0.078λ จากนั้นนำสายอากาศชนิดเกลียวแต่ละองค์ประกอบมาจัดวางในลักษณะแถวลำดับวงกลม ที่มีรัศมีของแถวลำดับวงกลมเท่ากับ r_a ($r_a = 0.35\lambda$) และรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเท่ากับ r_g ($r_g = 0.78\lambda$) ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับวงกลมชนิดเกลียวบนแผ่นระนาบตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบได้แล้วนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้นี้ไปทำการสร้างสายอากาศซึ่งต้นแบบของสายอากาศที่สร้างขึ้นมาแสดงในรูปที่ 3.24 และในรูปที่ 3.25 เป็นการนำชิ้นงานที่สร้างขึ้นมาไปประกอบกับแท่นวาง



รูปที่ 3.24 ต้นแบบของสายอากาศที่สร้างขึ้นมา



รูปที่ 3.25 สายอากาศเมื่อนำไปประกอบกับแท่นวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

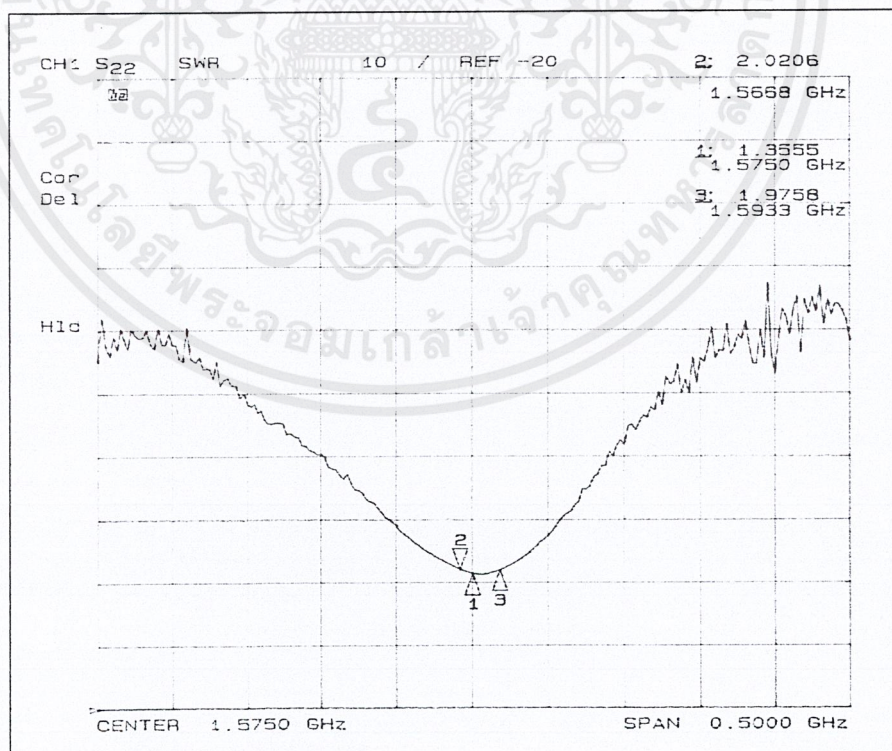
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้เราจะทำการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งได้ออกแบบสายอากาศชนิดเกลียวไว้ในบทที่ 3 สายอากาศนี้ออกแบบไว้ที่ความถี่ 1.575 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ใช้งานของดาวเทียมติดตามเป้าหมาย GPS โดยคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำการทดสอบในโครงการนี้ ได้แก่ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) ค่าอิมพีแดนซ์ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้ถือได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญที่จะใช้ช่วยในการตัดสินใจที่จะนำสายอากาศชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

4.1 การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่ง ที่ใช้พิจารณาว่าสายอากาศที่ทดสอบมีประสิทธิภาพดีเพียงพอต่อการนำสายอากาศไปใช้งานได้หรือไม่ โดยค่า SWR นี้จะแสดงถึงความแรงของการแทรกสอดของคลื่นส่งผ่านและคลื่นที่สะท้อนกลับ นั่นคือ SWR มีค่ามากแสดงถึงการแทรกสอดเกิดสูง ดังนั้นค่า SWR ที่ดีที่สุดคือ SWR มีค่า 1:1 ในการใช้งานโดยทั่วไปแล้ว ค่า SWR มาตรฐาน จะยอมให้เกิดขึ้นได้จะต้องมีค่าไม่เกิน 2 :1 สำหรับโครงการนี้ เมื่อทำการทดสอบค่า SWR พบว่า SWR ที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 1.3555 ที่ความถี่ 1.575 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ออกแบบซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1

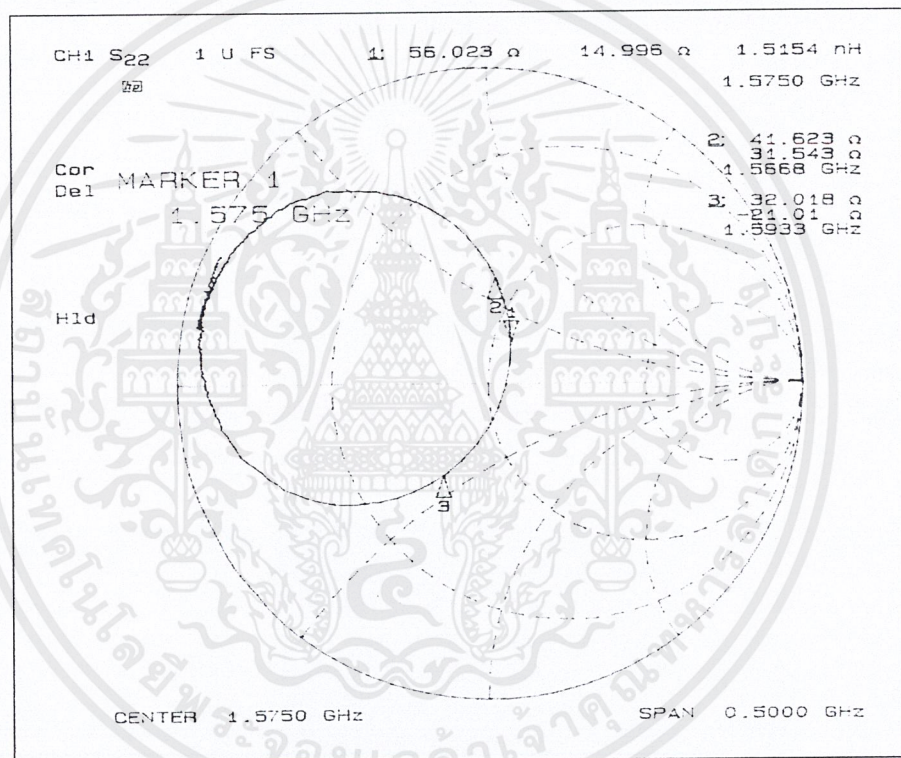


รูปที่ 4.1 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแถวลำดับที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์

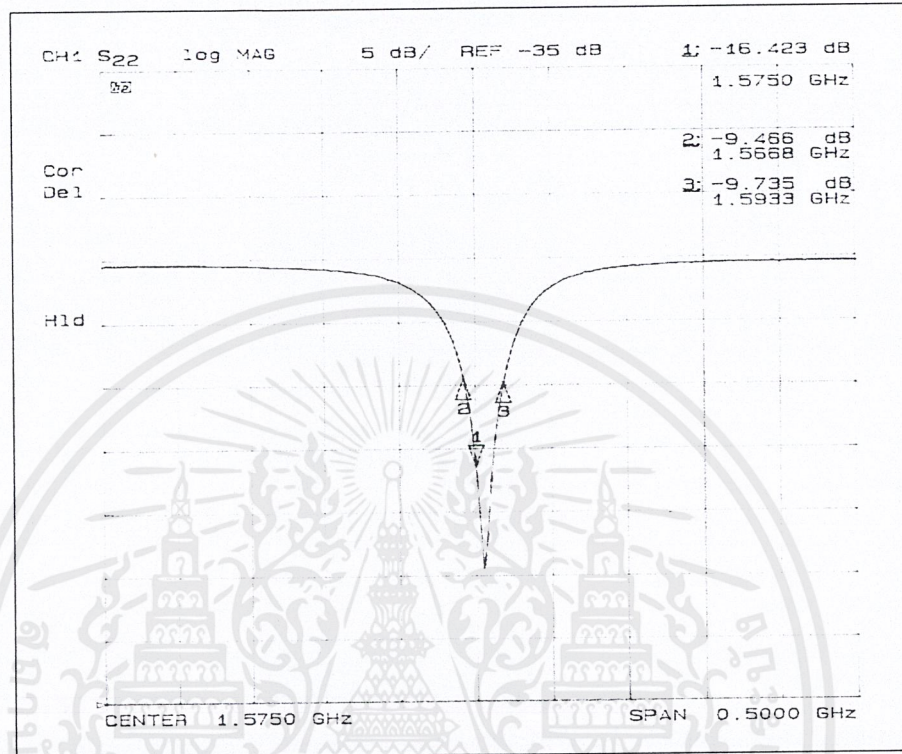
สายอากาศชนิดเกลียวที่ได้ทำการออกแบบมีจุดป้อนสัญญาณ 1 จุดอยู่ตรงกึ่งกลางของแผ่นระนาบตัวนำซึ่งการป้อนสัญญาณสำหรับสายอากาศแถวลำดับจะมีลักษณะป้อน 1 และออก 4 กล่าวคือ ป้อนสัญญาณตรงจุดกึ่งกลางและให้กระจายออกไปยังสายอากาศแต่ละองค์ประกอบให้มีกำลังเท่าๆกันในการทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์นี้ เพื่อที่จะใช้ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้แมชชิงกับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณจะมีค่าเท่ากับ 50Ω จากการทดสอบ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่วัดได้จะมีค่า เท่ากับ $56.023 \Omega + j14.996 \Omega$ ซึ่งผล การทดลองที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแถวลำดับที่ได้จากการทดลอง

4.3 การวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss)

โดยทั่วไปแล้ว ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ที่ยอมรับได้ควรมีค่าน้อยกว่า -10dB ซึ่งจากผลการทดสอบ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ -16.423dB แสดงดังรูปที่ 4.3



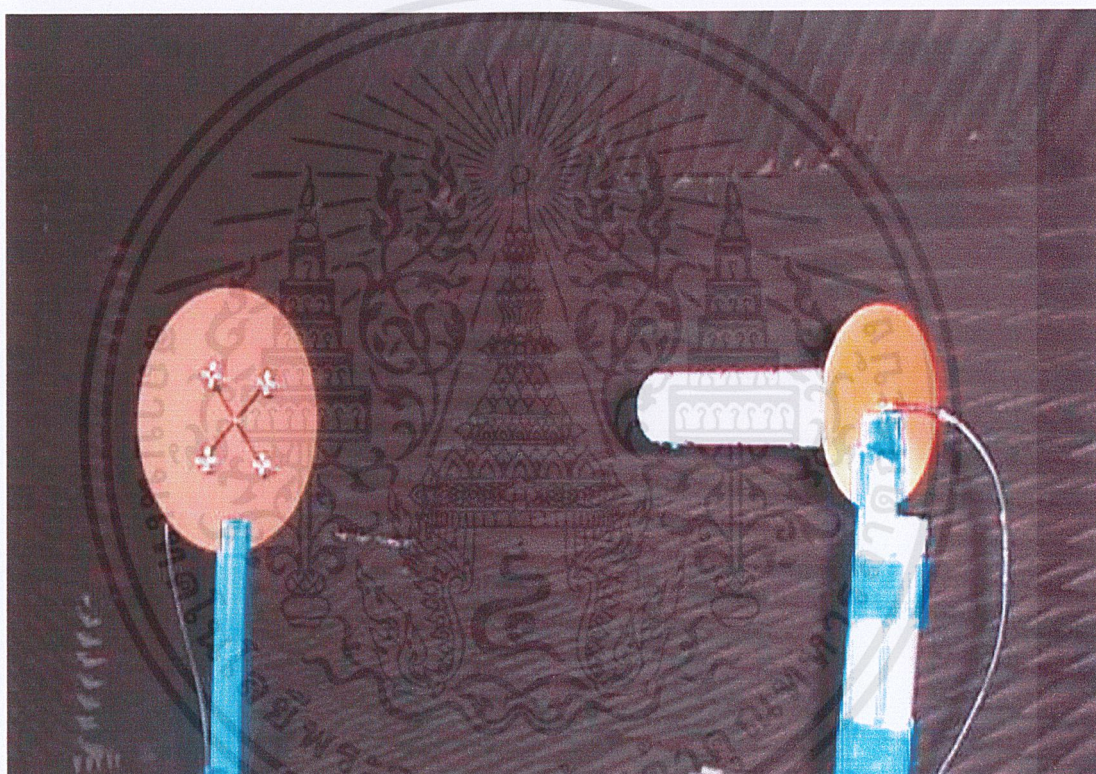
รูปที่ 4.3 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศชนิดเกลียวที่ได้จากการทดลอง

4.4 ช่วงกว้างแถบความถี่ใช้งาน

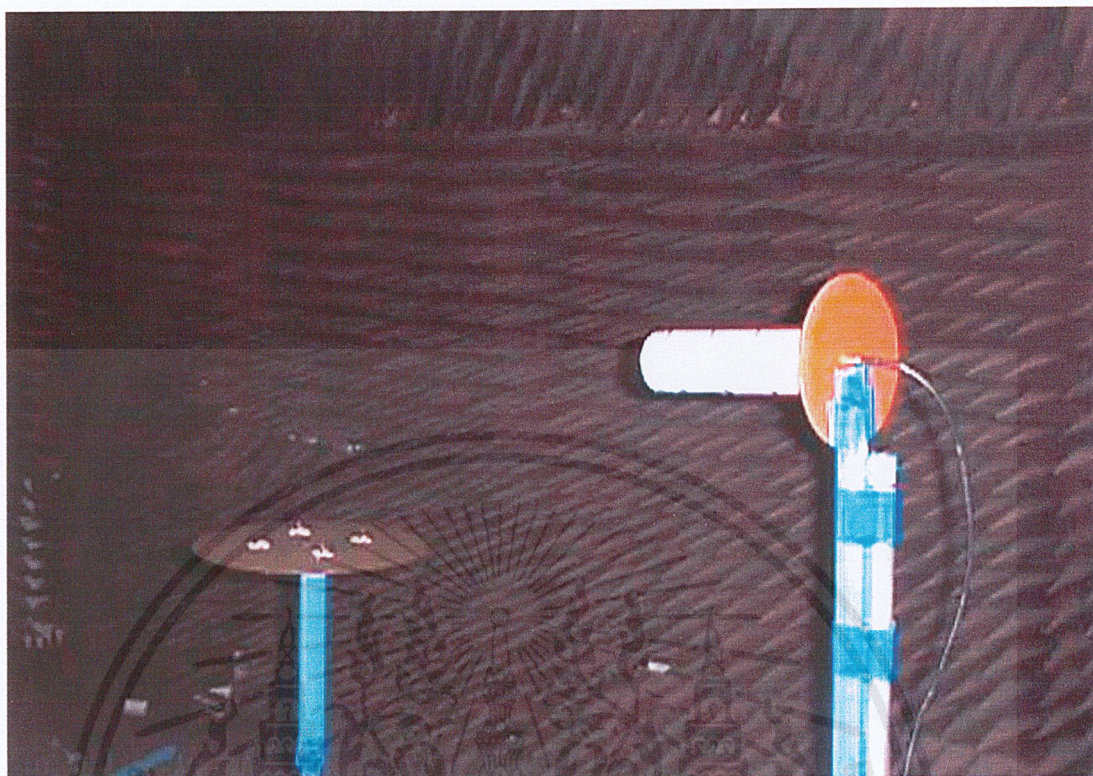
โดยทั่วไปแล้วช่วงกว้างแถบความถี่ใช้งานจะคิดที่ค่า SWR ไม่เกิน 2 ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้จากหัวข้อ 4.1 จะได้ช่วงกว้างแถบความถี่ เท่ากับ 1.5933 GHz - 1.5668 GHz เมื่อคิดที่ SWR เท่ากับ 2 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 26.5 MHz

4.5 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในโครงงานนี้ จะทำการทดสอบในห้องทดสอบการสะท้อนต่ำเพื่อป้องกันผลกระทบจากสภาพแวดล้อมโดยใช้สายอากาศด้านส่ง เป็นสายอากาศชนิดเกลียวที่มีการทำงานในโหมดตามแกน ซึ่งออกแบบขึ้นมาให้ใช้งานที่ความถี่ 1.575 GHz ส่วนสายอากาศทางด้านรับเป็นสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแถวลำดับวงกลม 4 องค์ประกอบ วางบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลม ในการวัดจะทำการหมุนสายอากาศด้านรับรอบตัวเองโดยใช้ทฤษฎีสภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) ทั้งในระนาบมุมยก และระนาบมุมกวาด ด้วยมอเตอร์ที่มีลำดับการเพิ่มขึ้นทีละ 5 องศา ซึ่งการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก



รูปที่ 4.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด

ในการทดสอบนั้นระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีค่าเท่ากับ 2.13 เมตร โดยพิจารณาจากระยะของสนามระยะไกลซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

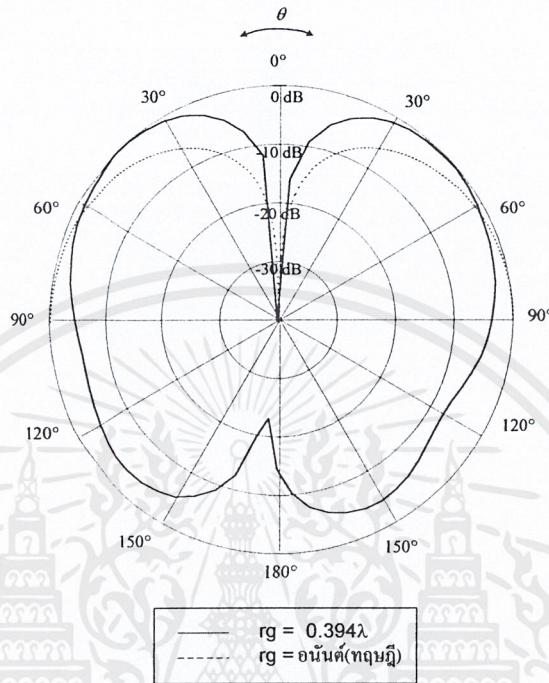
$$R = 2(Dt + Dr)^2 / \lambda$$

โดยที่ Dt คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศด้านส่ง

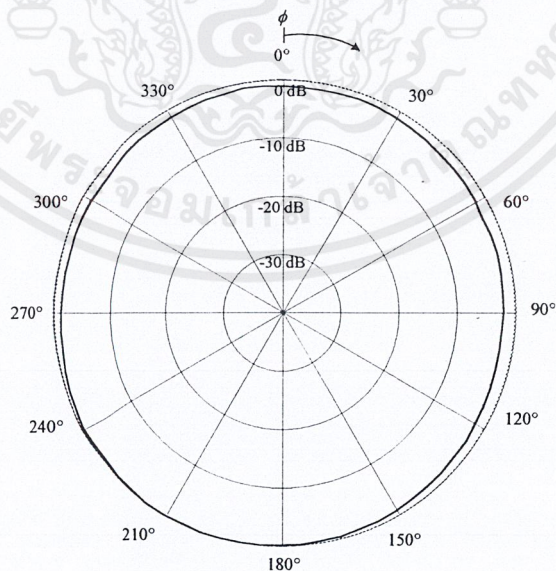
Dr คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศด้านรับ

ในการทดสอบนี้เราจะทำการทดสอบทั้งสายอากาศชนิดเกลียวองค์ประกอบเดี่ยว และกรณีสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแถวลำดับวงกลม 4 องค์ประกอบ

การทดสอบสายอากาศชนิดเกลียวองค์ประกอบเดี่ยวที่มีขนาดรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเท่ากับ 0.394λ เมื่อวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก และในระนาบมุมกวาดผลการทดลองที่ได้เมื่อเทียบกับทางทฤษฎีจะแสดงดังรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7



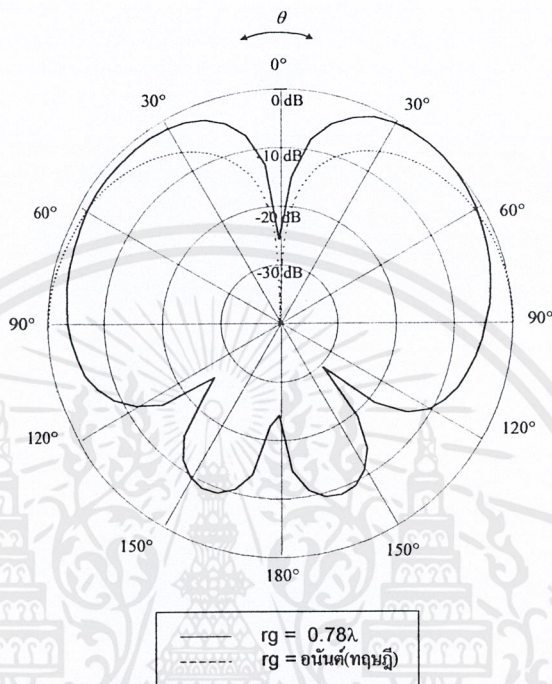
รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกของสายอากาศชนิดเกลียวองค์ประกอบเดี่ยวเมื่อรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเท่ากับ 0.394λ และเทียบกับทางทฤษฎี



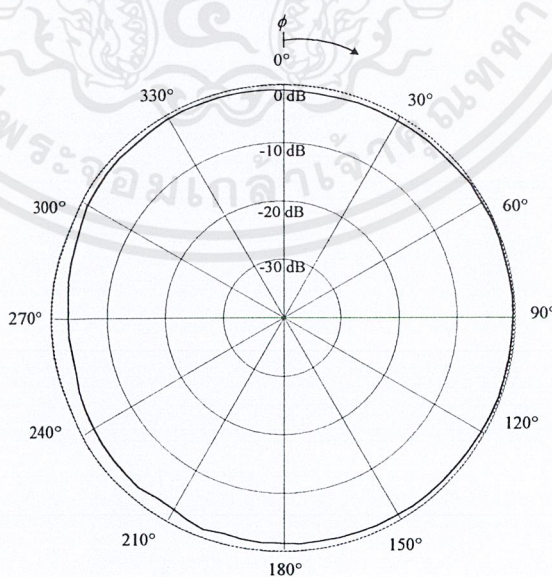
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดของสายอากาศชนิดเกลียวองค์ประกอบเดี่ยวเมื่อรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเท่ากับ 0.394λ และเทียบกับทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเป็น 0.78λ และวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบมุมยก และระนาบมุมกวาด พิจารณาได้ว่าในระนาบมุมยกจะมีลำคลื่นย่อยทางด้านหลังลดลงเนื่อง จากผลของแผ่นระนาบตัวนำ โดยถ้าแผ่นระนาบตัวนำมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้มีลำคลื่นย่อยทางด้านหลังลดลง การทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกของสายอากาศชนิดเกลียววงค์ประกอบเดี่ยวเมื่อรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเท่ากับ 0.78λ และเทียบกับทางทฤษฎี

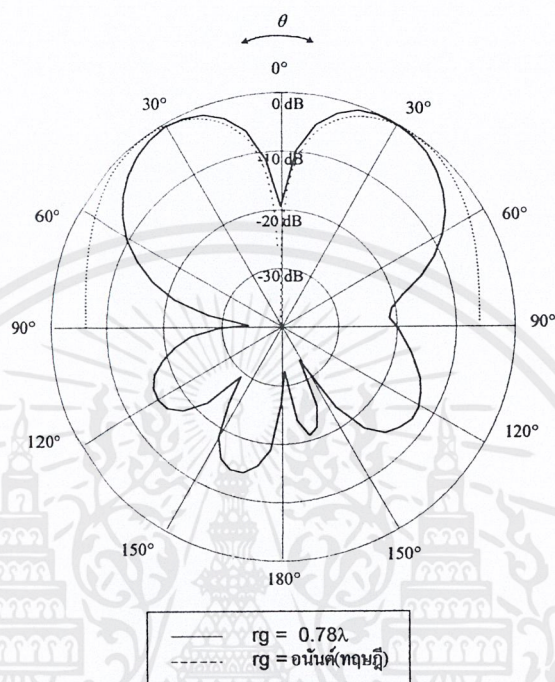


รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดของสายอากาศชนิดเกลียววงค์ประกอบ

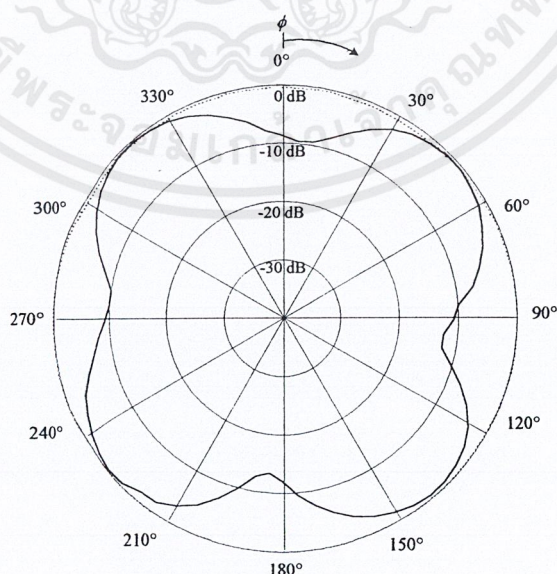
เดี่ยวเมื่อรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเท่ากับ 0.78λ และเทียบกับทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแถวลำดับวงกลม 4 องค์กรประกอบมีขนาดรัศมีของแถวลำดับเท่ากับ 0.35λ และรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเท่ากับ 0.78λ เมื่อวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก และในระนาบมุมกวาด ผลการทดลองที่ได้เมื่อเทียบกับทางทฤษฎีจะแสดงดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแถวลำดับวงกลม 4 องค์กรประกอบ และเทียบกับทางทฤษฎี



รูปที่ 4.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแถวลำดับวงกลม 4 องค์กรประกอบ และเทียบกับทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ การออกแบบ การสร้าง และทดสอบสายอากาศแถวลำดับชนิดเกลียว ที่วางบนแผ่นระนาบตัวนำวงกลม ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรูปกรวย และการโพลาไรซ์แบบวงกลม โดยส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์ออกแบบ การสร้าง และทดสอบสายอากาศแบบเกลียวในโหมดตั้งฉาก ซึ่งเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ในการสร้างคือ ค่าตัวประกอบขดเกลียว และค่ามุมเอียงของเกลียว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5 และ 14° ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาด ผลที่ได้ก็คือ ในระนาบมุมยกจะมีค่าสนามสูงสุดในแนวตั้งฉากกับสายอากาศ และมีค่าสนามต่ำสุดตามแนวแกนของสายอากาศ ส่วนในระนาบมุมกวาดค่าสนามจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งได้ลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว และเมื่อคำนวณค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมีค่าเท่ากับ 4.734 dBic

จากนั้นนำสายอากาศชนิดเกลียวจำนวน 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบวงกลมที่วางบนแผ่นระนาบตัวนำ และได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ เช่น ค่ามุมยกที่มีค่าสนามสูงสุด ค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาด ค่าอัตราส่วนแกน และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ซึ่งแสดงเป็นฟังก์ชันของขนาดรัศมีแถวลำดับ จำนวนองค์ประกอบของสายอากาศ และความถี่ ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศและขนาดรัศมีของแถวลำดับคือ เมื่อองค์ประกอบและขนาดรัศมีของแถวลำดับมีค่ามาก ค่ามุมยกที่มีค่าสนามสูงสุดจะมีค่าน้อย ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเพิ่มขึ้น แต่จะมีลำคลื่นย่อยเกิดขึ้น และเมื่อจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศและขนาดรัศมีของแถวลำดับมีค่าน้อย ค่ามุมยกที่มีค่าสนามสูงสุดจะมีค่ามาก ทำให้ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางต่ำ เช่น กรณีที่จำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 2 และค่าขนาดรัศมีของแถวลำดับมีค่าน้อยกว่า 0.15λ จะมีค่ามุมยกที่สนามสูงสุดเท่ากับ 90° และลำคลื่นจะไม่เป็นรูปกรวย

สายอากาศแถวลำดับชนิดเกลียวที่สร้างจะมีจำนวน 4 องค์ประกอบ ขนาดรัศมีของแถวลำดับเท่ากับ 0.35λ เมื่อทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาด ได้ค่าสนามสูงสุดของสายอากาศที่มุมยกเท่ากับ 36° และในระนาบมุมกวาดก็ยังคงได้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งเป็นลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรูปกรวย เมื่อคำนวณค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าเท่ากับ 6.456 dBic จะเห็นว่าเมื่อนำสายอากาศชนิดเกลียวมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับทำให้คุณลักษณะของสายอากาศเปลี่ยนไปกล่าวคือ ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรูปกรวยและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงขึ้น ข้อดีของสายอากาศแถวลำดับวงกลมของสายอากาศชนิดเกลียวคือ มีลำคลื่นรูปกรวย และการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางเมื่อนำไปใช้กับระบบสื่อสารดาวเทียมเคลื่อนที่จึงไม่จำเป็นต้องใช้ระบบติดตามเป้าหมาย ข้อบกพร่องของสายอากาศตัวนี้คือ จะเกิดลำคลื่นด้านหลังซึ่งเป็นผลมาจากกาเรเลี้ยวเบนของคลื่นเนื่องจากขนาดจำกัดของกราวด์เพลน แต่สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มขนาดของแผ่นระนาบตัวนำให้ใหญ่ขึ้น



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมหาค่าสนามในองค์ประกอบแนวตั้งและแนวนอนที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียงของเกลียว
เมื่อเปลี่ยนค่าตัวประกอบของขดเกลียวของสายอากาศ

$$f := 1.575 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad \lambda := \frac{c}{f}$$

$$\xi := 0.25 \quad \alpha := 0\text{deg}, 1\text{deg} \dots 20\text{deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\alpha) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad I_m := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\alpha) := \frac{a(\alpha) \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\alpha) := l(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \quad E_o(\alpha) := \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot I_m}{\lambda}$$

$$\phi := 45\text{deg} \quad \theta := 90\text{deg} \quad w(\alpha) := k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

$$u(\alpha) := k \cdot a(\alpha) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v(\alpha) := k \cdot a(\alpha) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E_{\theta 1}(\alpha) := i \cdot E_o(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\alpha)) + \cos(v(\alpha))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E_{\phi 1}(\alpha) := E_o(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\alpha)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\alpha)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$f := 1.575 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad \lambda := \frac{c}{f}$$

$$\xi := 0.5 \quad \alpha := 0\text{deg}, 1\text{deg} \dots 20\text{deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\alpha) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad I_m := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\alpha) := \frac{a(\alpha) \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\alpha) := l(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \quad E_o(\alpha) := \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot I_m}{\lambda}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi := 45\text{deg} \quad \theta := 90\text{deg} \quad w(\alpha) := k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

$$u(\alpha) := k \cdot a(\alpha) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v(\alpha) := k \cdot a(\alpha) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta 2(\alpha) := i \cdot Eo(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\alpha)) + \cos(v(\alpha))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E\phi 2(\alpha) := Eo(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\alpha)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\alpha)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$f := 1.575 \cdot 10^9$$

$$c := 3 \cdot 10^8$$

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

$$\xi := 0.75$$

$$\alpha := 0\text{deg}, 1\text{deg} \dots 20\text{deg}$$

$$k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\alpha) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi}$$

$$\text{Im} := 1$$

$$\eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\alpha) := \frac{a(\alpha) \cdot \xi}{\cos(\alpha)}$$

$$h(\alpha) := l(\alpha) \cdot \sin(\alpha)$$

$$Eo(\alpha) := \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45\text{deg}$$

$$\theta := 90\text{deg}$$

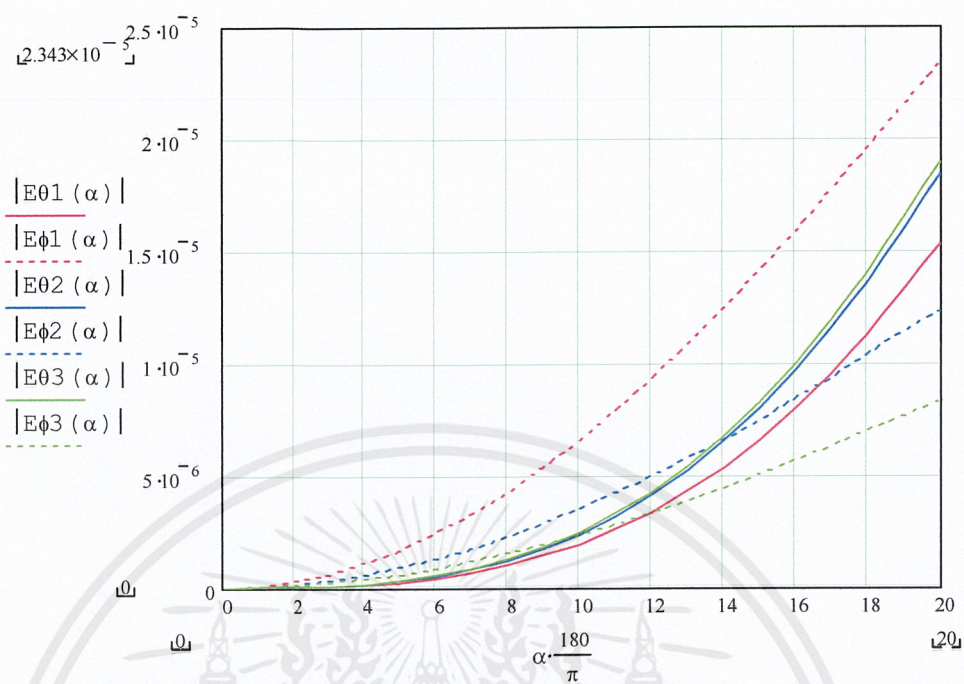
$$w(\alpha) := k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

$$u(\alpha) := k \cdot a(\alpha) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v(\alpha) := k \cdot a(\alpha) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta 3(\alpha) := i \cdot Eo(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\alpha)) + \cos(v(\alpha))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E\phi 3(\alpha) := Eo(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\alpha)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\alpha)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 ค่าสนามในองค์ประกอบแนวตั้งและแนวนอนที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียงของเกลียวเมื่อเปลี่ยนค่าตัวประกอบของขดเกลียวของสายอากาศ

โปรแกรมหาค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของค่าตัวประกอบของขดเกลียวของสายอากาศเมื่อ
เปลี่ยนค่ามุมเอียงของขดเกลียว

$$f := 1.575 \cdot 10^9$$

$$c := 3 \cdot 10^8$$

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

$$\xi := 0.2, 0.25 \dots 1.0$$

$$\alpha := 10 \text{deg}$$

$$k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\xi) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi}$$

$$Im := 1$$

$$\eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\xi) := \frac{a(\xi) \cdot \xi}{\cos(\alpha)}$$

$$h(\xi) := l(\xi) \cdot \sin(\alpha)$$

$$Eo(\xi) := \frac{2 \cdot h(\xi)^2 \cdot Im}{\lambda}$$

$$\phi := 45 \text{deg}$$

$$\theta := 90 \text{deg}$$

$$w(\xi) := k \cdot h(\xi) \cdot \cos(\theta)$$

$$u(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)$$

$$v(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\xi) := i \cdot Eo(\xi) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\xi)) + \cos(v(\xi))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$E\phi(\xi) := Eo(\xi) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\xi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\xi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$Axial1(\xi) := \frac{|E\theta(\xi)|}{|E\phi(\xi)|}$$

$$\xi := 0.2, 0.25 \dots 1.0$$

$$\alpha := 12 \text{deg}$$

$$k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\xi) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi}$$

$$Im := 1$$

$$\eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\xi) := \frac{a(\xi) \cdot \xi}{\cos(\alpha)}$$

$$h(\xi) := l(\xi) \cdot \sin(\alpha)$$

$$Eo(\xi) := \frac{2 \cdot h(\xi)^2 \cdot Im}{\lambda}$$

$$\phi := 45 \text{deg}$$

$$\theta := 90 \text{deg}$$

$$w(\xi) := k \cdot h(\xi) \cdot \cos(\theta)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\xi) := i \cdot Eo(\xi) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\xi)) + \cos(v(\xi))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$E\phi(\xi) := Eo(\xi) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\xi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\xi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$\text{Axial2}(\xi) := \frac{|E\theta(\xi)|}{|E\phi(\xi)|}$$

$$\xi := 0.2, 0.25.. 1.0$$

$$\alpha := 14\text{deg}$$

$$k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\xi) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi}$$

$$\text{Im} := 1$$

$$\eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\xi) := \frac{a(\xi) \cdot \xi}{\cos(\alpha)}$$

$$h(\xi) := l(\xi) \cdot \sin(\alpha)$$

$$Eo(\xi) := \frac{2 \cdot h(\xi)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45\text{deg}$$

$$\theta := 90\text{deg}$$

$$w(\xi) := k \cdot h(\xi) \cdot \cos(\theta)$$

$$u(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)$$

$$v(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\xi) := i \cdot Eo(\xi) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\xi)) + \cos(v(\xi))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$E\phi(\xi) := Eo(\xi) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\xi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\xi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$\text{Axial3}(\xi) := \frac{|E\theta(\xi)|}{|E\phi(\xi)|}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\xi := 0.2, 0.25.. 1.0 \quad \alpha := 16\text{deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\xi) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\xi) := \frac{a(\xi) \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\xi) := l(\xi) \cdot \sin(\alpha) \quad E_0(\xi) := \frac{2 \cdot h(\xi)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45\text{deg} \quad \theta := 90\text{deg} \quad w(\xi) := k \cdot h(\xi) \cdot \cos(\theta)$$

$$u(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E_\theta(\xi) := i \cdot E_0(\xi) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\xi)) + \cos(v(\xi))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$E_\phi(\xi) := E_0(\xi) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\xi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\xi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$\text{Axial4}(\xi) := \frac{|E_\theta(\xi)|}{|E_\phi(\xi)|}$$

$$\xi := 0.2, 0.25.. 1.0 \quad \alpha := 18\text{deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\xi) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\xi) := \frac{a(\xi) \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\xi) := l(\xi) \cdot \sin(\alpha) \quad E_0(\xi) := \frac{2 \cdot h(\xi)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45\text{deg} \quad \theta := 90\text{deg} \quad w(\xi) := k \cdot h(\xi) \cdot \cos(\theta)$$

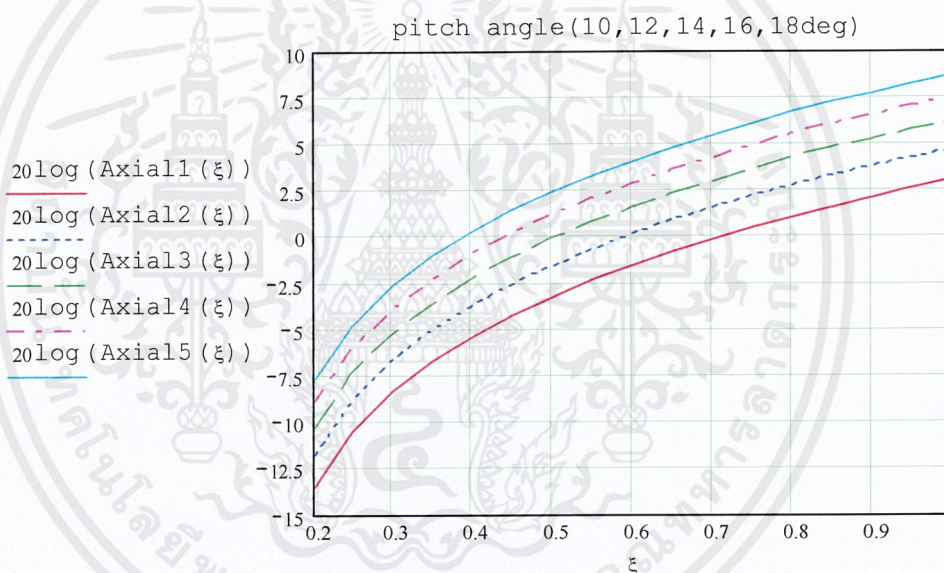
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\xi) := i \cdot E_0(\xi) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\xi)) + \cos(v(\xi))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$E\phi(\xi) := E_0(\xi) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\xi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\xi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$\text{Axial5}(\xi) := \frac{|E\theta(\xi)|}{|E\phi(\xi)|}$$



รูปที่ 6.2 อัตราส่วนแกนแนวตั้งต่อแนวนอนที่เป็นฟังก์ชันของค่าตัวประกอบของขดเกลียวของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่านุมเอียงของขดเกลียว

$$f := 1.575 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad \lambda := \frac{c}{f}$$

$$\xi := 0.2, 0.25 \dots 1.0 \quad \alpha := 10 \text{deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\xi) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\xi) := \frac{a(\xi) \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\xi) := l(\xi) \cdot \sin(\alpha) \quad Eo(\xi) := \frac{2 \cdot h(\xi)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45 \text{deg} \quad \theta := 90 \text{deg} \quad w(\xi) := k \cdot h(\xi) \cdot \cos(\theta)$$

$$u(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\xi) := i \cdot Eo(\xi) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\xi)) + \cos(v(\xi))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$E\phi(\xi) := Eo(\xi) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\xi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\xi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$\text{Axial1}(\xi) := \frac{|E\phi(\xi)|}{|E\theta(\xi)|}$$

$$\xi := 0.2, 0.25 \dots 1.0 \quad \alpha := 12 \text{deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\xi) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\xi) := \frac{a(\xi) \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\xi) := l(\xi) \cdot \sin(\alpha) \quad Eo(\xi) := \frac{2 \cdot h(\xi)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45 \text{deg} \quad \theta := 90 \text{deg} \quad w(\xi) := k \cdot h(\xi) \cdot \cos(\theta)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\xi) := i \cdot Eo(\xi) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\xi)) + \cos(v(\xi))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$E\phi(\xi) := Eo(\xi) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\xi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\xi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$\text{Axial2}(\xi) := \frac{|E\phi(\xi)|}{|E\theta(\xi)|}$$

$$\xi := 0.2, 0.25 \dots 1.0 \quad \alpha := 14 \text{deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\xi) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\xi) := \frac{a(\xi) \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\xi) := l(\xi) \cdot \sin(\alpha) \quad Eo(\xi) := \frac{2 \cdot h(\xi)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45 \text{deg} \quad \theta := 90 \text{deg} \quad w(\xi) := k \cdot h(\xi) \cdot \cos(\theta)$$

$$u(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\xi) := i \cdot Eo(\xi) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\xi)) + \cos(v(\xi))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$E\phi(\xi) := Eo(\xi) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\xi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\xi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$\text{Axial3}(\xi) := \frac{|E\phi(\xi)|}{|E\theta(\xi)|}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\xi := 0.2, 0.25 \dots 1.0 \quad \alpha := 16 \text{deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\xi) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\xi) := \frac{a(\xi) \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\xi) := l(\xi) \cdot \sin(\alpha) \quad \text{Eo}(\xi) := \frac{2 \cdot h(\xi)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45 \text{deg} \quad \theta := 90 \text{deg} \quad w(\xi) := k \cdot h(\xi) \cdot \cos(\theta)$$

$$u(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$\text{E}\theta(\xi) := i \cdot \text{Eo}(\xi) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\xi)) + \cos(v(\xi))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$\text{E}\phi(\xi) := \text{Eo}(\xi) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\xi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\xi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$\text{Axial4}(\xi) := \frac{|\text{E}\phi(\xi)|}{|\text{E}\theta(\xi)|}$$

$$\xi := 0.2, 0.25 \dots 1.0 \quad \alpha := 18 \text{deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a(\xi) := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\xi) := \frac{a(\xi) \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\xi) := l(\xi) \cdot \sin(\alpha) \quad \text{Eo}(\xi) := \frac{2 \cdot h(\xi)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45 \text{deg} \quad \theta := 90 \text{deg} \quad w(\xi) := k \cdot h(\xi) \cdot \cos(\theta)$$

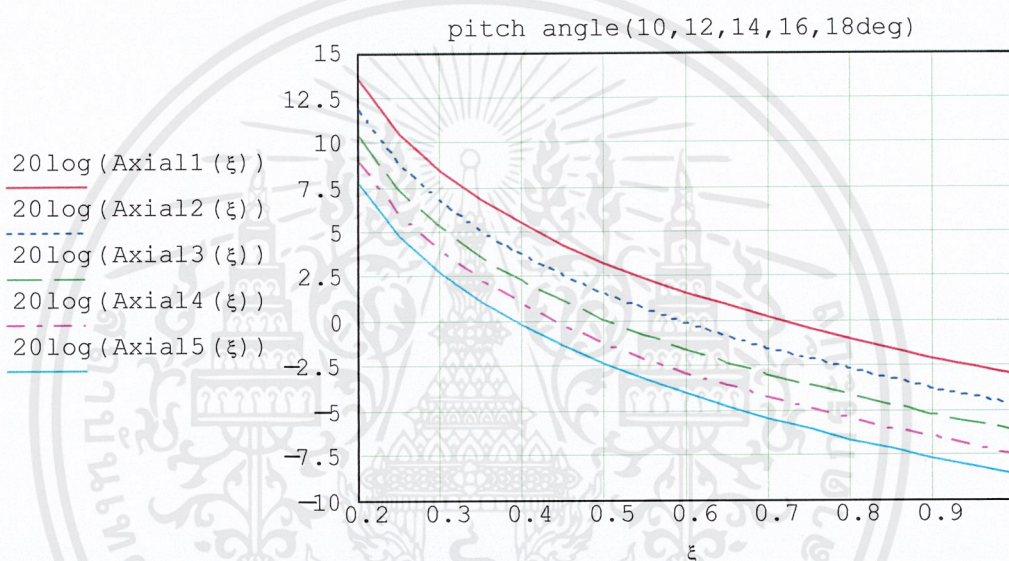
$$u(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v(\xi) := k \cdot a(\xi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\theta}(\xi) := i \cdot E_0(\xi) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\xi)) + \cos(v(\xi))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$E_{\phi}(\xi) := E_0(\xi) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\xi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\xi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\xi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\xi)^2}$$

$$\text{Axial5}(\xi) := \frac{|E_{\phi}(\xi)|}{|E_{\theta}(\xi)|}$$



รูปที่ 6.3 อัตราส่วนแกนแนวนอนต่อแนวตั้งที่เป็นฟังก์ชันของค่าตัวประกอบของขดเกลียวของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่ามุมเอียงของขดเกลียว

โปรแกรมหาค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียงของเกลียวเมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมีของขดเกลียว

$$\begin{aligned}
 f &:= 1.575 \cdot 10^9 & c &:= 3 \cdot 10^8 & \lambda &:= \frac{c}{f} \\
 \xi &:= 0.5 & \alpha &:= 9\text{deg}, 10\text{deg} \dots 20\text{deg} & k &:= \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \\
 a &:= 0.06 \cdot \lambda & \text{Im} &:= 1 & \eta &:= 120 \cdot \pi \\
 l(\alpha) &:= \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)} & h(\alpha) &:= l(\alpha) \cdot \sin(\alpha) & E_o(\alpha) &:= \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda} \\
 \phi &:= 45\text{deg} & \theta &:= 90\text{deg} & w(\alpha) &:= k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta) \\
 u &:= k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) & v &:= k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) \\
 E_{\theta}(\alpha) &:= i \cdot E_o(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u) + \cos(v)) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2} \\
 E_{\phi}(\alpha) &:= E_o(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u) \cdot \cos(\phi) + \sin(v) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2} \\
 \text{Axial}l(\alpha) &:= \frac{|E_{\theta}(\alpha)|}{|E_{\phi}(\alpha)|}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f &:= 1.575 \cdot 10^9 & c &:= 3 \cdot 10^8 & \lambda &:= \frac{c}{f} \\
 \xi &:= 0.5 & \alpha &:= 9\text{deg}, 10\text{deg} \dots 20\text{deg} & k &:= \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \\
 a &:= 0.07 \cdot \lambda & \text{Im} &:= 1 & \eta &:= 120 \cdot \pi \\
 l(\alpha) &:= \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)} & h(\alpha) &:= l(\alpha) \cdot \sin(\alpha) & E_o(\alpha) &:= \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda} \\
 \phi &:= 45\text{deg} & \theta &:= 90\text{deg} & w(\alpha) &:= k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)$$

$$v := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\alpha) := i \cdot Eo(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u) + \cos(v)) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$E\phi(\alpha) := Eo(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u) \cdot \cos(\phi) + \sin(v) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$\text{Axial2}(\alpha) := \frac{|E\theta(\alpha)|}{|E\phi(\alpha)|}$$

$$f := 1.575 \cdot 10^9$$

$$c := 3 \cdot 10^8$$

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

$$\xi := 0.5$$

$$\alpha := 9\text{deg}, 10\text{deg} \dots 20\text{deg}$$

$$k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a := 0.08 \cdot \lambda$$

$$\text{Im} := 1$$

$$\eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\alpha) := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)}$$

$$h(\alpha) := l(\alpha) \cdot \sin(\alpha)$$

$$Eo(\alpha) := \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45\text{deg}$$

$$\theta := 90\text{deg}$$

$$w(\alpha) := k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

$$u := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)$$

$$v := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\alpha) := i \cdot Eo(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u) + \cos(v)) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$E\phi(\alpha) := Eo(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u) \cdot \cos(\phi) + \sin(v) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$\text{Axial3}(\alpha) := \frac{|E\theta(\alpha)|}{|E\phi(\alpha)|}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f := 1.575 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \text{ m} \quad \lambda := \frac{c}{f}$$

$$\xi := 0.5 \quad \alpha := 9 \text{ deg}, 10 \text{ deg} \dots 20 \text{ deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a := 0.09 \cdot \lambda \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\alpha) := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\alpha) := l(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \quad E_0(\alpha) := \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45 \text{ deg} \quad \theta := 90 \text{ deg} \quad w(\alpha) := k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

$$u := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E_\theta(\alpha) := i \cdot E_0(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u) + \cos(v)) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$E_\phi(\alpha) := E_0(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u) \cdot \cos(\phi) + \sin(v) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$\text{Axial4}(\alpha) := \frac{|E_\theta(\alpha)|}{|E_\phi(\alpha)|}$$

$$f := 1.575 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad \lambda := \frac{c}{f}$$

$$\xi := 0.5 \quad \alpha := 9 \text{ deg}, 10 \text{ deg} \dots 20 \text{ deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a := 0.10 \cdot \lambda \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\alpha) := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\alpha) := l(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \quad E_0(\alpha) := \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

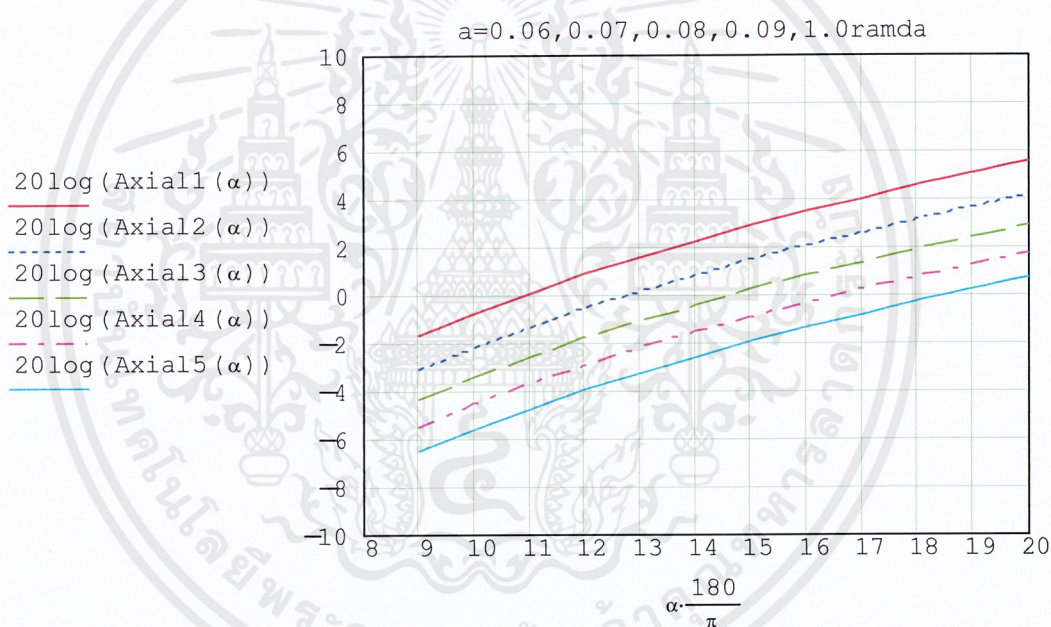
$$\phi := 45\text{deg} \quad \theta := 90\text{deg} \quad w(\alpha) := k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

$$u := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\alpha) := i \cdot E_0(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u) + \cos(v)) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$E\phi(\alpha) := E_0(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u) \cdot \cos(\phi) + \sin(v) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$\text{Axial5}(\alpha) := \frac{|E\theta(\alpha)|}{|E\phi(\alpha)|}$$



รูปที่ 6.4 อัตราส่วนแกนแนวตั้งต่อแนวนอนที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียงของเกลียวเมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมีของขดเกลียว

$$f := 1.575 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad \lambda := \frac{c}{f}$$

$$\xi := 0.5 \quad \alpha := 9\text{deg}, 10\text{deg} \dots 20\text{deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a := 0.06 \cdot \lambda \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\alpha) := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\alpha) := l(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \quad E_0(\alpha) := \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45\text{deg} \quad \theta := 90\text{deg} \quad w(\alpha) := k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

$$u := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\alpha) := i \cdot E_0(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u) + \cos(v)) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$E\phi(\alpha) := E_0(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u) \cdot \cos(\phi) + \sin(v) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$\text{Axial1}(\alpha) := \frac{|E\phi(\alpha)|}{|E\theta(\alpha)|}$$

$$f := 1.575 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \text{ m} \quad \lambda := \frac{c}{f}$$

$$\xi := 0.5 \quad \alpha := 9\text{deg}, 10\text{deg} \dots 20\text{deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a := 0.07 \cdot \lambda \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\alpha) := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\alpha) := l(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \quad E_0(\alpha) := \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi := 45\text{deg} \quad \theta := 90\text{deg} \quad w(\alpha) := k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

$$u := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\alpha) := i \cdot Eo(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u) + \cos(v)) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$E\phi(\alpha) := Eo(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u) \cdot \cos(\phi) + \sin(v) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$\text{Axial2}(\alpha) := \frac{|E\phi(\alpha)|}{|E\theta(\alpha)|}$$

$$f := 1.575 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad \lambda := \frac{c}{f}$$

$$\xi := 0.5 \quad \alpha := 9\text{deg}, 10\text{deg} \dots 20\text{deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a := 0.08 \cdot \lambda \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\alpha) := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(\alpha) := l(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \quad Eo(\alpha) := \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\phi := 45\text{deg} \quad \theta := 90\text{deg} \quad w(\alpha) := k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

$$u := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\alpha) := i \cdot Eo(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u) + \cos(v)) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$E\phi(\alpha) := Eo(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u) \cdot \cos(\phi) + \sin(v) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$\text{Axial3}(\alpha) := \frac{|E\phi(\alpha)|}{|E\theta(\alpha)|}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f := 1.575 \cdot 10^9$$

$$c := 3 \cdot 10^8$$

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

$$\xi := 0.5$$

$$\alpha := 9\text{deg}, 10\text{deg} \dots 20\text{deg}$$

$$k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a := 0.09 \cdot \lambda$$

$$I_m := 1$$

$$\eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\alpha) := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)}$$

$$h(\alpha) := l(\alpha) \cdot \sin(\alpha)$$

$$E_o(\alpha) := \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot I_m}{\lambda}$$

$$\phi := 45\text{deg}$$

$$\theta := 90\text{deg}$$

$$w(\alpha) := k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

$$u := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)$$

$$v := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\alpha) := i \cdot E_o(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u) + \cos(v)) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$E\phi(\alpha) := E_o(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u) \cdot \cos(\phi) + \sin(v) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$\text{Axial4}(\alpha) := \frac{|E\phi(\alpha)|}{|E\theta(\alpha)|}$$

$$f := 1.575 \cdot 10^9$$

$$c := 3 \cdot 10^8$$

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

$$\xi := 0.5$$

$$\alpha := 9\text{deg}, 10\text{deg} \dots 20\text{deg}$$

$$k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a := 0.10 \cdot \lambda$$

$$I_m := 1$$

$$\eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(\alpha) := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)}$$

$$h(\alpha) := l(\alpha) \cdot \sin(\alpha)$$

$$E_o(\alpha) := \frac{2 \cdot h(\alpha)^2 \cdot I_m}{\lambda}$$

$$\phi := 45\text{deg}$$

$$\theta := 90\text{deg}$$

$$w(\alpha) := k \cdot h(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

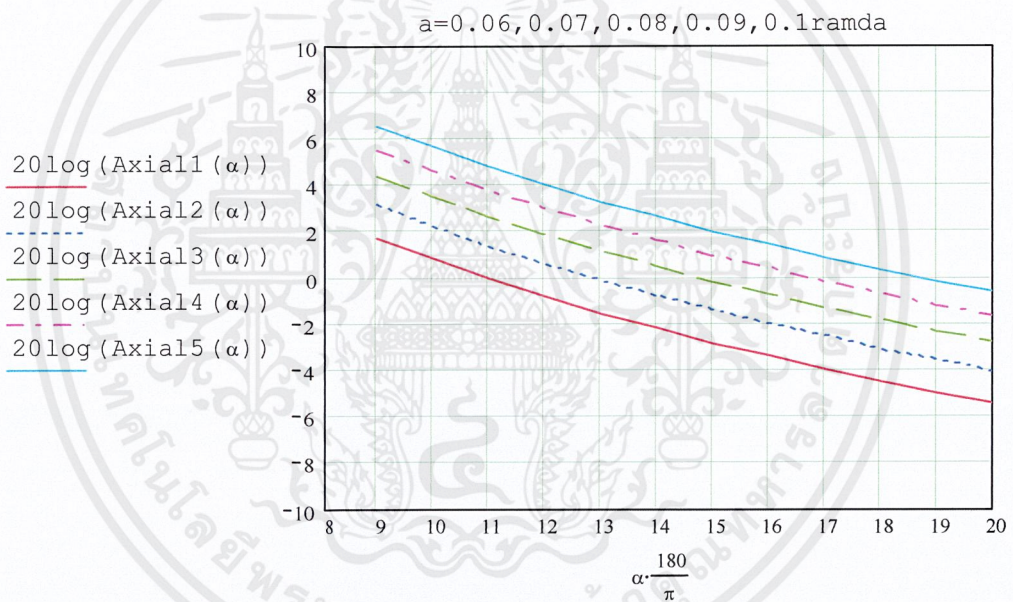
$$u := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)$$

$$v := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\alpha) := i \cdot E_0(\alpha) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u) + \cos(v)) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$E\phi(\alpha) := E_0(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u) \cdot \cos(\phi) + \sin(v) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\alpha))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\alpha)^2}$$

$$\text{Axial5}(\alpha) := \frac{|E\phi(\alpha)|}{|E\theta(\alpha)|}$$



รูปที่ 6.5 อัตราส่วนแกนแนวนอนต่อแนวตั้งที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมเอียงของเกลียวเมื่อเปลี่ยนขนาดรัศมีของขดเกลียว

โปรแกรมหาค่าอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

$$f := 1.409 \cdot 10^9, 1.433 \cdot 10^9 .. 1.740 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad \lambda(f) := \frac{c}{f}$$

$$\xi := 0.5 \quad \alpha := 14 \text{deg} \quad k(f) := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda(f)}$$

$$a(f) := \frac{0.19 \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l(f) := \frac{a(f) \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h(f) := l(f) \cdot \sin(\alpha) \quad E_0(f) := \frac{2 \cdot h(f)^2 \cdot \text{Im}}{\lambda(f)}$$

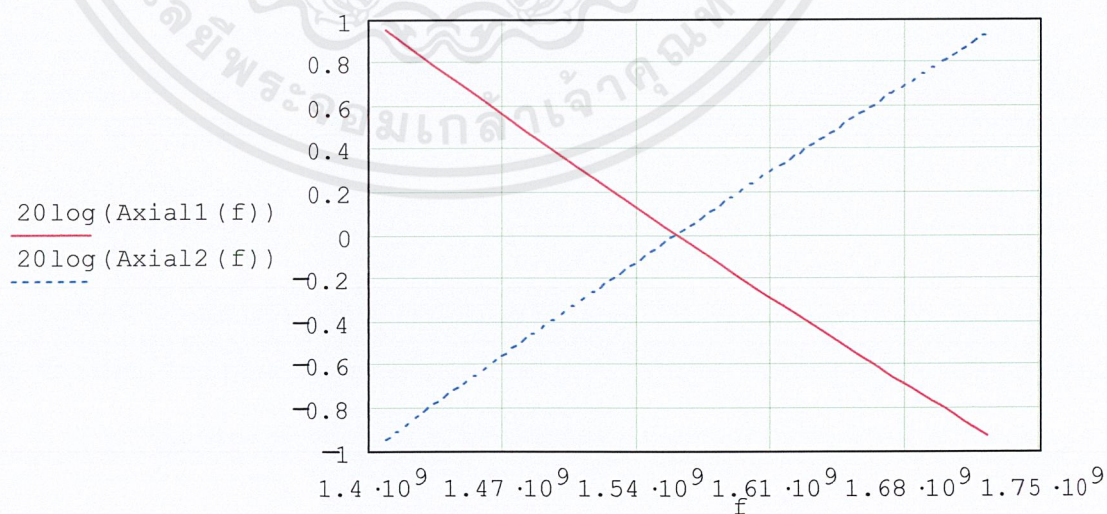
$$\phi := 45 \text{deg} \quad \theta := 90 \text{deg} \quad w(f) := k(f) \cdot h(f) \cdot \cos(\theta)$$

$$u(f) := k(f) \cdot a(f) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad v(f) := k(f) \cdot a(f) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E_\theta(f) := i \cdot E_0(f) \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(f)) + \cos(v(f))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(f))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(f)^2}$$

$$E_\phi(f) := E_0(f) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(f)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(f)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(f))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(f)^2}$$

$$\text{Axial1}(f) := \frac{|E_\theta(f)|}{|E_\phi(f)|} \quad \text{Axial2}(f) := \frac{|E_\phi(f)|}{|E_\theta(f)|}$$



รูปที่ 6.6 อัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมหาค่าการโพลาริซ์ร่วม และโพลาริซ์ใช้

$$f := 1.575 \cdot 10^9$$

$$c := 3 \cdot 10^8$$

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

$$\xi := 0.5$$

$$\alpha := 14 \text{deg}$$

$$k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi}$$

$$I_m := 1$$

$$\eta := 120 \cdot \pi$$

$$l := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)}$$

$$h := l \cdot \sin(\alpha)$$

$$E_0 := \frac{2 \cdot h^2 \cdot I_m}{\lambda}$$

$$\phi := 45 \text{deg}$$

$$\theta := 0 \text{deg}, 1 \text{deg} \dots 360 \text{deg}$$

$$w(\theta) := k \cdot h \cdot \cos(\theta)$$

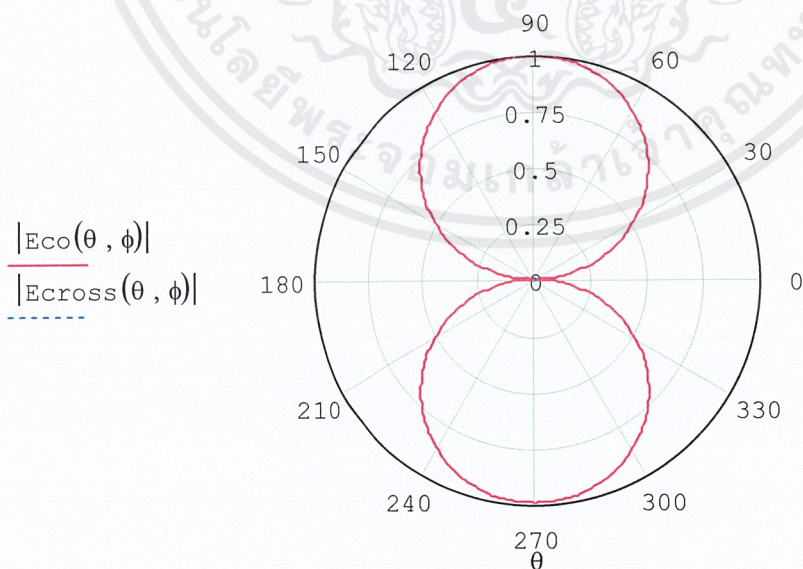
$$u(\theta) := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)$$

$$v(\theta) := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E_{\theta}(\theta, \phi) := i \cdot E_0 \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\theta)) + \cos(v(\theta))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E_{\phi}(\theta, \phi) := E_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\theta)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\theta)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E_{co}(\theta, \phi) := \frac{|E_{\theta}(\theta, \phi)| + |E_{\phi}(\theta, \phi)|}{\sqrt{2} \cdot 9.28 \cdot 10^{-6}} \quad E_{cross}(\theta, \phi) := \frac{|E_{\theta}(\theta, \phi)| - |E_{\phi}(\theta, \phi)|}{\sqrt{2} \cdot 9.28 \cdot 10^{-6}}$$



รูปที่ 6.7 โพลาริซ์ร่วมและโพลาริซ์ใช้ในระนาบมุมยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f := 1.575 \cdot 10^9$$

$$c := 3 \cdot 10^8$$

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

$$\xi := 0.5$$

$$\alpha := 14 \text{deg}$$

$$k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi}$$

$$\text{Im} := 1$$

$$\eta := 120 \cdot \pi$$

$$l := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)}$$

$$h := l \cdot \sin(\alpha)$$

$$E_0 := \frac{2 \cdot h^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$\theta := 90 \text{deg}$$

$$\phi := 0 \text{deg}, 1 \text{deg} \dots 360 \text{deg}$$

$$w(\theta) := k \cdot h \cdot \cos(\theta)$$

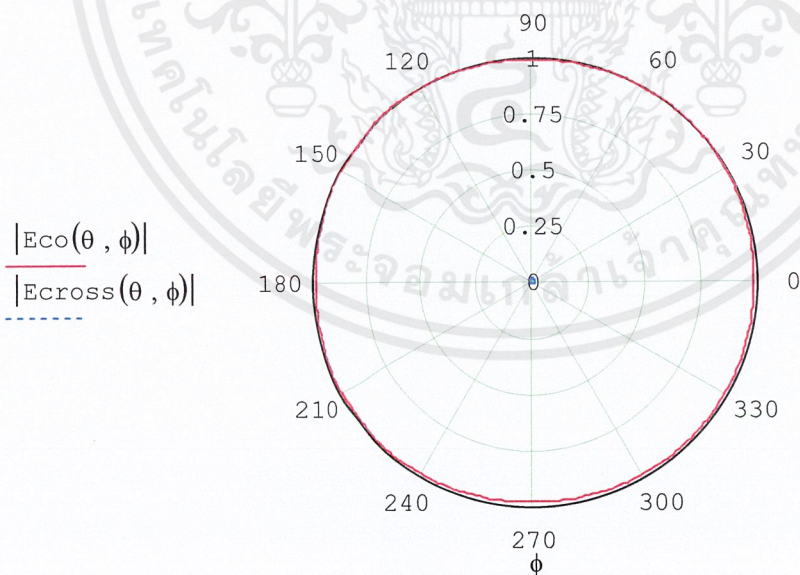
$$u(\phi) := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)$$

$$v(\phi) := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E_{\theta}(\theta, \phi) := i \cdot E_0 \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\phi)) + \cos(v(\phi))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E_{\phi}(\theta, \phi) := E_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\phi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\phi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E_{\text{co}}(\theta, \phi) := \frac{|E_{\theta}(\theta, \phi)| + |E_{\phi}(\theta, \phi)|}{\sqrt{2} \cdot 9.28 \cdot 10^{-6}} \quad E_{\text{cross}}(\theta, \phi) := \frac{|E_{\theta}(\theta, \phi)| - |E_{\phi}(\theta, \phi)|}{\sqrt{2} \cdot 2.98 \cdot 10^{-6}}$$



รูปที่ 6.8 โพลาริซร่วมและโพลาริซใช้ในระนาบมุมภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการคำนวณหาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

$$f := 1.575 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad \lambda := \frac{c}{f}$$

$$\xi := 0.5 \quad \alpha := 14 \text{ deg} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$a := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad \text{Im} := 1 \quad \eta := 120 \cdot \pi$$

$$l := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h := l \cdot \sin(\alpha) \quad E_0 := \frac{2 \cdot h^2 \cdot \text{Im}}{\lambda}$$

$$w(\theta) := k \cdot h \cdot \cos(\theta) \quad u(\theta, \phi) := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)$$

$$v(\theta, \phi) := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\theta(\theta, \phi) := i \cdot E_0 \cdot \sin(\alpha) (\cos(u(\theta, \phi)) + \cos(v(\theta, \phi))) \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E\phi(\theta, \phi) := E_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\theta, \phi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\theta, \phi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E_{co}(\theta, \phi) := \frac{|E\theta(\theta, \phi)| + |E\phi(\theta, \phi)|}{\sqrt{2}}$$

$$E_{cross}(\theta, \phi) := \frac{|E\theta(\theta, \phi)| - |E\phi(\theta, \phi)|}{\sqrt{2}}$$

$$U_{max} := (|E_{co}(90 \text{ deg}, 45 \text{ deg})|)^2$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2 \cdot \pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} [(|E_{co}(\theta, \phi)|)^2 + (|E_{cross}(\theta, \phi)|)^2] \cdot \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi$$

$$D_0 := 4 \cdot \pi \cdot \frac{U_{max}}{\text{Prad}} \quad D_0 = 2.975$$

$$10 \log(D_0) = 4.734$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก และระนาบมุมกวาดของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแถวลำดับวงกลมที่มีจำนวนองค์ประกอบ 4 องค์ประกอบ

Elevation vary θ

$$f := 1.575 \cdot 10^9 \quad \lambda := \frac{3 \cdot 10^8}{f} \quad k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad \eta := 120\pi$$

$$\alpha := 14 \text{ deg} \quad \xi := 0.5 \quad \phi := 90 \text{ deg} \quad \theta := -90 \text{ deg}, -89 \text{ deg} .. 90 \text{ deg}$$

$$a := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad l := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h := l \cdot \sin(\alpha) \quad v(\theta) := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$u(\theta) := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad w(\theta) := k \cdot h \cdot \cos(\theta) \quad \text{Im} := 1 \quad j := \sqrt{-1}$$

$$N := 4 \quad ra := 0.35\lambda \quad E_0 := \frac{2h^2 \cdot \text{Im}}{\lambda} \quad n := 1 .. N$$

$$\Phi(n) := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{n}{N}\right)$$

$$E\theta(\theta, \phi) := E_0 \cdot \sin(\alpha) \cdot (\cos(u(\theta)) + \cos(v(\theta))) \cdot \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E\phi(\theta, \phi) := E_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\theta)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\theta)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E_{co}(\theta, \phi) := \frac{(E\theta(\theta, \phi) + E\phi(\theta, \phi))}{\sqrt{2}} \quad E_{cross}(\theta, \phi) := \frac{(E\theta(\theta, \phi) - E\phi(\theta, \phi))}{\sqrt{2}}$$

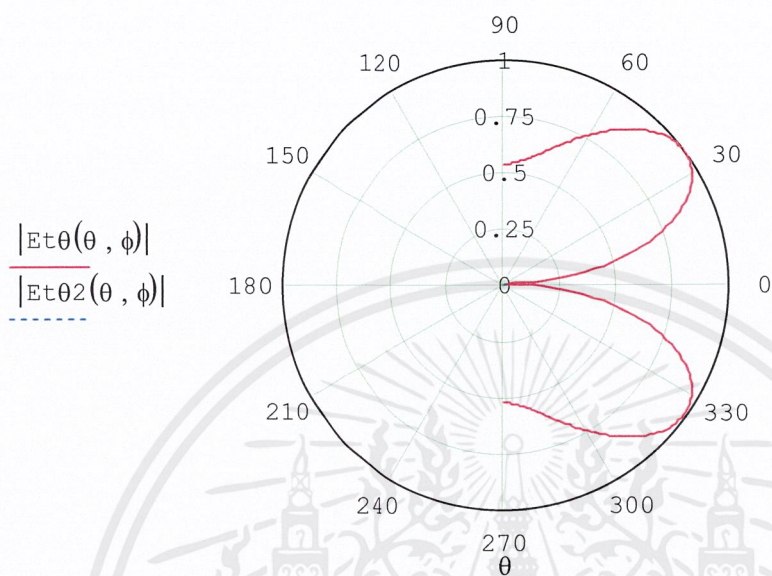
Circular Array factor

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Et\theta(\theta, \phi) := Eco(\theta, \phi) \cdot AF(\theta)$$

$$Et\theta2(\theta, \phi) := Ecross(\theta, \phi) \cdot AF(\theta)$$



รูปที่ 6.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบแนว
ลำดับวงกลม 4 องค์ประกอบ

Azimuth vary ϕ

$$f := 1.575 \cdot 10^9 \quad \lambda := \frac{3 \cdot 10^8}{f} \quad k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad \eta := 120\pi$$

$$\alpha := 14\text{deg} \quad \xi := 0.5 \quad \theta := 36\text{deg} \quad \phi := 0\text{deg}, 1\text{deg} \dots 360\text{deg}$$

$$a := \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} \quad l := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)} \quad h := l \cdot \sin(\alpha) \quad v(\phi) := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$u(\phi) := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad w(\theta) := k \cdot h \cdot \cos(\theta) \quad \text{Im} := 1 \quad j := \sqrt{-1}$$

$$N := 4 \quad ra := 0.35\lambda \quad E_0 := \frac{2h^2 \cdot \text{Im}}{\lambda} \quad n := 1 \dots N$$

$$\Phi(n) := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{n}{N}\right)$$

$$E_{\theta}(\theta, \phi) := E_0 \cdot \sin(\alpha) \cdot (\cos(u(\phi)) + \cos(v(\phi))) \cdot \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E_{\phi}(\theta, \phi) := E_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\phi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\phi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\theta))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta)^2}$$

$$E_{\text{co}}(\theta, \phi) := \frac{(E_{\theta}(\theta, \phi) + E_{\phi}(\theta, \phi))}{\sqrt{2}} \quad E_{\text{cross}}(\theta, \phi) := \frac{(E_{\theta}(\theta, \phi) - E_{\phi}(\theta, \phi))}{\sqrt{2}}$$

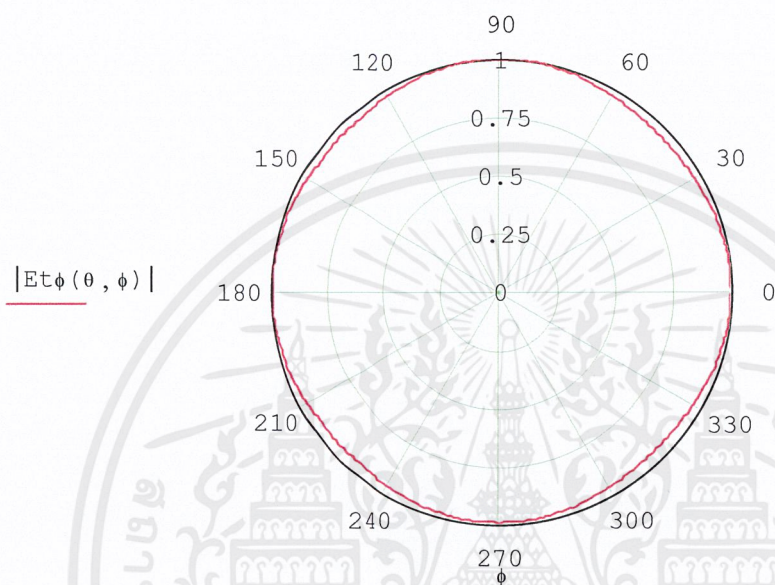
Circular Array factor

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Et\phi(\theta, \phi) := E_{co}(\theta, \phi) \cdot AF(\phi)$$

$$Et\phi_2(\theta, \phi) := E_{cross}(\theta, \phi) \cdot AF(\phi)$$



รูปที่ 6.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดของสายอากาศชนิดเกลียวที่วางแบบ
แถวลำดับวงกลม 4 องค์ประกอบ

โปรแกรมหาค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างในระนาบมุมกวาด
ระหว่างองค์ประกอบของแถวลำดับ

Azimuth ripple ($s\phi/\lambda$)

$$\begin{aligned}
 f &:= 1.575 \cdot 10^9 & c &:= 3 \cdot 10^8 & \lambda &:= \frac{c}{f} & k &:= 2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \\
 \xi &:= 0.5 & j &:= \sqrt{-1} & \alpha &:= 14 \text{deg} & \phi_1 &:= 0 \text{deg}, 1 \text{deg} \dots 360 \text{deg} \\
 \theta &:= 90 \text{deg} & \theta_1 &:= 90 \text{deg} & s &:= 0.1 \cdot \lambda & s_1 &:= 0.2 \lambda \\
 N &:= 4 & n &:= 1 \dots N & R &:= s \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} & R_1 &:= s_1 \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} \\
 a &:= \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} & l &:= \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)} & h &:= l \cdot \sin(\alpha) & w &:= k \cdot h \cdot \cos(\theta) \\
 w_1 &:= k \cdot h \cdot \cos(\theta_1) & \text{Im} &:= 1 & E_0 &:= \frac{h^2 \cdot \pi \cdot \text{Im}}{\lambda} & v(\phi_1) &:= k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1) \\
 v_1(\phi_1) &:= k \cdot a \cdot \sin(\theta_1) \cdot \sin(\phi_1) & u_1(\phi_1) &:= k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1) & u_1(\phi_1) &:= k \cdot a \cdot \sin(\theta_1) \cdot \cos(\phi_1) \\
 \Phi_n &:= 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{n}{N} \right)
 \end{aligned}$$

Circular array factor

$$\text{AF1}(\phi_1) := \sum_{n=1}^N e^{j \cdot (k \cdot R \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1 - \Phi_n))} \quad \text{AF2}(\phi_1) := \sum_{n=1}^N e^{j \cdot (k \cdot R_1 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \cos(\phi_1 - \Phi_n))}$$

1 Element

$$E_{\theta}(\phi_1) := E_0 \cdot \sin(\alpha) \cdot (\cos(u(\phi_1)) + \cos(v(\phi_1))) \cdot \frac{\cos(w)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w^2} \cdot \sin(\theta)$$

$$E_{\phi}(\phi_1) := E_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\phi_1)) \cdot \cos(\phi_1) + \sin(v(\phi_1)) \cdot \sin(\phi_1)) \cdot \frac{\cos(w)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\theta 1}(\phi_1) := E_0 \cdot \sin(\alpha) \cdot (\cos(u_1(\phi_1)) + \cos(v_1(\phi_1))) \cdot \frac{\cos(w_1)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w_1^2} \cdot \sin(\theta_1)$$

$$E_{\phi 1}(\phi_1) := E_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u_1(\phi_1)) \cdot \cos(\phi_1) + \sin(v_1(\phi_1)) \cdot \sin(\phi_1)) \cdot \frac{\cos(w_1)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w_1^2}$$

_____ Co - polar _____

$$E_{\text{co}}(\phi_1) := \frac{(E_{\theta 1}(\phi_1) + E_{\phi 1}(\phi_1))}{\sqrt{2}}$$

$$E_{\text{col}}(\phi_1) := \frac{(E_{\theta 1}(\phi_1) + E_{\phi 1}(\phi_1))}{\sqrt{2}}$$

_____ Cross - polar _____

$$E_{\text{cro}}(\phi_1) := \frac{(E_{\theta 1}(\phi_1) - E_{\phi 1}(\phi_1))}{\sqrt{2}}$$

$$E_{\text{cro1}}(\phi_1) := \frac{(E_{\theta 1}(\phi_1) - E_{\phi 1}(\phi_1))}{\sqrt{2}}$$

Azimuth ripple (dB)

$$20 \cdot \log \left(\left| \frac{|AF1(45\text{deg}) \cdot |E_{\text{co}}(45\text{deg})||}{|AF1(0\text{deg}) \cdot |E_{\text{co}}(0\text{deg})||} \right| \right) = 0.081$$

$$20 \cdot \log \left(\left| \frac{|AF2(45\text{deg}) \cdot |E_{\text{col}}(45\text{deg})||}{|AF2(0\text{deg}) \cdot |E_{\text{col}}(0\text{deg})||} \right| \right) = 0.041$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมหาค่าการกระเพื่อมในระนาบมุมกวาดที่เป็นฟังก์ชันของขนาดรัศมีของแถวลำดับ

Azimuth ripple (ra/λ)

$$\begin{aligned}
 f &:= 1.575 \cdot 10^9 & c &:= 3 \cdot 10^8 & \lambda &:= \frac{c}{f} & k &:= 2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \\
 \xi &:= 0.5 & j &:= \sqrt{-1} & \alpha &:= 14 \text{deg} & \phi_1 &:= 0 \text{deg}, 1 \text{deg} .. 360 \text{deg} \\
 \theta &:= 90 \text{deg} & \theta_1 &:= 90 \text{deg} & ra &:= 0.05 \cdot \lambda & ra_1 &:= 0.08 \cdot \lambda \\
 N &:= 4 & n &:= 1 .. N & \Phi_n &:= 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{n}{N}\right) & Im &:= 1 \\
 a &:= \frac{\lambda \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi} & l &:= \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)} & h &:= l \cdot \sin(\alpha) & w &:= k \cdot h \cdot \cos(\theta) \\
 E_o &:= \frac{h^2 \cdot \pi \cdot Im}{\lambda} & w_1 &:= k \cdot h \cdot \cos(\theta_1) & v(\phi_1) &:= k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1) \\
 v_1(\phi_1) &:= k \cdot a \cdot \sin(\theta_1) \cdot \sin(\phi_1) & u(\phi_1) &:= k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1) \\
 u_1(\phi_1) &:= k \cdot a \cdot \sin(\theta_1) \cdot \cos(\phi_1)
 \end{aligned}$$

Circular array factor

$$\begin{aligned}
 AF_1(\phi_1) &:= \sum_{n=1}^N e^{j \cdot (k \cdot ra \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1 - \Phi_n))} \\
 AF_2(\phi_1) &:= \sum_{n=1}^N e^{j \cdot (k \cdot ra_1 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \cos(\phi_1 - \Phi_n))}
 \end{aligned}$$

1 Element

$$E_{\theta}(\phi_1) := E_o \cdot \sin(\alpha) \cdot (\cos(u(\phi_1)) + \cos(v(\phi_1))) \cdot \frac{\cos(w)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w^2} \cdot \sin(\theta)$$

$$E_{\phi}(\phi_1) := E_o \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\phi_1)) \cdot \cos(\phi_1) + \sin(v(\phi_1)) \cdot \sin(\phi_1)) \cdot \frac{\cos(w)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\theta e1}(\phi_1) := E_0 \cdot \sin(\alpha) \cdot (\cos(u_1(\phi_1)) + \cos(v_1(\phi_1))) \cdot \frac{\cos(w_1)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w_1^2} \cdot \sin(\theta_1)$$

$$E_{\phi i1}(\phi_1) := E_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u_1(\phi_1)) \cdot \cos(\phi_1) + \sin(v_1(\phi_1)) \cdot \sin(\phi_1)) \cdot \frac{\cos(w_1)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w_1^2}$$

_____ Co - polar _____

$$E_{co}(\phi_1) := \frac{(E_{\theta e}(\phi_1) + E_{\phi i}(\phi_1))}{\sqrt{2}}$$

$$E_{co1}(\phi_1) := \frac{(E_{\theta e1}(\phi_1) + E_{\phi i1}(\phi_1))}{\sqrt{2}}$$

_____ Cross - polar _____

$$E_{cro}(\phi_1) := \frac{(E_{\theta e}(\phi_1) - E_{\phi i}(\phi_1))}{\sqrt{2}}$$

$$E_{cro1}(\phi_1) := \frac{(E_{\theta e1}(\phi_1) - E_{\phi i1}(\phi_1))}{\sqrt{2}}$$

Azimuth ripple (dB)

$$20 \cdot \log \left(\left| \frac{|AF1(45deg) \cdot |E_{co}(45deg)||}{|AF1(0deg) \cdot |E_{co}(0deg)||} \right| \right) = 0.083$$

$$20 \cdot \log \left(\left| \frac{|AF2(45deg) \cdot |E_{co1}(45deg)||}{|AF2(0deg) \cdot |E_{co1}(0deg)||} \right| \right) = 0.078$$

โปรแกรมหาค่าสภาพเฉพาะจกทิศทางมากที่สุด

find directivity (ff/fo)

$$f := 1.575 \cdot 10^9$$

$$\lambda := \frac{3 \cdot 10^8}{f}$$

$$k := \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\eta := 120\pi$$

$$\xi := 0.5$$

$$\alpha := 14 \text{ deg}$$

$$N := 4$$

$$n := 1 .. N$$

$$j := \sqrt{-1}$$

$$ra := 0.35 (0.19)$$

$$Im := 1$$

$$\Phi(n) := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{n}{N}\right)$$

$$a := \frac{(0.19) \cdot \cos(\alpha)}{8 \cdot \pi \cdot \xi}$$

$$l := \frac{a \cdot \xi}{\cos(\alpha)}$$

$$h := l \cdot \sin(\alpha)$$

$$v(\theta, \phi) := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$w(\theta, \phi) := k \cdot h \cdot \cos(\theta) \quad u(\theta, \phi) := k \cdot a \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad E_0 := \frac{2h^2 \cdot Im}{\lambda}$$

$$E\theta(\theta, \phi) := E_0 \cdot \sin(\alpha) \cdot (\cos(u(\theta, \phi)) + \cos(v(\theta, \phi))) \cdot \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(w(\theta, \phi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta, \phi)^2}$$

$$E\phi(\theta, \phi) := E_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(u(\theta, \phi)) \cdot \cos(\phi) + \sin(v(\theta, \phi)) \cdot \sin(\phi)) \cdot \frac{\cos(w(\theta, \phi))}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - w(\theta, \phi)^2}$$

Circular Array Factor

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

$$E_{co}(\theta, \phi) := \frac{(E\theta(\theta, \phi) + E\phi(\theta, \phi))}{\sqrt{2}}$$

$$E_{cross}(\theta, \phi) := \frac{(E\theta(\theta, \phi) - E\phi(\theta, \phi))}{\sqrt{2}}$$

$$Prad := \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[(|E_{co}(\theta, \phi)| \cdot |AF(\theta, \phi)|)^2 + (|E_{cross}(\theta, \phi)| \cdot |AF(\theta, \phi)|)^2 \right] \cdot \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{\max} := (|E_{\text{co}}(36\text{deg}, 90\text{deg})| \cdot |AF(36\text{deg}, 90\text{deg})|)^2$$

Directivity (Eco)

$$D_o := 4 \cdot \pi \cdot \frac{U_{\max}}{\text{Prad}}$$

$$D_o = 4.39$$

$$\text{Direct} := 10 \log(D_o)$$

$$\text{Direct} = 6.424$$

Directivity (Ecross)

$$U_{\max} := (|E_{\text{cross}}(36\text{deg}, 90\text{deg})|)^2$$

$$D_o := 4 \cdot \pi \cdot \frac{U_{\max}}{\text{Prad}}$$

$$D_o = 9.038 \times 10^{-5}$$

$$\text{Direct} := 10 \log(D_o)$$

$$\text{Direct} = -40.439$$

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ ฉบับนี้จะสำเร็จไม่ได้ถ้าไม่ได้รับการปรึกษาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จาก ผศ.ดร. สมผล โกศลวิตร์ ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพานิชย์ และขอขอบคุณ พี่สุธาสิณี ละมุลตรี สำหรับคำแนะนำเกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ขอขอบคุณ พี่ไพโรจน์ วุ่นจุม ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบสายอากาศ และขอขอบคุณพี่ปริญญาโท ปริญญาเอก ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ ที่คอยให้คำแนะนำ และให้ยืมอุปกรณ์ในการวัดทดสอบ

ขอขอบคุณ เพื่อนๆและน้องๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา และสุดท้ายขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้การอบรมสั่งสอนจนมีวันนี้ ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] โมไนย ไกรฤกษ์ และ วิวัฒน์ กิรานนท์ “ทฤษฎีสายอากาศ,” สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536.
- [2] C. Phongcharoenpanich, T. Lertwiriaprapa, S. Lamultree, P. Wouchoum, S. Kosulvit and M. Krairiksh, “Characteristics of a Helical Array Antenna Radiating Circularly Polarized Conical Beam,” *IEEE Antennas & Propagation Society International Symposium*, Vol. 4, pp. 557-560, July 2001.
- [3] วิวัฒน์ วิมลเศรษฐ “สายอากาศเกลียวเป็นแผงหลายเบย์สำหรับวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟ เอ็ม,” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2526.
- [4] บัณฑิต โรจน์อารยานนท์ “วิศวกรรมไมโครเวฟ,” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2536.
- [5] C.A. Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design,” 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 1998.

