

สายอากาศสำหรับใช้งานเรดาร์

RADAR ANTENNA



โดย

นายยุทธนา เอี่ยมวิลาวัลย์

นายวงศ์เทพ ศิลปเวทิน

นางสาววรรณภา ทองรัตน์นะ

เลขหมู่..... 61948
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี..... 25 ก.ค. 2549

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

b. 11587265
i.

HN

ภาควิชา
วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

สายอากาศสำหรับใช้งานเรดาร์

RADAR ANTENNA



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศสำหรับใช้งานเรดาร์


RADAR ANTENNA

ผู้จัดทำ

นายยุทธนา เขียมวิลาวณิชย์ 44010389

นายวงศ์เทพ ศิลปวาทิน 44010405

นางสาววรรณภา ทองรัตน์ 44010414


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. ณรงค์ เหมกรณ์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. นิภา ลีสารุจิ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศสำหรับใช้งานเรดาร์

RADAR ANTENNA

โดย นายชุตริยา เอี่ยมวิลาวัณย์ 44010389
นายวงศ์เทพ ศิลปเวทิน 44010405
นางสาววรรณภา ทองรัตน์นะ 44010414

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ณรงค์ เหมกรณ์
รศ. นิภา ลีลารุจิ

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศ โดยนำไปใช้งานกับอุปกรณ์เรดาร์ ที่ใช้สำหรับรับและส่งคลื่นความถี่ซึ่งอยู่ในช่วง x - band และจะทำงานกับความถี่ 9.6 GHz โดยจะให้คุณสมบัติ มีลำคลื่นในแนวตั้ง และ มีลำคลื่นในแนวนอนที่แคบมาก ในโครงการนี้จะรวมไปถึงการสร้างสายอากาศ และ ทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการปรับปรุงต่อไป

ABSTRACT

This project concern with design an antenna. This antenna uses with radar transceiver in x - band. This antenna was designed to with 9.6 GHz frequency. The characteristic of this antenna is sharp beam in both vertical and horizontal directions. This project include construction of antenna , parameter and operation test for further improvement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ขั้นตอนในการทำปริญญานิพนธ์	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 เรดาร์	3
2.1.1 ทฤษฎีการทำงานของ พัลส์เรดาร์	3
2.1.2 ความต้องการของคลื่นวิทยุสำหรับงานเรดาร์	5
2.1.3 ความต้องการในการทำงานของเรดาร์	5
2.1.4 ความสามารถในการจำแนกเรดาร์	5
2.1.4.1 ระยะต่ำสุดที่สามารถจำแนกเป้าหมายออกได้	5
2.1.4.2 มุมต่ำที่สุดที่สามารถจำแนกออกได้	7
2.1.5 ระยะทางต่ำสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้	8
2.1.6 ระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้	9
2.1.7 คลัตเตอร์ (Clutter)	10
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับวิศวกรรมสายอากาศ	13
2.2.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น	13
2.2.2 ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซโทโรปิก	14
2.2.3 สายอากาศชี้ทิศทางและสายอากาศแบบออมนิไดเรกชันแนล	14
2.2.4 ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น	15
2.2.5 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	16
2.2.6 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่เป็นศูนย์ครั้งแรก	16
2.2.7 อัตราส่วนของลำคลื่นด้านข้างหรือระดับของลำคลื่นด้านข้าง	16
2.2.8 อัตราส่วนของลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง	16
2.2.9 เรเดียนและสเตอเรเดียน	16
2.2.10 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	17
2.2.11 อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	18
2.2.12 อัตราขยาย	18
2.2.13 บริเวณต่างๆของสนามจากสายอากาศ	19
2.2.14 โพลาริเซชันของคลื่น	19
2.2.15 การสะท้อน การหักเห และการเบี่ยงเบนของคลื่น	22
2.3 ทฤษฎีสายอากาศปากแตร	23
2.3.1 สนามอะเพอร์เจอร์	23

	หน้า
2.4 ท่อนำคลื่น (Waveguide)	30
2.4.1 ทฤษฎีท่อนำคลื่น	30
2.4.2 การแพร่กระจายของคลื่นในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า	30
2.4.3 การเรียกชื่อโหมดต่างๆของท่อนำคลื่น	31
2.4.3.1 TE โหมดสำหรับ ทรานเวิส อิเล็กติก โหมด	31
2.4.3.2 TM โหมดสำหรับ ทรานเวิส แมกเนติก โหมด	31
2.4.4 ความถี่คัตออฟ	31
2.4.5 ความถี่และความยาวคลื่นคัตออฟ ในท่อนำคลื่น	31
2.4.6 ความยาวคลื่นกลุ่มภายในท่อนำคลื่น	32
2.4.7 ความต้านทานของท่อนำคลื่น (Waveguide Impedance)	33
2.5 ทฤษฎีสายอากาศพาราโบลิก	34
2.5.1 สายอากาศแบบออฟเซตพาราโบลิก	34
2.5.2 รูปทรงเรขาคณิตของสายอากาศแบบออฟเซตพาราโบลิก	34
2.5.3 อัตราการขยายของจานรับสัญญาณ	35
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	36
3.1 ขั้นตอนการทำงาน	36
3.2 การออกแบบสายอากาศ	36
3.2.1 การออกแบบสายอากาศปากแตร	36
3.2.2 การสร้างสายอากาศปากแตร	41
3.3 การออกแบบสายอากาศพาราโบลิก	41
3.3.1 การเลือกค่าอัตราส่วน f/D ที่เหมาะสม	41
3.3.2 การกำหนดช่วงความถี่ใช้งาน	42
3.3.3 การคำนวณหาค่าอัตราขยาย	42
3.3.4 การออกแบบสายอากาศ พาราโบลิกแบบศูนย์รวมโฟกัส	43
3.3.5 กระบวนการสร้าง	44
3.3.5.1 การสร้างโมล	44
3.3.5.2 การสร้างสายจานอากาศ	45
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	46
4.1 การทดลองคุณสมบัติของสายอากาศปากแตร	46
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	47
4.1.2 ผลการทดลอง	49
4.1.3 ค่าการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร	49
4.1.4 คุณสมบัติของสายอากาศเรดาร์	53

4.1.5 ค่าการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเรดาร์	หน้า
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	54
หนังสืออ้างอิง	55
	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	ขั้นตอนการทำปริภูมิพนธ์	1
รูปที่ 2.1	ส่วนประกอบของ พัลส์เรดาร์	3
รูปที่ 2.2	ความหมายของ เรงกรีโซลูชั่น	6
รูปที่ 2.3	เรงกรีโซลูชั่น และ ความกว้างของพัลส์	6
รูปที่ 2.4	การอธิบายความหมายของ อิมพัทรีโซลูชั่น	8
รูปที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าต่ำสุดของการค้นหา กับ ความกว้างในแนวตั้งและมุมอับ	8
รูปที่ 2.6	หลักการหาสมการของเรดาร์	10
รูปที่ 2.7	พื้นที่ของกราวนด์สโงสว่างโดยลำของเรดาร์ที่ตกกระทบตรงรอยต่อ	11
รูปที่ 2.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางสูงสุดกับกำลังส่ง	13
รูปที่ 2.9	ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	14
รูปที่ 2.10	ค่าคลื่นต่างๆและความกว้างของรูปแบบสายอากาศ	15
รูปที่ 2.11	ตัวอย่างรูปแบบของสายอากาศ	16
รูปที่ 2.12	คำจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน	17
รูปที่ 2.13	การแบ่งบริเวณของสนามแม่เหล็กจากสายอากาศ	19
รูปที่ 2.14	โพลาริเซชันของคลื่น	20
รูปที่ 2.15	โพลาริเซชันแบบวงรี	21
รูปที่ 2.16	สนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็กภายในเวฟไกด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า	30
รูปที่ 2.17	ขนาดด้านกว้าง (a) และด้านสูง (b)	31
รูปที่ 2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกลุ่มและความยาวคลื่นกระแทบ	32
รูปที่ 2.19	ความสัมพันธ์ของ λ กับ λ_g	33
รูปที่ 2.20	สายอากาศแบบออฟเซตพาราโบลิก	34
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการทำงาน	36
รูปที่ 3.2	อัตราขยายความถี่	40
รูปที่ 3.3	รูปแบบของปากแตรที่นำมาใช้แทนค่าจากที่คำนวณได้	40
รูปที่ 3.4	สายอากาศปากแตรที่สร้างมาจากอลูมิเนียมและแบบทองแดงตามลำดับ	41
รูปที่ 3.5	ระยะโฟกัสสำหรับค่า f/D ต่างๆ	41
รูปที่ 3.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเกินกับความถี่ที่ใช้งาน	42
รูปที่ 3.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง x และ y	43
รูปที่ 3.8	การทำออฟเซตโฟกัสมาจากเซ็นเตอร์โฟกัส	44
รูปที่ 4.1	ภาพอุปกรณ์ในการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศปากแตร	46
รูปที่ 4.2	สายอากาศปากแตรต้นแบบ	47
รูปที่ 4.3	ภาพสายอากาศปากแตรที่ทำมาจากทองแดง	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 4.4 ภาพสายอากาศปากแตรที่ทำมาจากอลูมิเนียม	48
รูปที่ 4.5 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศปากแตรต้นแบบในแนวนอน	49
รูปที่ 4.6 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศปากแตรต้นแบบในแนวตั้ง	49
รูปที่ 4.7 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศปากแตรทองแดงในแนวนอน	50
รูปที่ 4.8 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศปากแตรทองแดงในแนวตั้ง	50
รูปที่ 4.9 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศปากแตรอลูมิเนียมในแนวนอน	51
รูปที่ 4.10 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศปากแตรอลูมิเนียมในแนวตั้ง	51
รูปที่ 4.11 ภาพการประกอบเป็นสายอากาศเรดาร์	52
รูปที่ 4.12 สายอากาศปากแตรที่จะนำมาประกอบกับจานพาราโบลิก	53
รูปที่ 4.13 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศเรดาร์อลูมิเนียมในแนวตั้ง	54
รูปที่ 4.14 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศเรดาร์อลูมิเนียมในแนวนอน	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความถี่ของเรดาร์	4
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวพื้นที่ กับ ความกว้างของลำบีม	7
ตารางที่ 2.3 ช่วงสูงที่สุดที่สามารถค้นหาได้ ที่ความยาวค่าต่างๆของ พื้นที่สายอากาศ	12
ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางสูงสุด กับ กำลังส่ง	13
ตารางที่ 2.5 สรุปรูปส่วนประกอบต่างๆของการทำงานของเรดาร์	13
ตารางที่ 4.1 ค่า วีเอสดีบีวีอาร์(VSWR) ของสายอากาศปากแตรชนิดต่าง ๆ	48
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของสายอากาศเรดาร์(Radar Antenna)	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

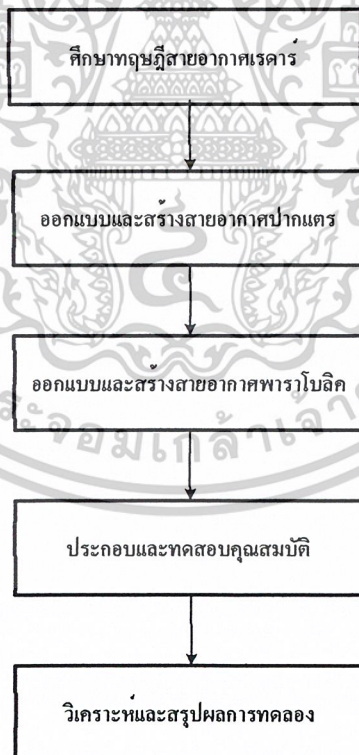
บทนำ

ประเทศไทยได้นำอุปกรณ์เรดาร์มาใช้กับเรือประมงกันอย่างกว้างขวาง ทำให้เกิดความจำเป็นที่จะต้องเรียนรู้หลักการทำงาน และการใช้งานที่ถูกต้อง สายอากาศมารีนเรดาร์ (Marine Radar Antenna) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันมากเพื่อช่วยในการค้นหาเรือ สิ่งกีดขวาง เกาะ แผ่นดิน และอื่น ๆ สามารถใช้งานได้ ในขณะที่เป็นเวลากลางวันหรือในขณะที่ฝนตกหนักหรือในขณะที่หมอกลงจัดทำให้มีความปลอดภัยจากความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการชนกันได้

สายอากาศเรดาร์ที่ออกแบบและสร้างจะทำงานในช่วง X-Band ซึ่งมีความถี่ที่ 9.6 GHz ซึ่งสายอากาศนี้จะให้การแพร่กระจายคลื่น ได้ทั้งในแนวนอน (Horizontal Pattern) และการแพร่กระจายคลื่นในแนวตั้ง (Vertical Pattern)

ปฏิยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสนอการออกแบบและการสร้างสายอากาศเรดาร์โดยสร้างจากสายอากาศ 2 ชนิดประกอบกัน โดยมีสายอากาศปากแตรเป็นตัวที่ได้อัตโนมัติและรับสัญญาณ ใช้งานสายอากาศ ทำหน้าที่ลดขนาดของลำคลื่นให้มีขนาดแคบมาก จากนั้นทำการทดสอบและวัดคุณสมบัติรวมทั้งสรุปผล

1.1 ขั้นตอนในการทำปฏิยานิพนธ์



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการทำปฏิยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการซึ่งได้ศึกษาพื้นฐานของเรดาร์พื้นฐาน สายอากาศ, สายอากาศปากแตร (Horn Antenna), ท่อนำคลื่น (Waveguide), สายอากาศพาราโบลา (Parabolic Antenna)

ในส่วนของบทที่ 3 จะกล่าวถึงการออกแบบและการสร้างสายอากาศทั้งแบบสายอากาศปากแตร ที่สร้างมาจากทองแดง และแบบอลูมิเนียม เพื่อเปรียบเทียบกันเพื่อใช้ในชุดสายอากาศเรดาร์ รวมทั้งได้กล่าวถึงการออกแบบและการสร้างของจานพาราโบลา

ในส่วนของบทที่ 4 จะกล่าวถึงการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศปากแตรที่สร้างมาจากทองแดงและสร้างมาจากอลูมิเนียมเพื่อเปรียบเทียบสายอากาศปากแตรที่สร้างมาจากต้นแบบและเลือกสายอากาศปากแตรมาเพื่อมาประกอบกับสายอากาศพาราโบลาเป็นชุดของสายอากาศเรดาร์แล้วตรวจสอบคุณสมบัติ วัดคุณสมบัติของสายอากาศเรดาร์

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 Radar

เรดาร์ (Radar) ย่อมาจากคำว่า Radio Detection and Ranging เป็นอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้งานในทางการทหารในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 หลังจากสงครามสงบ ได้มีการนำเอาเรดาร์มาใช้งานในการนำร่องเรือและเครื่องบิน

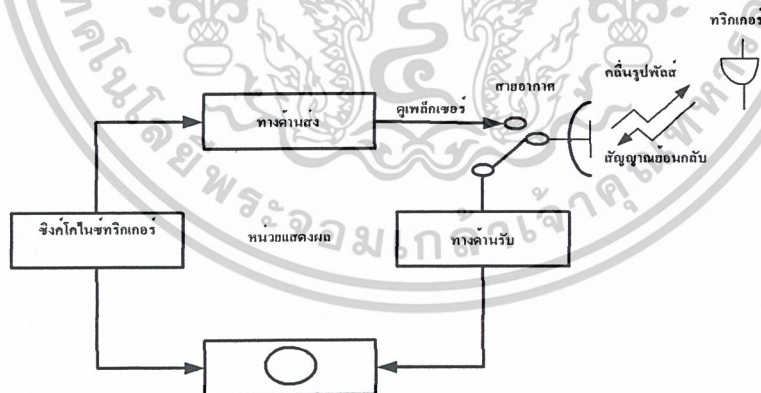
เรดาร์แบ่งออกเป็นออกตามระบบได้เป็น เรดาร์ปฐมภูมิ (Primary Radar) และเรดาร์อันดับที่ 2 (Secondary Radar)

เรดาร์ปฐมภูมิ เป็นระบบที่ทำการวัดตำแหน่งของเป้าหมายหรือสิ่งกีดขวาง โดยการส่งคลื่นวิทยุออกไปแล้วรับคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากเป้าหมาย

เรดาร์อันดับที่ 2 เป็นระบบส่งคลื่นวิทยุออกไปยังเป้าหมาย จากนั้นเป้าหมายจะทำการขยายสัญญาณวิทยุและส่งกลับมาด้วยความถี่เดียวกัน หรือความถี่ที่ต่างกันอย่างไรอย่างหนึ่งและสัญญาณที่รับได้นี้จะทำให้สามารถตรวจหาตำแหน่งเป้าหมายได้

2.1.1 ทฤษฎีการทำงานของพัลส์เรดาร์

เครื่องส่งเรดาร์จะปล่อยคลื่นวิทยุเป็นพัลส์สั้น ๆ ออกไปตามสัญญาณทริกเกอร์ที่มากกระตุ้นให้เครื่องส่งทำงาน เมื่อพัลส์ที่ส่งออกไปกระทบกับวัตถุจะกระจายออกทุกทิศทาง และจะมีส่วนหนึ่งของพัลส์นี้สะท้อนกลับมายังสายอากาศที่ส่งออกไปในตอนแรก คลื่นนี้เรียกว่าสัญญาณสะท้อน (Echo Signal) หรือสัญญาณย้อนกลับ (Return Signal) ซึ่งจะถูกส่งไปให้ ทางค้ำรับ (Receiver) โดยผ่าน คูเพิลเลอร์ สัญญาณนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับซิงค์โลไนซ์ทริกเกอร์เพื่อพิจารณาระยะทางที่ถูกต้อง จากวัตถุที่มาถึงตัวเรดาร์ส่วนประกอบของ พัลส์เรดาร์ แสดงดังที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของ พัลส์เรดาร์

ถ้าเวลาที่ได้รับสัญญาณสะท้อน หลังจากส่งพัลส์ออกไปแล้วเป็น t และความเร็วของคลื่นวิทยุที่เดินทางเป็น c มีค่าเป็น 3×10^8 เมตร/วินาที หรือ 1.62×10^5 N.M/sec ดังนั้นระยะทาง R ของวัตถุจะมีค่าดังสมการ (2-1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = C \cdot \frac{t}{2} \quad (2-1)$$

พัลส์เรดาร์ จะส่งพัลส์ออกไปซ้ำ ๆ และความถี่ของการส่งพัลส์ออกไปนั้น จะต้องพิจารณาว่าพัลส์ลูกต่อไปนั้น จะต้องไม่ส่งออกไปก่อนที่จะได้รับสัญญาณสะท้อนจากเป้าหมาย หรือวัตถุที่อยู่ใกล้ที่สุด ดังนั้นความถี่ของการส่งพัลส์จะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ใกล้ที่สุดของเป้าหมายที่ต้องการตรวจดู ถ้าความถี่ในการส่งพัลส์มีค่ามากกว่าที่ต้องการสัญญาณสะท้อนจากเป้าหมายที่อยู่ใกล้ที่สุดจะทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนอันดับที่ 2 บนหน้าจอเรดาร์ในลักษณะที่เป้าหมายที่อยู่ใกล้ที่สุดนั้นอยู่ใกล้กับ สัญญาณสะท้อนกลับของเรดาร์ (Radar Echo Signal) แบบนี้อาจทำให้เกิดการเข้าใจผิดว่าเป็นเป้าหมายที่แท้จริง

ขีดจำกัดของระยะทางสูงสุด (R_{max}) ที่ไม่ทำให้เกิด สัญญาณสะท้อนอันดับที่ 2 หรือไม่ทำให้เกิดสะท้อน อยู่ใกล้เรดาร์ มีความสัมพันธ์กับความถี่ขาส่ง พัลส์ (fr) และช่วงเวลาการส่ง พัลส์ (t) ดังสมการ

$$R_{max} = \frac{C \cdot t}{2} = \frac{C}{2 \cdot fr} \quad (2-2)$$

มุมในแนวนอนของเป้าหมายสามารถพิจารณาได้จากทิศทางของสัญญาณสะท้อนที่มาจากเป้าหมายนั้น ในการที่จะพิจารณาหาทิศทางนั้น ปรกติจะใช้ลำคลื่นที่แคบๆที่ปล่อยออกมาจากสายอากาศสัญญาณสะท้อน ที่ได้รับจะมีค่ามากที่สุด ในทิศทางที่ตรงกับมุมในแนวนอนของเป้าหมายนั้น

ความถี่ปรกติที่ใช้ในเรดาร์โดยทั่วไปแล้วมีค่าตั้งแต่ 300MHz ไปจนถึง 40GHz ซึ่งเรียกว่าความถี่ย่าน ไมโครเวฟ (Microwave Frequency) แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความถี่ของเรดาร์

ย่านความถี่ BAND	ความยาวคลื่น (ซม) WAVELENGTH(cm)	ช่วงความถี่ (FREQUENCY RANGE (MHz)	ใช้กับงานต่าง ๆ
P	300		AIR SEARCH RADAR
L	22.2~3.13	996~1,350	AIR ROUTE SURVEILLANCE RADAR
S	11.1~9.1	2,700~3,300	MARINE RADAR METEROLOGICAL RADAR AIRPORT SURVEILLANCE RADAR
C	5.7~3.06	5,255~9,800	MARINE RADAR METEROLOGICAL RADAR
X	3.33~3.06	9,000~9,800	MARINE RADAR
K	1.3~1.19	23,000~25,000	AIRPORT SURVEILLANCE RADAR
Ka	0.9 ~0.83	31,800~36,000	HARBOR RADAR
MILLIMETER		>400	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ความต้องการของคลื่นวิทยุสำหรับงานเรดาร์

- เดินทางเป็นเส้นตรง หรือเดินทางเป็นคลื่นตรง (Direct Wave)
- ทำให้สายอากาศที่มี อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Directivity) คมและแคบนั้นมีขนาดเล็กลงได้
- มีความเร็วในการเดินทางของคลื่นคงที่
- สามารถสะท้อนกลับจากเป้าหมายได้
- มืองค์ประกอบของการบั่นทอนกำลังของการเดินทางในอากาศน้อย คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงกว่า 1000 MHz จะไม่มีคุณสมบัติในข้อนี้ แต่จะให้คุณสมบัติในการเดินทางเป็นเส้นตรงและ สายอากาศที่ใช้มีขนาดเล็ก

2.1.3 ความต้องการในการทำงานของเรดาร์

- ต้องสามารถค้นหาเป้าหมายในระยะไกลได้
- ต้องสามารถบอกเป้าหมายขนาดเล็กที่อยู่ใกล้ๆกัน ได้

2.1.4 ความสามารถในการจำแนกเรดาร์

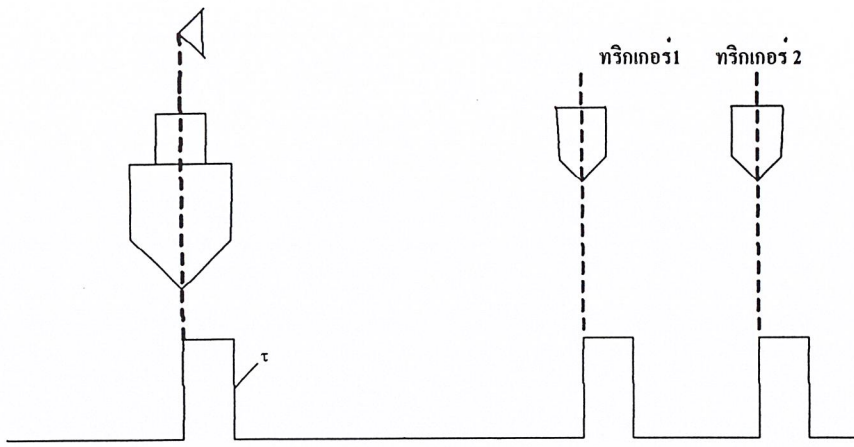
ในการค้นหาเป้าหมายตั้งแต่ 2 อันขึ้นไปที่อยู่ใกล้กันนั้น ความสามารถของเรดาร์จะมีขีดจำกัดขึ้นอยู่กับระยะทางและมุมของเป้าหมายนั้น ระยะต่ำสุดที่สามารถจำแนกเป้าหมายออกได้เรียกว่า เรนจ์ รีโซลูชัน (Range Resolution) มุมต่ำที่สุดที่สามารถจำแนกออกได้เรียกว่า อซิมุทรี โขลูชัน (Azimuth Resolution)

2.1.4.1 ระยะต่ำสุดที่สามารถจำแนกเป้าหมายออกได้

เป็นขีดจำกัดของอย่างหนึ่งของเรดาร์ในการค้นหาเป้าหมายหรือเป็นความสามารถของเรดาร์ที่สามารถแสดงระยะของเป้าหมายต่างๆที่อยู่เรียงกันในทิศทางเดียวกันให้เห็นว่ามันอยู่แยกกันบนจอ เรดาร์ ระยะต่ำสุดที่สามารถจำแนกเป้าหมายออกได้ พิจารณาได้ด้วยขนาดของจุดสว่างบนจอเรดาร์ และความกว้างของพัลส์ที่ส่งออกไป เนื่องจากคลื่นวิทยุเดินทางไปและกลับจากเป้าหมายที่อยู่ห่าง 150 เมตร ด้วยเวลา $1\mu\text{sec}$ ดังนั้นพัลส์ที่มีความกว้าง $2\mu\text{sec}$ จะใช้เวลาในการเดินทางไปและกลับจากเป้าหมายที่อยู่ห่าง 150 เมตร ด้วยเวลา $150\tau\mu\text{sec}$

ถ้าสองเป้าหมายอยู่ห่างจากเรดาร์เป็นระยะทาง 150 เมตร เท่ากันและอยู่ในทิศทางเดียวกัน เมื่อคลื่นวิทยุที่มีความกว้างของ พัลส์ $1\mu\text{sec}$ เดินทางมากระทบเป้าหมายทั้งสองโดยแสดงดังรูปที่ 2.2 ในกรณีนี้เป้าหมายทั้งสองจะไม่สามารถมองเห็นว่าแยกจากกัน ทั้งนี้เนื่องจากส่วนหลังของ สัญญาณสะท้อน ของเป้าหมายอันที่หนึ่งจะไปซ้อนทับกับส่วนหน้าของ สัญญาณสะท้อน ของเป้าหมายที่สอง ถ้าระยะทาง R ระหว่างเป้าหมายทั้งสองมีค่ามากกว่า 150 เมตร เรดาร์จะสามารถแยกเป้าหมายทั้งสองออกจากกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ความหมายของ ระยะต่ำสุดที่สามารถจำแนกเป้าหมายออกได้

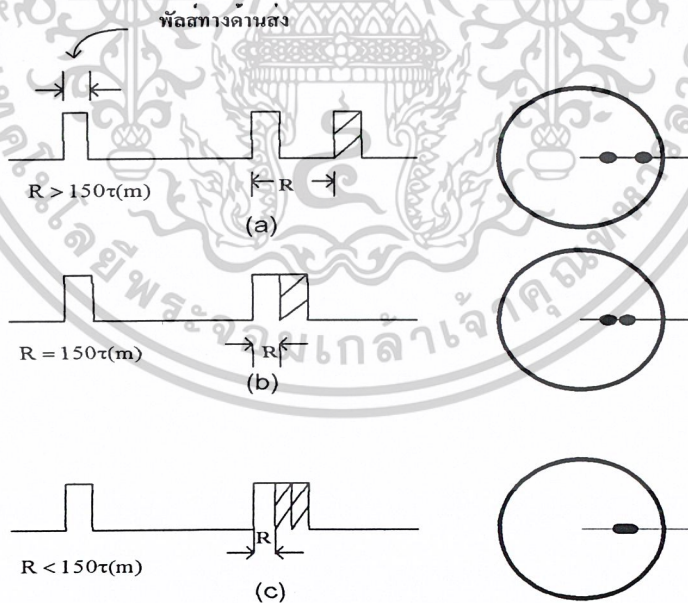
สำหรับพัลส์ที่มีความกว้าง τ μsec จะได้ ระยะต่ำสุดที่สามารถจำแนกเป้าหมายออกได้ดังสมการ

$$R = 150\tau \text{ (เมตร)}$$

ถ้า $\tau = 0.08 \text{ (}\mu\text{sec)}$

ดังนั้น $R = 12 \text{ (เมตร)}$

โดยค่าจริงอาจจะได้น้อยกว่าที่คำนวณได้จากสมการข้างบน ดังนั้นจะเห็นว่า ระยะต่ำสุดที่สามารถจำแนกเป้าหมายออกได้ จะดีขึ้นเมื่อ ความกว้างของพัลส์ (Pulse Width) แคบลง ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความหมายของระยะต่ำสุดที่สามารถจำแนกเป้าหมายออกได้และ ความกว้างของพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.2 มุมต่ำที่สุดที่สามารถจำแนกออกได้

เป็นขีดจำกัดของการค้นหาเป้าหมายในทิศทางแนวนอน โดยเป้าหมายหลายอันอยู่ห่างจากสายอากาศเรดาร์ด้วยระยะทางเท่ากันในทิศทางเท่ากันแต่สามารถแสดงให้เห็นว่าเป้าหมายเหล่านั้นทำมุมไม่เท่ากัน

ความสามารถนี้ขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศเป็นส่วนใหญ่ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ของสายอากาศแสดงด้วยความกว้างของลำคลื่น ใช้สัญลักษณ์ θ ที่ส่งออกไป ความกว้างนี้กำหนดจากความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง และสามารถคำนวณได้โดยประมาณจากสมการ

$$\theta = 70 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (\text{องศา}) \quad (2-3)$$

ในที่นี้ θ เป็นความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศมีหน่วยเป็นองศา

λ เป็นความยาวคลื่นที่ใช้

D เป็นประสิทธิภาพความยาว (Effective Length) ของสายอากาศ

จากสมการ (2-3) จะเห็นได้ว่าความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวคลื่นที่ใช้และเป็นสัดส่วนกลับกันกับ ประสิทธิภาพความยาว ของสายอากาศตัวอย่างของลำคลื่นของสายอากาศเรดาร์ที่ใช้กับมารีนเรดาร์แสดงดังตารางที่ 2.2

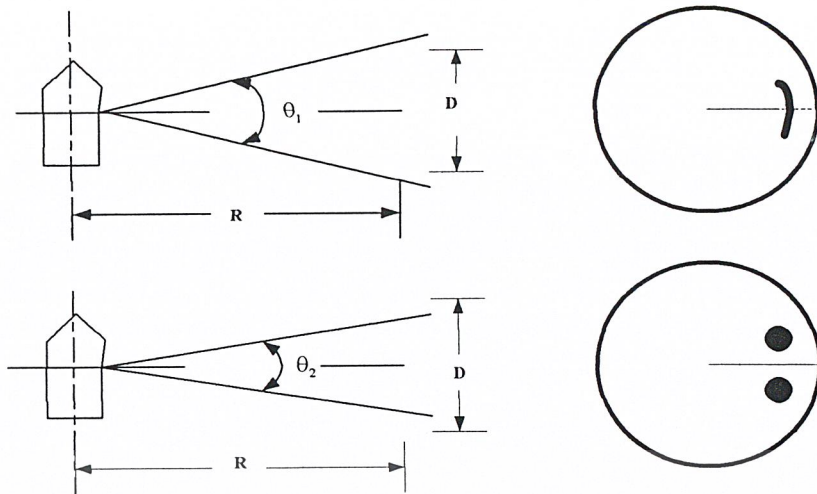
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวพื้นที่กับความกว้างของลำคลื่น

ประสิทธิภาพความยาว	ความกว้างของลำคลื่น
3 ft	2.5°
5 ft	1.5°
7 ft	1.0°
8 ft	0.9°
12 ft	0.6°

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า มุมต่ำที่สุดที่สามารถจำแนกออกได้ จะขึ้นอยู่กับความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศ ถ้า D เป็นระยะทางระหว่างเป้าหมายสองจุด R เป็นระยะทางจากเรดาร์ถึงเป้าหมายและ θ เป็นความกว้างของลำคลื่นแนวนอนจะได้ D ดังสมการ

$$D = 1852 \times R \left(\frac{\pi}{180} \right) \theta \quad (2-4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



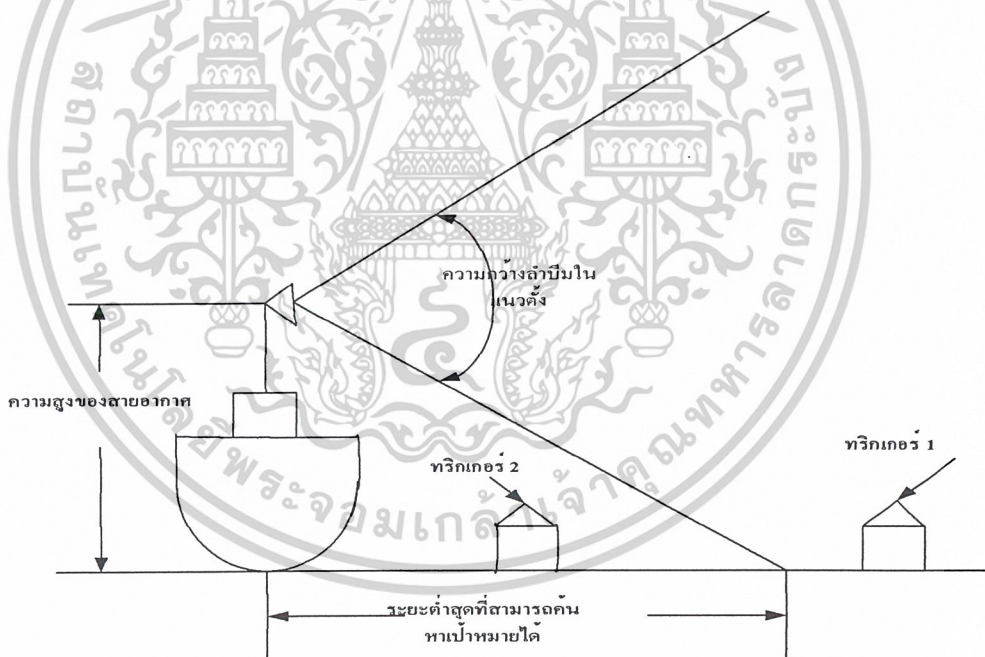
รูปที่ 2.4 การอธิบายความหมายของ มุมต่ำที่สุดที่สามารถจำแนกออกได้

2.1.5 ระยะทางต่ำสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้ (Minimum Detectable Range)

เป็นระยะทางที่ใกล้ที่สุดที่เรดาร์ค้นหาเป้าหมายได้ ใช้สัญลักษณ์ ΔR และขึ้นอยู่กับความกว้างของพัลส์ τ ดังแสดงในสมการ

$$\Delta R = 150\tau \text{ (เมตร)}$$

(2-5)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางต่ำสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้

ตามความเป็นจริงแล้วยังมีองค์ประกอบอย่างอื่นอีกที่จำกัด ค่าต่ำสุดของการค้นหาเป้าหมายซึ่งเกิดจาก มุมอับ (Dead Angle) ของลำคลื่นในแนวตั้งของสายอากาศ (Vertical Beam) เพราะว่ามีค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้างของลำคลื่นในแนวตั้งมีค่าจำกัด เป้าที่อยู่ภายในมุมอับจะไม่สามารถค้นหาได้ มุมอับได้สัมพันธ์กับความสูงของสายอากาศและความกว้างของลำคลื่นในแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.5 จากรูปที่ 2.5 คลื่นวิทยุที่ส่งออกไปจะสะท้อนจากเป้าหมายที่ 1 ที่อยู่ภายในพื้นที่ที่ลำคลื่นในแนวตั้งครอบคลุมอยู่ ส่วนเป้าหมายที่ 2 นั้นอยู่ในมุมอับซึ่งอยู่นอกลำคลื่นในแนวตั้ง อาจจะมีสัญญาณสะท้อนกลับจากเป้าหมายอื่นที่ 2 บ้างแต่จะน้อยมากเป็นผลให้ไม่สามารถค้นหาเป้าหมายที่ 2 ได้ ถ้าความสูงของเสาอากาศต่ำลง จะสามารถลดค่าระยะทางต่ำสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้ แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากลดความสูงของสายอากาศลงจะทำให้ ระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้ ลดลงตามด้วย เพราะเหตุนี้ความกว้างของลำคลื่นแนวตั้งจึงจำเป็นต้องเพิ่มขึ้นจนถึงค่า ๆ หนึ่ง โดยปกติในกรณีของ มาร์รินเรดาร์ จะเลือกความกว้างของลำคลื่นให้มีค่า 20 - 25 องศา ค่านี้เป็นค่าสูงสุดในกรณีที่จะลดผลของการ โคลงของเรือและการลอยขึ้นลงของเรือ

เมื่อเรือโคลงและลอยขึ้นลง สัญญาณสะท้อนจากเป้าหมายที่อยู่ใกล้ ๆ จะปรากฏให้เห็นบ้างหายไปบ้างในบางกรณีค่าต่ำสุดของ ช่วงค้นหาเป้าหมาย (R_{min}) คำนวณได้จากสมการ

$$R_{min} = \frac{h}{\tan(\theta_v / 2)} \text{ เมตร} \quad (2-6)$$

ในที่นี้ h เป็นความสูงของสายอากาศ
 θ_v เป็นความกว้างของลำคลื่นในแนวตั้ง

2.1.6 ระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้ (Maximum Detectable Range)

ระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้ขึ้นอยู่กับกำลังส่งความยาวคลื่นที่ใช้ของเครื่องรับส่งและอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งความสัมพันธ์เหล่านี้แสดงด้วยสมการเรดาร์มีวิธีดังต่อไปนี้

คลื่นวิทยุที่ส่งออกจากเครื่องส่งของเรดาร์ เมื่อไปกระทบกับเป้าหมายจะกระจายออกโดยที่ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับมาถึงเครื่องรับ ถ้ากำหนดให้ กำลังส่ง P_t เป็นกำลังของเครื่องส่งและส่งออกจากไปจากสายอากาศในทุกทิศทาง ความหนาแน่นของกำลังคลื่นวิทยุที่ส่งออกไปที่ระยะ R ซึ่งอยู่ห่างออกไปเป็นดังนี้

$$= \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (2-7)$$

ถ้า G_t เป็นอัตราขยายของสายอากาศแบบ นีออน ไคเรชั่น (Non Direction) ดังนั้นความหนาแน่นของกำลังที่ระยะทางอันเดียวกันจะได้

$$= \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi R^2} \quad (2-8)$$

ซึ่งถ้าคลื่นที่สะท้อนที่เป้าหมายมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection Coefficient) หรือ Effective Radar Cross Section ใช้สัญลักษณ์ σ จะได้ความหนาแน่นของกำลังที่สะท้อนกลับได้ดังนี้

$$= \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi R^2} \sigma \quad (2-9)$$

ในที่นี้ σ เป็น เอฟเฟกทีฟ ครอส เซกชัน (Effective Cross Section) ของเป้าหมายที่มองจากสายอากาศรับของเรดาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของกำลังของสัญญาณที่ได้รับจากเป้าหมายมายังสายอากาศรับซึ่งเป็นสายอันเดียวกันกับสายส่งจะมีค่าดังนี้

$$= \left[\frac{P_t \cdot G_t}{4\pi R^2} \sigma \right] \times \left[\frac{1}{4\pi R^2} \right] \quad (2-10)$$

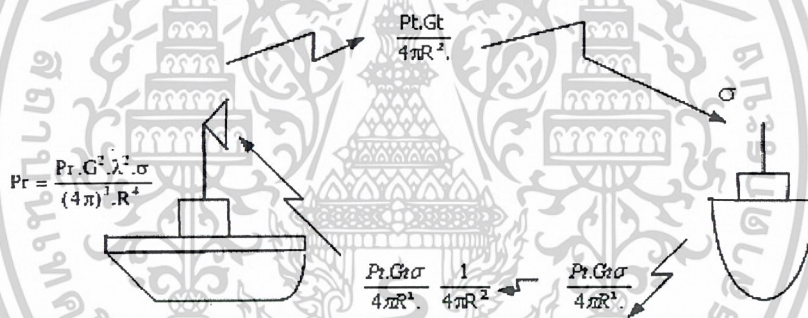
กำลัง P_t ที่ได้รับโดยสายอากาศรับที่มีประสิทธิภาพพื้นที่ของสายอากาศ (Effective Antenna Area), (A_r) แสดงดังสมการ

$$P_r = \left[\frac{P_t G_t}{4\pi R} \sigma \right] \times A_r \quad (2-11)$$

เนื่องจากว่า ระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้ (R_{max}) สามารถแสดงในเทอมของความไวต่ำสุดของเครื่องรับ (Maximum Receiver Sensitivity: S_{min} ซึ่งจะเท่ากับ Minimum P_r) ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} R_{max} &= 4 \sqrt{\frac{P_t \cdot G_t \cdot \lambda^3}{4\pi R^2 \cdot S_{min}}} \\ &= 4 \sqrt{\frac{P_t \cdot A_r^2 \cdot \sigma}{4\pi R^2 \cdot S_{min}}} \end{aligned} \quad (2-12)$$

หลักการหาสมการของเรดาร์แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 หลักการหาสมการของเรดาร์

2.1.7 คลัตเตอร์ (Clutter)

คลัตเตอร์ใช้อธิบายปรากฏการณ์ของสัญญาณสะท้อนที่ไม่พึงประสงค์ที่มาปรากฏยังหน้าจอร์รับของเรดาร์ ปรากฏการณ์การเกิดคลัตเตอร์ จะปรากฏทั่วไปโดยจะมีผลมาจาก การสะท้อนจากเนินเขา สิ่งปลูกสร้าง นก แมลง อุกาบาต หรือแม้กระทั่งแสงเหนือที่ปรากฏบนขอบฟ้า โดยทั่วไป คลัตเตอร์ที่เกิดจากระบบหนึ่งจะไม่เกิดในอีกระบบตัวอย่างเช่น เรดาร์ความถี่ย่าน (HF) ซึ่งปรกติใช้ในงานตรวจสอบคลื่นในทะเล โดยจะมีสัญญาณที่สะท้อนมาจากเรือทำให้ภาพที่รับได้ผิดเพี้ยนไป แต่เมื่อความถี่ย่าน (HF) ใช้สำหรับการ ติดตามเรือในทะเล จะเห็นว่า สัญญาณสะท้อนจากทะเลจะเป็นคลัตเตอร์แทน

คลัตเตอร์อาจจะมีกระจายการเกิด อื่นกับขนาดของพื้นที่และจุดคลัตเตอร์ จะเกิดจากการกระจายตัวของสัญญาณในเทอมของคลัตเตอร์จากพื้นดินใช้ในการอธิบายพื้นที่ที่การสะท้อนกลับของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากพื้นดินหรือทะเลซึ่งรับสัญญาณได้โดยเรดาร์ พื้นที่สะท้อนสัญญาณ (Radar Cross Section) ของคลัตเตอร์อธิบายได้ดีโดย คำนวณค่าเฉลี่ยความหนาแน่นพื้นที่สะท้อน (σ) CRS ตัวพื้นที่หนึ่งหน่วย ให้คำอธิบายโดย

$$\sigma^\circ = \frac{\sigma_c}{A_c} \quad (2-12-1)$$

เมื่อ $\sigma_c = \text{RCS}$ ของพื้นที่ A_c ตัวอักษร σ° และสามารถแสดงเป็นค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนเรดาร์ของพื้นดิน

ปริมาณครัตเตอร์โดยทั่วไปจะใช้อธิบาย ค่าสะท้อนจากบรรยากาศใช้ในการวัดปริมาณการสะท้อนสัญญาณจากครัตเตอร์ที่กำลังติดตามอยู่ค่า RCS เหลือจะใช้ η ในการอธิบาย

$$\text{โดย} \quad \eta = \frac{\sigma_c}{V_c} \quad (1-12-2)$$

เมื่อ $\sigma_c = \text{RCS}$ ของปริมาตร V_c

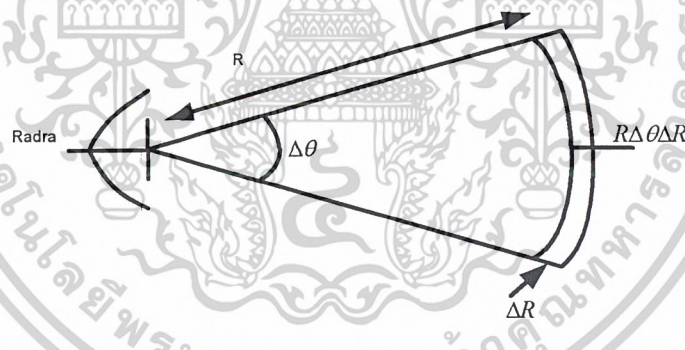
สัญญาณสะท้อนจากครัตเตอร์ผิวดินจะมีขนาดใหญ่ส่วนใหญ่อันแล้วจะมีขนาดใหญ่กว่า เป้าหมายที่เราต้องการเราจะต้องคำนวณหาขนาดของพื้นที่ ซึ่งเป็นแถบบนพื้นกว้าง ΔR และค่าความยาวหาได้จากสมการ

$$\text{ความยาวมุมโค้ง} = R \cdot \Delta\theta (\text{m}) \quad (2-12-3)$$

โดยค่า $R = \text{range}$ (m) และ $\Delta\theta = \text{Beamwidth}$ (rad) พื้นที่ที่มีการสะท้อนทั้งหมดคือ

$$\text{พื้นที่สะท้อน} = R \cdot \Delta\theta \cdot \Delta R \quad (2-12-4)$$

สำหรับเรดาร์ใช้สำรวจพื้นดิน ที่ทำมุมที่ α พื้นที่ที่สะท้อนจะลดลงโดยค่า α



รูปที่ 2.7 พื้นที่ของกราวนด์ส่องสว่างโดยลำของเรดาร์ที่ตกกระทบตรงรอยต่อจากสมการ (2-11) การเพิ่มค่าสูงที่สุดของการค้นหาเป้าหมายทำได้ดังนี้

- เพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ

ค่าอัตราขยายของสายอากาศแสดงด้วยค่าประมาณดังสมการ

$$G = \frac{40000}{\theta_H \theta_V} \quad (2-13)$$

ในที่นี้ θ_H คือความกว้างของลำคลื่นในแนวนอน

θ_V คือความกว้างของลำคลื่นในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2-13) จะเห็นว่าอัตราขยายของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของลำคลื่นแคบลงและความกว้างจะลดลงได้โดยการเพิ่มอะเพอเจอร์ของสายอากาศ

ความกว้างของลำคลื่นในแนวตั้งโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 20 ถึง 25 องศา ถ้าใช้ อัตราขยายของสายอากาศแบบสล็อต (Slotted Antenna Gain) ของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นโดยการทำให้ อะเพอเจอร์ ของสายอากาศ (Antenna Aperture) ยาวมากขึ้น

จากสมการที่ (2-4) นำมาพิจารณาค่า ค่าสูงสุดของการค้นหาเป้าหมาย เมื่อค่าความยาวของ พื้นที่ของสายอากาศ เปลี่ยนไปดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้ที่ความยาวค่าต่าง ๆ ของพื้นที่สายอากาศ

ความยาวอะเพอเจอร์ ของสายอากาศ (Antenna Aperture Length D(Ft))	3	5	7	8	12
ระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้(Maximum Detectable Range), R_{max}	1	1.3	1.6	1.7	2

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่า ระยะทางของการค้นหาเป้าหมายสูงสุด จะมีค่าเป็น 2 เท่าถ้าหากสายอากาศอะเพอเจอร์ (Antenna Aperture) มีความยาวเป็น 4 เท่า

- เพิ่มกำลังส่ง P_t

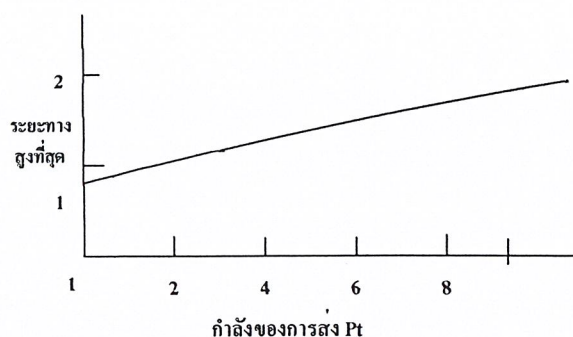
เนื่องจากระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้ (R_{max}) เป็นสัดส่วนกับกรณีที่ 4 ของกำลังส่ง ถ้าต้องการเพิ่มระยะทางสูงสุดเป็น 2 เท่า จะต้องเพิ่มกำลังเป็น 16 เท่า ถ้าทำเช่นนี้ อุปกรณ์เรดาร์จะมีราคาสูงขึ้น ดังนั้นวิธีอื่นที่ดีกว่าก็คือ การเพิ่มความไวของเครื่องรับ ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางสูงสุด กับกำลังส่ง P_t แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้ กับ กำลังส่ง

ระยะทางสูงสุด	1.19	1.32	1.41	1.5	1.57	1.63	1.68	1.73	1.78
กำลังส่ง	2	3	4	5	6	7	8	9	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่างๆจากตารางที่ 2.4 นำมาเขียนเป็นกราฟดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสูงสุดกับกำลังส่ง

ตารางที่ 2.5 สรุปส่วนประกอบต่างๆ ของการทำงานของเรดาร์

สมรรถภาพของเรดาร์	พารามิเตอร์
ระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้	กำลังส่งของเครื่องส่ง, ความไวของเครื่องรับ, ความยาวของคลื่นที่ใช้, อัตราขยายของสายอากาศ, ความสูงของสายอากาศ, ชนิดและความสูงของเป้าหมาย
มุมต่ำที่สุดที่สามารถจำแนกออกได้ ระยะต่ำสุดที่สามารถจำแนกเป้าหมายออกได้	ลำคลื่นในแนวนอนของสายอากาศ และคุณสมบัติของหลอดภาพ ความกว้างของ ฟัลด์, ความไวของเครื่องรับ และคุณสมบัติของหลอดจอภาพ
ระยะทางต่ำที่สุดที่เรดาร์สามารถค้นหาเป้าหมายได้	ความกว้างของ ฟัลด์, ความยาวของลำคลื่น ในแนวตั้งของสายอากาศและคุณสมบัติของจอภาพ

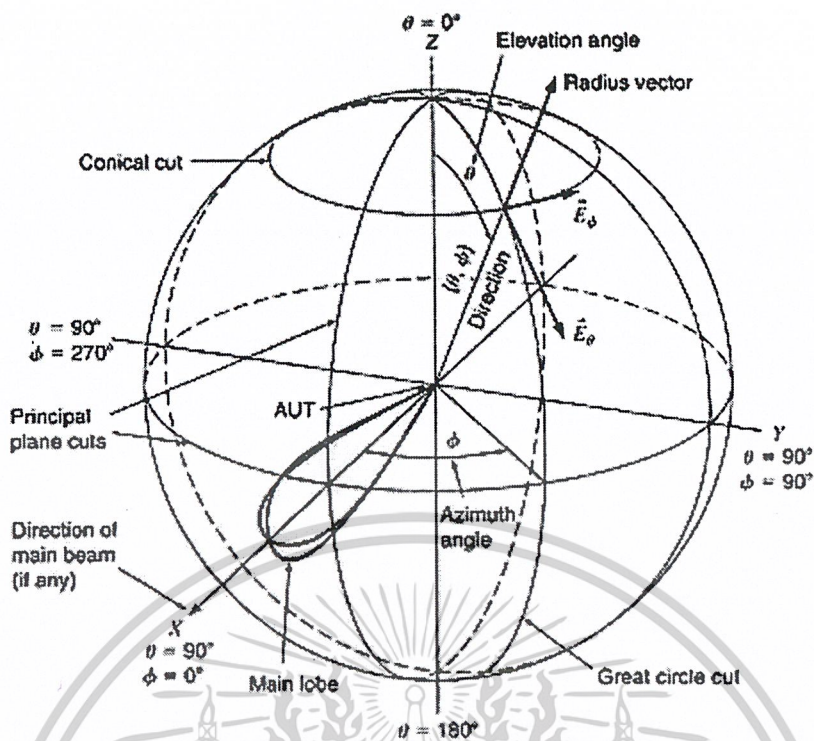
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับวิศวกรรมสายอากาศ

2.2.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น

รูปที่ 2.9 แสดงระบบพิกัดที่ใช้แสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายของคลื่น สำหรับการชี้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่เรียกว่า รูปแบบกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่เรียกว่ารูปแบบสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

2.2.2 ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซโทรปิก

ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซโทรปิก (Isotropic Radiator) คือ สายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่าๆกันในทุกทิศทาง ได้แก่ พอยท์ซอร์ส (Point Source) เป็นสายอากาศทางอุดมคติที่ไม่สามารถสร้างได้จริงแต่จะใช้เป็นตัวอ้างอิงกับสายอากาศจริงเพื่อแสดงคุณสมบัติ หรือสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

2.2.3 สายอากาศซึ่งทิศทางเดียว (Unidirectional Antenna) และสายอากาศแบบแพร่กระจายคลื่นทุกทิศทาง (Omni Directional Antenna)

สายอากาศซึ่งทิศทางเดียว (Unidirectional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีเฉพาะทิศทางที่กำหนดเพียงทิศทางเดียวนั้น และ อีกชนิดคือสายอากาศที่สามารถรับหรือส่งคลื่นในทิศทางรอบตัวได้คือ สายอากาศแบบแพร่กระจายคลื่นทุกทิศทาง (Omni Directional Antenna)

2.2.4 ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มการกระจายคลื่นต่ำ รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบโพลาร์ (Polar Pattern) แบบ 3 มิติ ซึ่งแบ่งเป็นลำคลื่นต่างๆ ได้ดังนี้

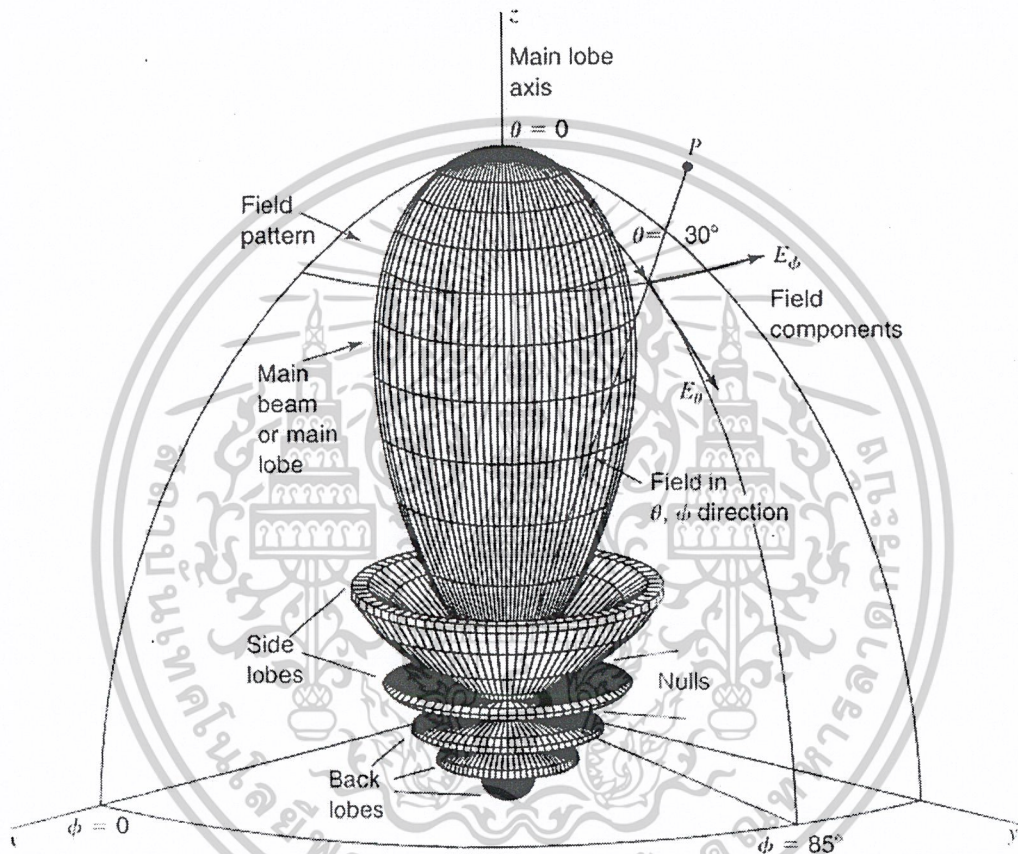
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำคลื่นหลัก (Main lobe หรือ Major lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งอยู่ในทิศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงสุด

ลำคลื่นย่อย (Minor lobe) ได้แก่ลำคลื่นอื่นๆที่มีนอกเหนือไปจากลำคลื่นหลัก

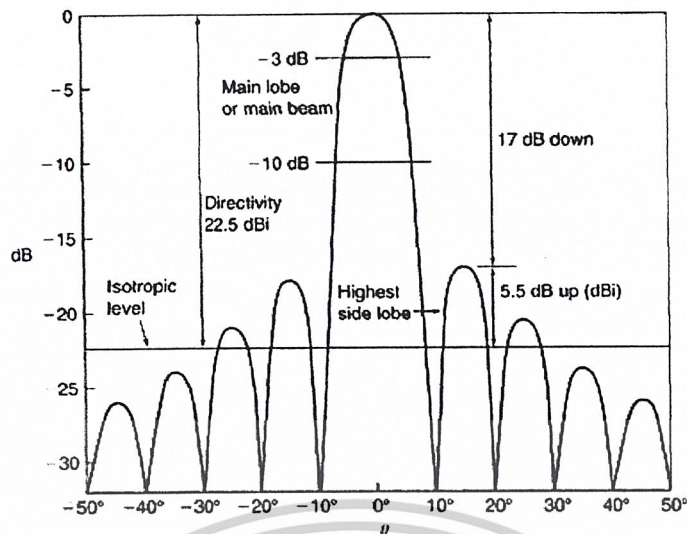
ลำคลื่นด้านข้าง (Side lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ติดกับลำคลื่นหลักและอยู่ในทิศทางครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นด้านหลัง (Back lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมด้านตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก



รูปที่ 2.10 ลำคลื่นต่างๆและบีมวิดท์ของรูปแบบสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างรูปแบบของสายอากาศ

2.2.5 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beam Width: HPBW)

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในลำคลื่นหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด

2.2.6 ความกว้างลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width)

ความกว้างลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรกเป็นมุมที่วัดระหว่างนัลคู่แรกที่อยู่ติดกับลำคลื่นหลัก

2.2.7 อัตราส่วนของลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe Ratio) หรือระดับของลำคลื่นข้าง (Side Lobe Level: SLL)

อัตราส่วนของลำคลื่นด้านข้าง หรือระดับของลำคลื่นด้านข้าง คืออัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงาน ในลำคลื่นข้างที่ติดก้ำถึงความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นหลัก

2.2.8 อัตราส่วนของลำคลื่นหน้าต่อลำคลื่นหลัง

อัตราส่วนของลำคลื่นหน้าต่อลำคลื่นหลัง (Front to Back Ratio) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นหลักต่อความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นหลัง

2.2.9 เรเดียนและสเตอเรเดียน

การวัดมุมบนระนาบจะมีหน่วยเป็นเรเดียน เรเดียนเป็นมุมระนาบ ซึ่งยอดจะอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมที่มีรัศมี r และถูกปิดล้อมด้วยเส้นรอบวงยาว

การวัดมุมตันมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน (sr) หนึ่งสเตอเรเดียนเป็นมุมตันที่มียอดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมรัศมี r ซึ่งจะครอบคลุมพื้นที่

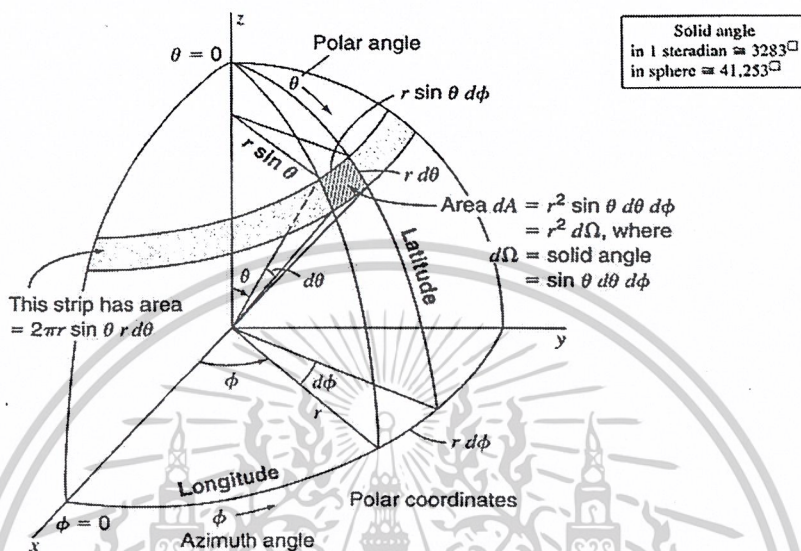
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.1 พื้นที่ขนาดเล็ก dA บนพื้นผิวทรงกลมรัศมี r จะคำนวณได้เป็น

$$dA = r^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (\text{radian}) \quad (2-14)$$

ดังนั้นส่วนประกอบของมุมตันของทรงกลมจะเขียนได้เป็น

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi \quad (\text{sr}) \quad (2-15)$$



รูปที่ 2.12 คำจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน

2.2.10 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดคือกำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศในทิศทางนั้นต่อหน่วยมุมตันซึ่งสามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่นกับผลจากการกำลังสองระยะทาง โดยจะเขียนเป็นสมการดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{\text{rad}} \quad (2-16)$$

เมื่อ U ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/sr)
 W_{rad} ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (W/m²)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นถ้าเขียนเป็นความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศระยะไกลได้ดังนี้

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= \frac{r^2}{2\eta} |\bar{E}(r, \theta, \phi)|^2 \\ &\approx \frac{r^2}{2\eta} [|\bar{E}_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |\bar{E}_\phi(r, \theta, \phi)|^2] \\ &\approx \frac{1}{2\eta} [|\bar{E}_\theta(\theta, \phi)|^2 + |\bar{E}_\phi(\theta, \phi)|^2] \end{aligned} \quad (2-17)$$

เมื่อ \bar{E} ความเข้มของสนามไฟฟ้าระยะไกล
 E_θ, E_ϕ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าระยะไกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบ 61948 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

η อินทริเนติกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง
กำลังงานทั้งหมดนี้หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นตาม (2-18) ตลอดมุม
ตัน ซึ่งจะได้

$$P_{\text{rad}} = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (2-18)$$

2.2.11 อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Directivity)

อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ในทิศทางที่กำหนดคือ อัตราส่วนของความ
เข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้สำหรับ
อ้างอิงซึ่งปรกติสายอากาศสำหรับอ้างอิงนี้จะใช้ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source)

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi\pi}{P_{\text{rad}}} \quad (2-19)$$

$$D = \frac{U_{\text{max}}}{U_0} = \frac{4\pi\pi_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} \quad (2-20)$$

เมื่อ	D	อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (ไม่มีหน่วย)
	D_0	ค่าสูงสุดของอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (ไม่มีหน่วย)
	U	ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/sr)
	U_{max}	ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/sr)
	U_0	ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (W/sr)
	P_{rad}	กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (W)

2.2.12 อัตราขยาย

อัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้จะมีค่าเท่ากับ 4π คูณกับอัตราส่วนของ
ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง
เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยทั่วไปแล้วเราจะคิดแกนในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงสุด จะได้

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{in}}} \quad (2-21)$$

เราสามารถเขียนได้ว่า กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้กับ
สายอากาศ (P_{in}) ด้วย

$$P_{\text{rad}} = e_t P_{\text{in}} \quad (2-22)$$

เมื่อป้อน e_t เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ใช้ (2-21) จะทำให้ (2-10) มี
ความสัมพันธ์เป็น

$$G(\theta, \phi) = e_t D(\theta, \phi) \quad (2-23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

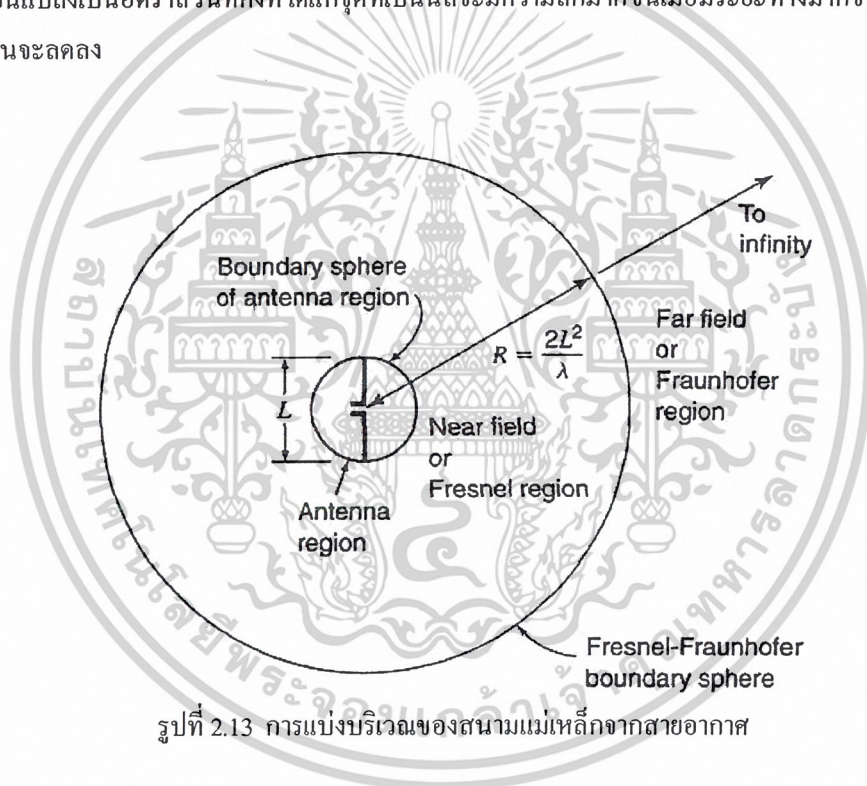
2.2.13 บริเวณต่างๆของสนามจากสายอากาศ

จะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. บริเวณสนามระยะใกล้ (Reactive Near Field) เป็นบริเวณสนามจะเก็บพลังงานจากสายอากาศ ในรูปของรีแอกทีฟ โดยจะมีระยะอยู่ระหว่าง $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ จากผิวของสายอากาศ เมื่อ λ เป็น ความยาวคลื่นและ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

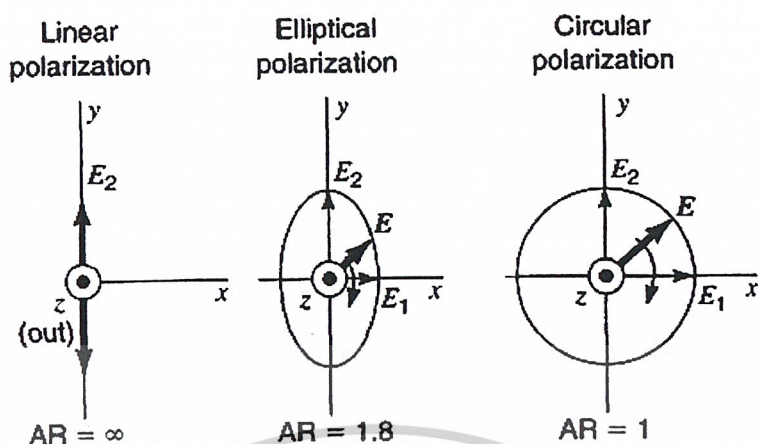
2. บริเวณสนามระยะใกล้ที่มีการแผ่กระจายคลื่น (Radiating Near Field) เป็นบริเวณสนามของ สายอากาศ ที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามระยะใกล้กับสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายตัวอยู่เป็น ส่วนใหญ่ และพบว่ารูปแบบการกระจายคลื่นจะเปลี่ยนไปตามระยะทาง โดยจะมีระยะอยู่ระหว่าง $2D^2/\lambda \leq R \leq \infty$ จากผิวของสายอากาศ

3. บริเวณสนามระยะไกล (Far Field) สนามในบริเวณนี้จะมีการแผ่กระจายคลื่นออกมาโดยจะมี รูปแบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเช่น กำลังงานหรือเฟส แต่ก็ จะเปลี่ยนแปลงเป็นอัตราส่วนที่คงที่ได้แก่จุดที่เป็นนัลจะมีความลึกมากขึ้นเมื่อมีระยะทางมากขึ้นและ กำลังงานจะลดลง



2.2.14 โพลาริเซชันของคลื่น

โพลาริเซชัน ของคลื่นที่แผ่กระจายนั้น แสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจาย ออกไป ที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา โพลาริเซชันจะแสดงการ กวาดของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกต ซึ่งคงที่ และการสังเกตนี้จะ ทำโดย มองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป



รูปที่ 2.14 โพลาริเซชันของคลื่น

สมมุติให้ สนามไฟฟ้า \vec{E} มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในทิศ x เป็น \vec{E}_x และในทิศ y เป็น \vec{E}_y ซึ่งแต่ละองค์ประกอบ มีค่าเป็น

$$\vec{E}_x = E_x \sin(\omega t - \beta z) \vec{a}_x \quad (2-24)$$

$$\vec{E}_y = E_y \sin(\omega t - \beta z + \delta) \vec{a}_y \quad (2-25)$$

เมื่อ E_x เป็นขนาดของคลื่นที่มีโพลาริเซชันแบบเชิงเส้นในทิศ x

E_y เป็นขนาดของคลื่นที่มีโพลาริเซชันแบบเชิงเส้นในทิศ y

δ เป็นมุมเฟส-เวลาที่ E_y นำหน้า E_x

รวมสมการจะได้เวกเตอร์ของสนามทั้งหมด \vec{E} ที่ขณะหนึ่งขณะใดของเวลาคือ

$$\vec{E} = E_x \sin(\omega t - \beta z) \vec{a}_x + E_y \sin(\omega t - \beta z + \delta) \vec{a}_y \quad (2-26)$$

ก. โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น

คลื่นเป็นโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น จะเกิดขึ้นเมื่อ δ มีค่าเป็นคี่นี้

$$\delta = n\pi, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2-27)$$

ข. โพลาริเซชันแบบวงกลม

คลื่นที่เป็นโพลาริเซชันแบบวงกลมจะเกิดขึ้นเมื่อสนามทั้งสองจะต้องมีค่าเท่ากันและค่า δ เป็นคี่นี้

$$E_x = E_y \quad (2-28)$$

$$\delta = +(1/2 + 2n)\pi, n = 0, 1, 2, \dots \text{ ตามเข็มนาฬิกา} \quad (2-29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. โพลาริเซชันแบบวงรี

คลื่นที่มีโพลาริเซชันแบบวงรี จะเกิดเมื่อสนามทั้งสองมีค่าไม่เท่ากันและ δ มีค่าเป็นจำนวนคี่ของ $\pi/2$ หรือ δ มีค่าไม่เป็นจำนวนคี่ของ n นั่นคือ

$$E_x \neq E_y \quad (2-31)$$

$$\delta = +(1/2 + 2n)\pi, n = 0, 1, 2, \dots \text{ ตามเข็มนาฬิกา} \quad (2-32)$$

$$\delta = -(1/2 + 2n)\pi, n = 0, 1, 2, \dots \text{ ทวนเข็มนาฬิกา} \quad (2-33)$$

หรือเมื่อ $\delta = \pm \frac{n\pi}{2}, n = 0, 1, 2, \dots$

$$\delta > 0 \quad \text{ตามเข็มนาฬิกา} \quad (2-34)$$

$$\delta < 0 \quad \text{ทวนเข็มนาฬิกา} \quad (2-35)$$

ในกรณีของโพลาริเซชันแบบวงรีรูปแสดงการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ที่ตำแหน่งใดๆ จะเป็นวงรีเอียง อัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนย่อย จะเรียกว่าเป็นอัตราส่วนของแกน (Axial Ratio : AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$AR = \frac{OA}{OB}; 1 \leq AR \leq \infty \quad (2-36)$$

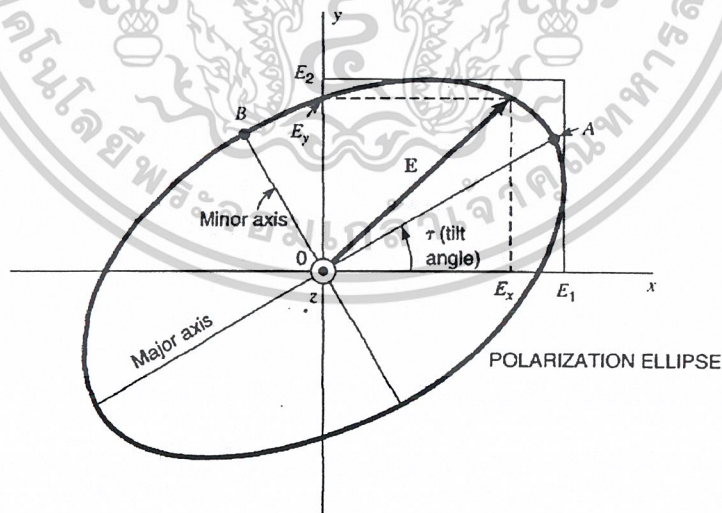
เมื่อ

$$OA = \sqrt{\frac{1}{2}(E_x^2 + E_y^2) + \sqrt{E_x^4 + E_y^4 + 2E_x^2 E_y^2 \cos(2\delta)}} \quad (2-37)$$

$$OB = \sqrt{\frac{1}{2}(E_x^2 + E_y^2) - \sqrt{E_x^4 + E_y^4 + 2E_x^2 E_y^2 \cos(2\delta)}} \quad (2-38)$$

การเอียงของวงรีเทียบกับแกน y สามารถแสดงด้วยมุมเอียง ดังนี้คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2E_x E_y \cos \delta}{E_x^2 - E_y^2} \right) \quad (2-39)$$



รูปที่ 2.15 โพลาริเซชันแบบวงรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.15 การสะท้อน การหักเห และการเบี่ยงเบนของคลื่น

พิจารณาคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นที่เดินทางในทิศ $+x$ โดยมี \vec{E} ในทิศทาง y และ \vec{H} ในทิศ z คลื่นที่ตกกระทบในทิศตั้งฉากบนรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิด สมมุติว่าคลื่นที่ตกกระทบโดยทั่วไปแล้วจะสะท้อนกลับ ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งจะส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สอง คลื่นสะท้อนกลับมีองค์ประกอบของสนามเป็น E_x และ H_z ที่รอยต่อและคลื่นส่งผ่านมีองค์ประกอบของสนามเป็น E_t และ H_t ที่รอยต่อ เราจะได้ว่า

$$E_t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} E_i = \tau E_i \quad (2-40)$$

$$E_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} E_i = \rho E_i \quad (2-41)$$

เมื่อ	Z_1	เป็นอิมพีแดนซ์อินทรีนสิกของตัวกลางที่ 1
	Z_2	เป็นอิมพีแดนซ์อินทรีนสิกของตัวกลางที่ 2
	τ	เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่าน (Transmission Coefficient)
	ρ	เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient)

กรณีที่คลื่นระนาบที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น ที่ตกกระทบในทิศทำมุมใด ๆ บนรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิด คลื่นตกกระทบทำมุม θ_i กับแกน y คลื่นสะท้อนทำมุม θ_r กับแกน y และคลื่นส่งผ่านทำมุม θ_t กับแกน $-y$

เราจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ : (ก) กรณีของคลื่นที่มีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบ (ระนาบ xy) และ (ข) กรณีของคลื่นที่มีสนามไฟฟ้าขนานกับระนาบของการตกกระทบ คลื่นเหล่านี้จะถูกเรียกว่าเป็นคลื่นที่มีโพลาไรเซชันตั้งฉาก (Perpendicular Polarized) และโพลาไรเซชันขนาน (Parallel Polarized) ตามลำดับเวกเตอร์ของสนามที่แสดงในรูป 2.13 เป็นกรณีของโพลาไรเซชันตั้งฉากจะเห็นได้ชัดว่า คลื่นในระนาบใด ๆ จะสามารถแยกองค์ประกอบของคลื่นออกได้เป็นองค์ประกอบที่มีโพลาไรเซชันตั้งฉากและโพลาไรเซชันขนาน ได้ทั้งสิ้น

จากกฎของสเนลล์ (Snell's Law) จะได้

$$\theta_r = \theta_i \quad (2-42)$$

$$\sin \theta_t = \frac{\eta_1}{\eta_2} \sin \theta_i \quad (2-43)$$

เมื่อ η_1 และ η_2 เป็นดัชนีการหักเหของตัวกลางที่ 1 และที่ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sqrt{\mu_r \epsilon_r}$
 ก. กรณีโพลาไรเซชันตั้งฉาก

เราสามารถแสดงได้ว่าค่าของสนามต่าง ๆ จะเป็นดังต่อไปนี้

$$\vec{E}_i = \vec{a}_z E_0 \exp[j\beta_1 (x \sin \theta_i + y \cos \theta_i)] \quad (2-44)$$

$$\overline{H}_i = (-\overline{a}_x \cos\theta_i + \overline{a}_y \sin\theta_i) \frac{E_0}{Z_1} \exp[j\beta_1(x \sin\theta_i + y \cos\theta_i)] \quad (2-45)$$

$$\overline{E}_r = \overline{a}_z \rho_{\perp} E_0 \exp[j\beta_1(x \sin\theta_r - y \cos\theta_r)] \quad (2-46)$$

$$\overline{H}_r = (\overline{a}_x \cos\theta_r + \overline{a}_y \sin\theta_r) \rho_{\perp} \frac{E_0}{Z_1} \exp[j\beta_1(x \sin\theta_r - y \cos\theta_r)] \quad (2-47)$$

$$\overline{E}_t = \overline{a}_z \tau_{\perp} E_0 \exp[j\beta_2(x \sin\theta_t + y \cos\theta_t)] \quad (2-48)$$

$$\overline{H}_t = (-\overline{a}_x \cos\theta_t + \overline{a}_y \sin\theta_t) \tau_{\perp} \frac{E_0}{Z_2} \exp[j\beta_2(x \sin\theta_t + y \cos\theta_t)] \quad (2-49)$$

เมื่อ $1 + \rho_{\perp} = \tau_{\perp}$ (2-50)

$$\rho_{\perp} = \frac{Z_2 \cos\theta_i - Z_1 \cos\theta_t}{Z_2 \cos\theta_i + Z_1 \cos\theta_t} \quad (2-51)$$

ข. กรณีโพลาไรเซชันขนาน

เราสามารถแสดงได้ว่าค่าของสนามต่าง ๆ จะเป็นดังต่อไปนี้

$$\overline{E}_i = (-\overline{a}_x \cos\theta_i + \overline{a}_y \sin\theta_i) E_0 \exp[j\beta_1(x \sin\theta_i + y \cos\theta_i)] \quad (2-52)$$

$$\overline{H}_i = -\overline{a}_z \frac{E_0}{Z_1} \exp[j\beta_1(x \sin\theta_i + y \cos\theta_i)] \quad (2-53)$$

$$\overline{E}_r = (-\overline{a}_x \cos\theta_r - \overline{a}_y \sin\theta_r) \rho_{\parallel} E_0 \exp[j\beta_1(x \sin\theta_r - y \cos\theta_r)] \quad (2-54)$$

$$\overline{H}_r = \overline{a}_z \rho_{\parallel} \frac{E_0}{Z_1} \exp[j\beta_1(x \sin\theta_r - y \cos\theta_r)] \quad (2-55)$$

$$\overline{E}_t = (-\overline{a}_x \cos\theta_t + \overline{a}_y \sin\theta_t) \tau_{\parallel} E_0 \exp[j\beta_2(x \sin\theta_t + y \cos\theta_t)] \quad (2-56)$$

$$\overline{H}_t = -\overline{a}_z \tau_{\parallel} \frac{E_0}{Z_2} \exp[j\beta_2(x \sin\theta_t + y \cos\theta_t)] \quad (2-57)$$

เมื่อ $1 + \rho_{\parallel} = \tau_{\parallel}$ (2-58)

$$\rho_{\parallel} = \frac{Z_2 \cos\theta_i - Z_1 \cos\theta_t}{Z_2 \cos\theta_i + Z_1 \cos\theta_t} \quad (2-59)$$

2.3 ทฤษฎีสายอากาศปากแคบ

2.3.1 สนามอะเพอเจอร์ (Aperture Field)

เราสามารถใช้อย่างอากาศปากแคบเป็นสายอากาศอะเพอเจอร์ได้ การที่จะหาคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นจำเป็นต้องรู้ส่วนประกอบทางแม่เหล็กและไฟฟ้าในแนวสัมผัสของผิวปิดโดยผิวปิดนิยมใช้เป็นระนาบอนันต์ที่ตรงกับอะเพอเจอร์ของสายอากาศปากแคบ เรามักจะให้สนามภายนอกอะเพอเจอร์เป็นศูนย์ สนามภายในสายอากาศปากแคบสามารถแสดงได้ในเทอมของ TE และ TM ของฟังก์ชันทรงกระบอก วิธีนี้จะหาสนามทั้งที่อะเพอเจอร์ของสายอากาศปากแคบ และภายในสายอากาศปากแคบด้วย เราสามารถแสดงได้ว่าเมื่อสนามของท่อปิดเป็น Dominant Mode TE_{10} และความยาวของสายอากาศ

ปากแตรมีค่ามากเมื่อเทียบกับมิติอะพोजอร์ แล้วสนามออร์เดอร์โหมด (Order Mode) ที่ต่ำที่สุด ที่อะพोजอร์ของสายอากาศปากแตรจะเป็น

$$E'_z = E'_x = H'_y = 0 \quad (2-60)$$

$$E'_y(x', y') \approx E_1 \cos\left(\frac{\pi}{a} x'\right) e^{-j[ky^2/(2\rho_1)]} \quad (2-61)$$

$$H'_z(x', y') \approx jE_1 \left(\frac{\pi}{ka\eta}\right) \sin\left(\frac{\pi}{a} x'\right) e^{-j[ky^2/(2\rho_1)]} \quad (2-62)$$

$$H'_x(x', y') \approx \frac{E_1}{\eta} \cos\left(\frac{\pi}{a} x'\right) e^{-j[ky^2/(2\rho_1)]} \quad (2-63)$$

$$\rho_1 = \rho_e \cos\psi_e \quad (2-64)$$

2.3.2 สายอากาศปากแตรทรงพีรามิด (Pyramidal Horn)

เป็นสายอากาศปากแตรที่นิยมมากที่สุดเพราะลักษณะของการแพร่กระจายเป็นการรวมของสายอากาศปากแตรแบบ เซกทอเรียล (Sectoral) ทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็ก ส่วนประกอบแนวสัมผัสของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่อะพोजอร์ของสายอากาศปากแตรหาได้จาก

$$E'_y(x', y') = E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) e^{-j[k(x^2/\rho_2 + y^2/\rho_1)/2]} \quad (2-65)$$

$$H'_x(x', y') = -\frac{E_0}{\eta} \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) e^{-j[k(x^2/\rho_2 + y^2/\rho_1)/2]} \quad (2-66)$$

ความหนาแน่นกระแสสมมูลเป็น

$$J'_y(x', y') = -\frac{E_0}{\eta} \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) e^{-j[k(x^2/\rho_2 + y^2/\rho_1)/2]} \quad (2-67)$$

$$M'_x(x', y') = E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a_1} x'\right) e^{-j[k(x^2/\rho_2 + y^2/\rho_1)/2]} \quad (2-68)$$

ส่วนประกอบอื่น ๆ เป็น

$$N_\theta = -\frac{E_0}{\eta} \cos\theta \cos\theta \sin\theta I_2 \quad (2-69)$$

$$N_\phi = -\frac{E_0}{\eta} \cos\phi I_2 \quad (2-70)$$

$$L_\theta = E_0 \cos\theta \cos\theta \cos\theta I_2 \quad (2-71)$$

$$L_\phi = -E_0 \sin\phi I_2 \quad (2-72)$$

โดยที่

$$I_1 = \int_{-a_1/2}^{+a_1/2} \cos\left(\frac{\pi}{a} x'\right) e^{-jk[x^2/(2\rho_1) - x' \sin\theta \sin\theta]} dx'$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= \int_{-a_1/2}^{+a_1/2} \left(\frac{e^{j(\pi/a)x'} + e^{-j(\pi/a)x'}}{2} \right) e^{-jk[x'^2/(2\rho_1) - x' \sin\theta \sin\theta c]} dx' \\
&= \frac{1}{2} \int_{-a_1/2}^{+a_1/2} e^{jx' \left(\frac{\pi}{a} \frac{k}{2\rho_2} + kx' \right)} dx' + \frac{1}{2} \int_{-a_1/2}^{+a_1/2} e^{jx' \left(-\frac{\pi}{a} \frac{k}{2\rho_2} + kx' \right)} dx'
\end{aligned} \quad (2-73)$$

$$k_x = k \sin\theta \sin\theta \quad (2-74)$$

สามารถเขียนได้โดยให้

$$I_1 = I_2' + I_2'' \quad (2-75)$$

$$\begin{aligned}
I_2' &= \frac{1}{2} \int_{-a_1/2}^{+a_1/2} e^{jx' \left(\frac{\pi}{a} \frac{k}{2\rho_2} + kx' \right)} dx' \\
&= \frac{1}{2} \int_{-a_1/2}^{+a_1/2} e^{-j \left(\frac{x'k}{2\rho_2} - k'x' \right)} dx' \\
&= \frac{1}{2} e^{j(k_x \rho_2 / 2k)} \int_{-a_1/2}^{+a_1/2} e^{-j(kx' - k'_x \rho_2)^2 / 2k} dx'
\end{aligned} \quad (2-76)$$

โดยที่

$$k'_x = k_x + \frac{\pi}{a} \quad (2-77)$$

เปลี่ยนตัวแปรโดยให้

$$\begin{aligned}
\sqrt{\frac{\pi}{2}} t &= \sqrt{\frac{1}{2k\rho_2}} (kx' - k'_x \rho_2) \\
t &= \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_2}} (kx' - k'_x \rho_2) \\
dt &= \sqrt{\frac{k}{\pi\rho_2}} dx' \\
x' = -\frac{a_1}{2} &\Rightarrow t_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_2}} \left(-\frac{ka_1}{2} - k'_x \rho_2 \right) \\
x' = +\frac{a_1}{2} &\Rightarrow t_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_2}} \left(+\frac{ka_1}{2} - k'_x \rho_2 \right)
\end{aligned}$$

แทนค่าใน I_2' จะได้

$$\begin{aligned}
I_2' &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi\rho_2}{k}} e^{j(k_x \rho_2 / 2k)} \int_{t_1}^{t_2} e^{-j\frac{\pi}{2} t^2} dt \\
&= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi\rho_2}{k}} e^{j(k_x \rho_2 / 2k)} F(t_1', t_2')
\end{aligned} \quad (2-78)$$

โดยให้

$$F(t_1', t_2') = [C(t_2) - C(t_1)] - j[S(t_2) - S(t_1)]s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$$

$$S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right) dt$$

โดยที่ $C(x)$ และ $S(x)$ เป็นที่รู้จักกันในรูปแบบโคไซน์และไซน์เฟรสเนลอินทิกรอล

$$I_2'' = \frac{1}{2} \int_{-a/2}^{a/2} e^{jx\left(-\frac{\pi}{a} - \frac{k}{2\rho_2} + kx'\right)} dx' \quad (2-79)$$

กำหนดให้

$$k'_x = k_x - \frac{\pi}{a}$$

จะได้

$$\begin{aligned} I_2'' &= \frac{1}{2} \int_{-a/2}^{a/2} e^{-j\left(\frac{k'_x}{2\rho_2} - k'_x k'_x\right)} dx' \\ &= \frac{1}{2} e^{j(k'_x \rho_2 / 2k)} \int_{-a/2}^{a/2} e^{-j(kx' - k'_x \rho_2)^2 / 2k\rho_2} dx' \end{aligned} \quad (2-80)$$

เปลี่ยนตัวแปรโดยให้

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{\pi}{2}} t &= \sqrt{\frac{1}{2k\rho_2}} (kx' - k'_x \rho_2) \\ t &= \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_2}} (kx' - k'_x \rho_2) \\ x' = -\frac{a}{2} &\Rightarrow t_1'' = \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_2}} \left(-\frac{ka_1}{2} - k'_x \rho_2\right) \\ x' = +\frac{a}{2} &\Rightarrow t_2'' = \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_2}} \left(+\frac{ka_1}{2} - k'_x \rho_2\right) \end{aligned}$$

จะได้

$$\begin{aligned} I_2'' &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi\rho_2}{k}} e^{j(k'_x \rho_2 / 2k)} \int_{t_1''}^{t_2''} e^{-j\frac{\pi}{2}t^2} dt \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi\rho_2}{k}} e^{j(k'_x \rho_2 / 2k)} F(t_1'', t_2'') \end{aligned} \quad (2-81)$$

จาก

$$I_1 = I_2' + I_2'' \quad (2-82)$$

$$I_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi\rho_2}{k}} \left(e^{j(k_x^2 \rho_2 / 2k)} F(t_1', t_2') + e^{j(k'_x \rho_2 / 2k)} F(t_1'', t_2'') \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \rho_2}{k}} \left[e^{j(k_x^2 \rho_2 / 2k)} \{C(t_2') - C(t_1')\} - j \{S(t_2') - S(t_1')\} \right] \\ + e^{-j(k_x^2 \rho_2 / 2k)} \{S(t_2'') - S(t_1'')\} - j \{C(t_2'') - C(t_1'')\} \quad (2-83)$$

$$I_2 = \int_{-a/2}^{+a/2} e^{-jk(y^2/2\rho_1 - y' \sin\theta \sin\theta_s)} dx \quad (2-84)$$

กำหนดให้

$$k_y = k \sin\theta \sin\theta$$

จะได้

$$I_2 = \int_{-b_1/2}^{+b_1/2} e^{-j(ky^2/2\rho_1 - k_y y')} dy' \\ = e^{j(k_y^2 \rho_1 / 2k)} \int_{-b_1/2}^{+b_1/2} e^{-j(ky' - k_y \rho_1)^2 / 2k\rho_1} dy' \quad (2-85)$$

เปลี่ยนตัวแปรโดย

$$\sqrt{\frac{\pi}{2}} t = \sqrt{\frac{1}{2k\rho_1}} (ky' - k_y \rho_1) \\ t = \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_1}} (ky' - k_y \rho_1) \\ y' = -\frac{b_1}{2} \Rightarrow t_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_1}} \left(-\frac{kb}{2} - k_y \rho_1 \right) \\ y' = +\frac{b_1}{2} \Rightarrow t_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_1}} \left(+\frac{kb}{2} - k_y \rho_1 \right)$$

จะได้

$$I_2 = \sqrt{\frac{\pi \rho_1}{k}} e^{j(k_y^2 \rho_1 / 2k)} \int_{t_1}^{t_2} e^{-j\left(\frac{\pi}{2}\right)t^2} dt \\ = \sqrt{\frac{\pi \rho_1}{k}} e^{j(k_y^2 \rho_1 / 2k)} F(t_1, t_2) \\ = \sqrt{\frac{\pi \rho_1}{k}} e^{j(k_y^2 \rho_1 / 2k)} [\{C(t_2) - C(t_1)\} - j \{S(t_2) - S(t_1)\}] \quad (2-86)$$

จะได้ส่วนประกอบสนามระยะไกลเป็น

$$E_r = 0 \quad (2-87)$$

$$E_\theta = -j \frac{ke^{jkr}}{4\pi\pi} (L_\phi + \eta N_\theta) \\ = -j \frac{ke^{jkr}}{4\pi\pi} [\sin\phi(1 + \cos\theta)I_1 I_2] \quad (2-88)$$

$$E_\phi = +j \frac{ke^{jkr}}{4\pi\pi} (L_\phi - \eta N_\theta)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= +j \frac{ke^{jkr}}{4\pi r} [\cos\phi(1 + \cos\theta)I_1 I_2] \quad (2-89)$$

การสร้างสายอากาศปากแตรทรงพีรามิด มิติ ρ_E หาได้จาก

$$\rho_E = (b_1 - b) \left[\left(\frac{\rho_E}{b_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (2-90)$$

ซึ่งควรจะเท่ากับมิติของ ρ_E ซึ่งหาได้จาก

$$\rho_H = (a_1 - a) \left[\left(\frac{\rho_H}{a_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (2-91)$$

อัตราความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Directivity)

ค่าอัตราความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นมีความสำคัญต่อการออกแบบสายอากาศพีรามิดมาก

ค่าการกระจายสูงสุดจะอยู่ที่ใกล้แนวแกน Z ($\theta = 0$) ซึ่งจะได้

$$U_{\max} = U(\theta, \phi)|_{\max} = \frac{r^2}{2\eta} |E|_{\max}^2 \quad (2-92)$$

สำหรับสายอากาศปากแตร $|E|_{\max}$ จะอยู่ตามแกน Z ($\theta = 0$) ดังนั้น

$$|E|_{\max} = \sqrt{|E_\theta|_{\max}^2 + |E_\phi|_{\max}^2} \quad (2-93)$$

$$|E_\theta|_{\max} = |E_0 \sin\phi| \frac{\sqrt{\rho_1 \rho_2}}{4r} \left[\{C(t_2') + C(t_2'') - C(t_1') - C(t_1'')\} - j\{S(t_2') + S(t_2'') - S(t_1') - S(t_1'')\} \right]^2 \times \{C(t_2) - C(t_1)\} - j\{S(t_2) - S(t_1)\}$$

$$t_1' = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}} \left(-\frac{ka_1}{2} - \frac{\pi}{a_1} \rho_2 \right) \quad (2-94)$$

$$t_2' = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}} \left(+\frac{ka_1}{2} - \frac{\pi}{a_1} \rho_2 \right) \quad (2-95)$$

$$t_1'' = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}} \left(-\frac{ka_1}{2} - \frac{\pi}{a_1} \rho_2 \right) = -t_2' = v \quad (2-96)$$

$$t_2'' = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}} \left(+\frac{ka_1}{2} - \frac{\pi}{a_1} \rho_2 \right) = -t_1' = u \quad (2-97)$$

เมื่อ $\theta = 0$ จะได้

$$k_x = k_y = 0$$

$$t_1 = -t = -\frac{b_1}{2} \sqrt{\frac{k}{\pi \rho_1}} = -\frac{b_1}{\sqrt{2\lambda \lambda_1}}$$

$$t_2 = +t = +\frac{b_1}{2} \sqrt{\frac{k}{\pi \rho_1}} = +\frac{b_1}{\sqrt{2\lambda \lambda_1}}$$

โดยที่

$$C(-x) = -C(x)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S(-x) = -S(x)$$

$$|E_\theta|_{\max} = |E_0 \sin\phi| \frac{\sqrt{\rho_1 \rho_2}}{r} \left[\{C(u) - C(v)\}^2 + \{S(u) - S(v)\}^2 \right]^{1/2} \\ \times \left\{ C^2 \left(\frac{b_1}{\sqrt{2\lambda\lambda_1}} \right) + S^2 \left(\frac{b_1}{\sqrt{2\lambda\lambda_1}} \right) \right\}^{1/2} \\ u = t_2'' = -t_1' = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}} \left(+\frac{ka_1}{2} + \frac{\pi}{a_1} \rho_2 \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{\lambda \rho_2}}{a_1} + \frac{a_1}{\sqrt{\lambda \rho_2}} \right) \\ v = t_1'' = -t_2' = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}} \left(-\frac{ka_1}{2} + \frac{\pi}{a_1} \rho_2 \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{\lambda \rho_2}}{a_1} - \frac{a_1}{\sqrt{\lambda \rho_2}} \right)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$|E_\theta|_{\max} = |E_0 \cos\phi| \frac{\sqrt{\rho_1 \rho_2}}{r} \left[\{C(u) - C(v)\}^2 + \{S(u) - S(v)\}^2 \right]^{1/2} \\ \times \left\{ C^2 \left(\frac{b_1}{\sqrt{2\lambda\lambda_1}} \right) + S^2 \left(\frac{b_1}{\sqrt{2\lambda\lambda_1}} \right) \right\}^{1/2} \quad (2-98)$$

$$U_{\max} = \frac{r^2}{2\eta} |E_{\max}|^2 = |E_0|^2 \frac{\rho_1 \rho_2}{2\eta} \left[\{C(u) - C(v)\}^2 + \{S(u) - S(v)\}^2 \right] \\ \times \left\{ C^2 \left(\frac{b_1}{\sqrt{2\lambda\lambda_1}} \right) + S^2 \left(\frac{b_1}{\sqrt{2\lambda\lambda_1}} \right) \right\}^{1/2} \quad (2-99)$$

$$P_{\text{rad}} = \frac{1}{2} \iint_{S_a} \text{Re}(\mathbf{E}' \times \mathbf{H}') \cdot d\mathbf{s} \\ = \frac{1}{2\eta} \int_{-b_1/2 - a_1/2}^{+b_1/2 + a_1/2} \int_{-b_1/2 - a_1/2}^{+b_1/2 + a_1/2} |E_0|^2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{a} x' \right) dx' dy' \quad (2-100)$$

สามารถเขียนได้เป็น

$$P_{\text{rad}} = |E_0|^2 \frac{a_1 b_1}{4\eta} \quad (2-101)$$

อัตราความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของ พีรามิดฮอร์น (Pyramid Horn) จะเป็น

$$D_p = \frac{4\pi\pi_{\max}}{P_{\text{rad}}} = \frac{8\pi\pi_1 \rho_2}{a_1 b_1} \times \left[\{C(u) - C(v)\}^2 + \{S(u) - S(v)\}^2 \right] \\ \times \left\{ C^2 \left(\frac{b_1}{\sqrt{2\lambda\lambda_1}} \right) + S^2 \left(\frac{b_1}{\sqrt{2\lambda\lambda_1}} \right) \right\}^{1/2} \quad (2-102)$$

ค่าอัตราความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (db) ของ Pyramid Horn สามารถประมาณได้โดย

$$D_p \text{ (db)} = 10 \left[1.008 + \log \left(\frac{a_1 b_1}{\lambda^2} \right) \right] - (L_e + L_h) \quad (2-103)$$

เนื่องจาก L_e และ L_h เป็นการสูญเสีย (db) เนื่องจากเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ท่อนำคลื่น (Waveguide)

2.4.1 ทฤษฎีท่อนำคลื่น

ถ้าเรานำแผ่นตัวนำ 2 แผ่น มาทึบขวางบังคับให้คลื่นเดินทางอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองซึ่งคลื่นที่เคลื่อนที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำนี้เรียกว่า คลื่นระนาบ (Plane wave) คลื่นระนาบซึ่งมีลักษณะเคลื่อนที่โดยมีสนามไฟฟ้า (E) และสนามแม่เหล็ก (H) ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น และมีหน้าคลื่น เป็นระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กระหว่างแผ่นตัวนำที่เกิดขึ้นมาจากประจุกระจายอยู่ตามผิวตัวนำ และกระแสที่ไหลผ่านพื้นผิวตัวนำเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะตั้งฉากกับผิวตัวนำโดยเริ่มจากประจุที่ผิวตัวนำด้านหนึ่งไปทอมินตรงหรือสิ้นสุดที่ประจุบนผิวตัวนำอีกด้านหรือที่เหลือส่วนสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสที่ไหลผ่านผิวตัวนำจะมีเวกเตอร์ของสนามขนานไปกับผิวตัวนำการคดสนามทั้งสองในลักษณะเช่นนี้จะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบสามารถแผ่กระจายไประหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองได้กลุ่มตัวประจุไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปตามผิวตัวนำนี้และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะตามเงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อ

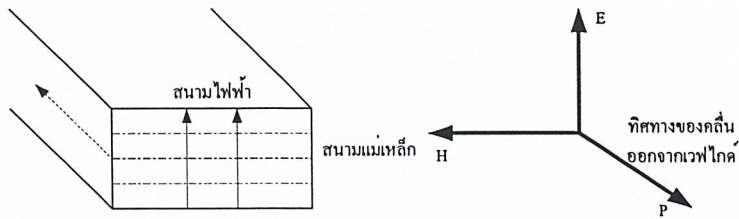
ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างของท่อนำคลื่นมาตรฐานตาม JIS

JIS	Frequency Range (GHz)	Inner Dimension	Outer Dimension
WRT-2.6	2.2-3.3	86.4 × 43.2 mm	90.4 × 47.2 mm
WRT-3	2.6-3.95	72.1 × 34.0 mm	76.0 × 38.0 mm
WRT-5	3.95-5.85	47.6 × 22.2 mm	50.8 × 25.4 mm
WRT-6	4.90-7.05	40.0 × 20.0 mm	43.2 × 23.2 mm
WRT-9	7.09-10.00	28.5 × 12.6 mm	31.7 × 15.8 mm
WRT-10	8.20-12.40	22.9 × 10.2 mm	25.4 × 12.7 mm

2.4.2 การแพร่กระจายของท่อนำคลื่น ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ถ้าทำการปิดด้านข้างทั้งสองด้านเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งจะเกิดคุณลักษณะเฉพาะของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่ประกอบกันเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอยู่ภายในท่อนำคลื่น มีจุดความเข้มสูงสุดอยู่ที่กึ่งกลางของด้านยาวของท่อนำคลื่นและมีความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่ผนังด้านข้างหรือด้านกว้างของท่อนำคลื่น (สนามไฟฟ้าที่ขนานกับพื้นผิวตัวนำจะมีค่าความเข้มเป็นศูนย์) สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นจะต่อเนื่องกันและวนไปรอบท่อนำคลื่นโดยที่เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กจะไม่ตั้งฉากกับผนังแผ่นตัวนำด้านใดเลย สนามแม่เหล็กจะวนต่อกันเป็นวงรอบ (Complete Loop) และขนานไปกับผนังแผ่นตัวนำทุก ๆ ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

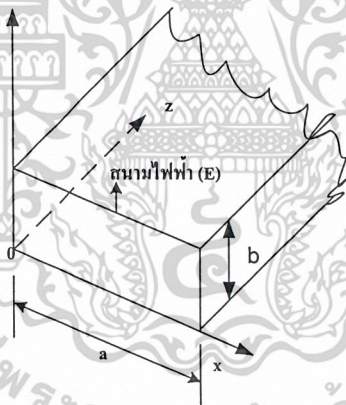


รูปที่ 2.16 สนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็กภายในท่อนำคลื่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า

2.4.3 การเรียกชื่อ โหมดต่าง ๆ ของ ท่อนำคลื่น

2.4.3.1 TE_{01} สำหรับ ทรานเวอร์ส อิเล็กตริก โหมด (Transverse Electric Modes) เช่น สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับแนวด้านข้างของท่อนำคลื่น

2.4.3.2 TM_{01} สำหรับ ทรานเวอร์ส แมกเนตริก โหมด (Transverse Magnetic Modes) เช่น การไม่มีส่วนของสนามแม่เหล็กตลอดแนวแกนของการแผ่กระจายคลื่นของ ท่อนำคลื่น ในแต่ละกรณีค่า m และ n จะเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม ซึ่งแสดงถึงจำนวนของ ความยาวครึ่งคลื่น (Half-Wave Length) ของความเข้มระหว่างผนังของท่อนำคลื่น แต่ละคู่ค่า m ถูกวัดตลอดแนวแกน x ของท่อนำคลื่น (เสมือนเป็นด้าน a) ขณะที่ ค่า n จะถูกวัดตลอดแนวแกน y ของ Waveguide (เสมือนเป็นด้าน b)



รูปที่ 2.17 ขนาดด้านกว้าง (a) และด้านสูง (b)

2.4.4 ความถี่คัตออฟ (Cutoff Frequency) หาได้จาก

$$f_{\text{cutoff}} = \frac{3 \times 10^{10}}{2\sqrt{\mu' \epsilon'}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2-104)$$

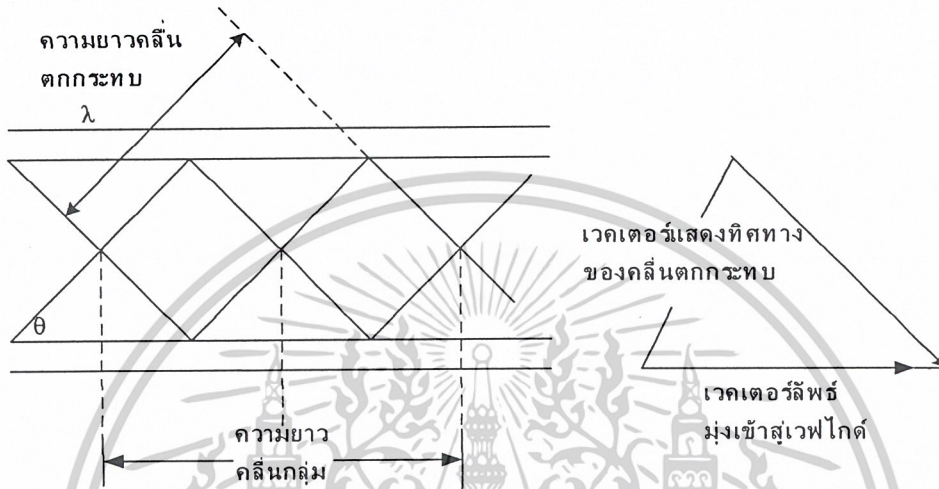
เมื่อ	f_{cutoff}	ความถี่คัตออฟสำหรับ ท่อนำคลื่น (เฮิร์ต)
	m	จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านกว้างของท่อนำคลื่น
	n	จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านแคบของ ท่อนำคลื่น
	a	ด้านกว้างของท่อนำคลื่น (ซม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- b ด้านแคบของท่อนำคลื่น (ซม.)
 μ' ค่าเพอมีอะบิลิตีที่สัมพัทธ์ของตัวกลางในท่อนำคลื่น
 ε' ค่าเพอมิตติวิตีที่สัมพัทธ์ของตัวกลางในท่อนำคลื่น

2.4.5 ความถี่และความยาวคลื่นคัตออฟ ในท่อนำคลื่น

ความสัมพันธ์ทางความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบ (Incident Wave) คลื่นสะท้อน (Reflected) และคลื่นกลุ่ม (Group Wave) ภายใน Waveguide ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกลุ่มและความยาวคลื่นกระทบ

เพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนเกิดขึ้นทุกระยะหนึ่งความยาวคลื่นในดันท่างของท่อนำคลื่นที่ความถี่ของคลื่นค่าหนึ่งและความกว้างของ ท่อนำคลื่น ค่าหนึ่งต้องมีมุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่เหมาะสม จึงจะทำให้สนามไฟฟ้าผนังด้านข้างของ ท่อนำคลื่นเป็นศูนย์

ความยาวคลื่นที่ยาวที่สุด (Longest Wavelength) ที่สามารถเดินทางไปในท่อนำคลื่น และยังคงให้ค่าสนามไฟฟ้าไฟฟ้า ที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นเป็นศูนย์ มีค่าเท่ากับสองเท่าของด้านกว้าง a ของท่อนำคลื่นซึ่งที่ค่าความยาวคลื่นนี้จะมีมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเป็น 90° องศา จะทำให้เกิดคลื่นนิ่งจึงไม่มีการแผ่กระจายไปตามท่อนำคลื่น ค่าความยาวคลื่นและความถี่ที่จุดวิกฤตนี้ เรียกว่า ความยาวคลื่นคัตออฟหาได้จาก

$$\lambda_{\text{cutoff}} = 2a \quad (2-105)$$

หรือ

$$\lambda_{\text{cutoff}} = \frac{C}{f_{\text{cutoff}}} \quad (2-106)$$

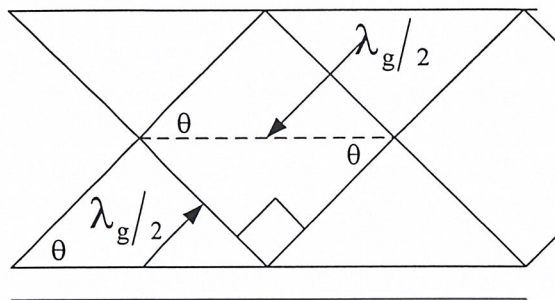
หรือ

$$\lambda_{\text{cutoff}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (2-107)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.6 ความยาวคลื่นกลุ่มภายในท่อนำคลื่น

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น λ และความยาวคลื่นกลุ่ม λ_g แสดงไว้ในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของ λ กับ λ_g

$$\sin\theta = \frac{\lambda/2}{\lambda_g/2}$$

$$\lambda_g (\text{m}) = \frac{\lambda}{\sin\theta}$$

$$\lambda_g (\text{m}) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}$$

ความยาวคลื่นกลุ่มจะแปรค่าได้ตั้งแต่ความยาวเป็นอนันต์ ที่ความยาวคลื่นตัดออฟมาจนถึงความยาวคลื่นตกกระทบที่ความยาวคลื่นสั้นมาก ๆ และเพราะว่า ความยาวคลื่นตัดออฟเท่ากับ $2a$

$$\lambda_g (\text{m}) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (f_{\text{cutoff}}/f)^2}} \quad (2-108)$$

ความเร็วของแสง, ความเร็วและความเร็วเฟส มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$C = \sqrt{V_g V_p} \quad (2-109)$$

โดยที่ C ความเร็วแสง (m/s)

V_g ความเร็วกลุ่ม

V_p ความเร็วเฟส

2.4.7 ความต้านทานของท่อนำคลื่น (Waveguide Impedance)

คำว่าคาแรกเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์ (Characteristic Wave Impedance) จะใช้เรียกค่าอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสายแบบคู่ขนาน และสายโคแอกเซียลแต่สำหรับท่อนำคลื่นแล้วจะใช้คำว่าคาแรกเตอร์ิสติกเวฟอิมพีแดนซ์แทน และขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

$$Z = \frac{E}{H}$$

คาแรกเตอร์ิสติกเวฟอิมพีแดนซ์ของโหมด TE หาได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{TE} = \frac{377}{1 - (\lambda/\lambda_{\text{cutoff}})^2} \quad (2-110)$$

โดยที่

Z_{TE} เวฟอิมพีแดนซ์ของโหมด TE (Ω)

377 คาเรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์ของช่องว่าง Free Space (Ω)

λ ความยาวคลื่นใช้งาน

λ_{cutoff} ความยาวคลื่นคัตออฟของท่อนำคลื่น

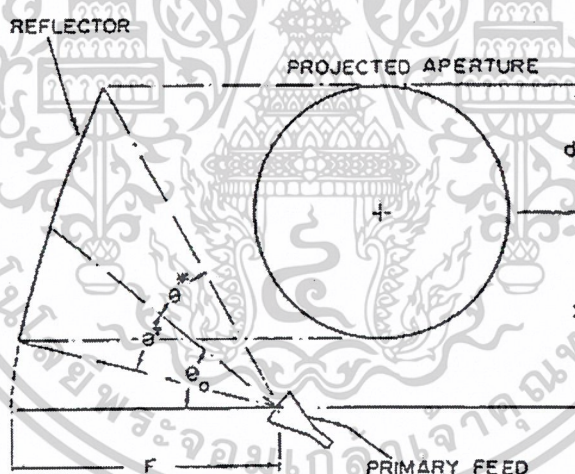
คาเรคเตอร์ิสติกเวฟอิมพีแดนซ์ของโหมด Tivi หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Z_{TM} = 377\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{cutoff}})^2} \quad (2-111)$$

ตัวแปรต่าง ๆ จะเหมือนกันกับโหมด TE แค่งที่ 377 ในสมการเป็นค่าอินทรินซิกอิมพีแดนซ์ของช่องว่าง (Free Space) ซึ่งเท่ากับ 377 (Ω)

2.5 ทฤษฎีสายอากาศพาราโบลิก

2.5.1 สายอากาศแบบออฟเซตพาราโบลิก



รูปที่ 2.20 สายอากาศแบบออฟเซตพาราโบลิก

สายอากาศแบบนี้ตัวงานสะท้อนคลื่นจะเป็นส่วนหนึ่งของพาราโบลิก และตัวพีดขั้นต้น (Primary Feed) จะวางอยู่บริเวณจุดโฟกัสของพาราโบลิกลักษณะเฉพาะของสายอากาศแบบนี้คือตัวพีดข้างต้นจะไม่อยู่ตรงกลางของตัวงานสะท้อน

พีดฮอร์นที่ใช้กับงานรับสัญญาณแบบออฟเซตโฟกัสจะมีปากหรือช่องของพีดฮอร์นที่แตกต่างจากพีดฮอร์นที่ใช้กับงานรับสัญญาณแบบเซ็นเตอร์โฟกัสโดยช่องของพีดฮอร์นข้างบนจะบานออกเพื่อลดความกว้างของลำคลื่นให้เล็กลง (เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดของงานพาราโบลิก) และหากนำเอาพีดฮอร์นแบบธรรมดามาใช้ ก็จะทำให้มีการขยายสัญญาณบริเวณภาคพื้นดินเข้าไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 รูปทรงเรขาคณิตของสายอากาศแบบออฟเซตพาราโบลิก

จากรูปเป็นการแสดงรูปร่างทางเรขาคณิตของสายอากาศแบบออฟเซตพาราโบลิกจะมีค่าคงตัวสะท้อนต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของพาราโบลิก และจะเปลี่ยนคลื่นทรงกลมจากฟีดเป็นคลื่นระนาบที่โปรเจกอะเพเจอร์ (Project Aperture) เรายังคงวางฟีดบริเวณจุดโฟกัสของจานสะท้อนคลื่น แต่จะหันฟีดเข้าสู่กึ่งกลางของจานออฟเซต เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการสปิลโอเวอร์ (Spill Over)

ซึ่งจากการคำนวณ ทางคณิตศาสตร์ เราจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{F}{D} = \frac{\cos\theta_0 + \cos\theta^*}{4\sin\theta^*} \quad (2-112)$$

โดยที่ θ^* เรียกว่า มุมเซมิ (Semi Angle)
 θ_0 เรียกว่า มุมออฟเซต (Offset Angle)

2.5.3 อัตราการขยายของจานรับสัญญาณ

สายอากาศที่มีรูปร่างคล้ายจานจะมีค่าแสดงอัตราต่าง ๆ เหมือนกับสายอากาศแบบอื่นเช่นกัน สิ่งหนึ่งที่จะกล่าวถึงคืออัตราการขยาย หรือที่เรียกว่าเกน (Gain)

อัตราการขยายของสายอากาศก็คือ การวัดความสามารถของสายอากาศที่รับหรือส่งพลังงานออกไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง สิ่งที่จะกล่าวต่อไปมีผลต่ออัตราการขยายของจานรับสัญญาณซึ่งถือว่าเป็นสายอากาศทั้งสิ้น ได้แก่

1. พื้นที่หน้าตัดของจานรับสัญญาณ
2. ขนาดของรีเฟล็กเตอร์ย่อย (Sub-Reflector)
3. ผิวของจานรับสัญญาณ
4. รีเฟล็กเตอร์ย่อยไม่อยู่ในตำแหน่งโฟกัสที่ดีที่สุด
5. ความโค้งของผิวจานที่ไม่เป็นไปตามลักษณะพาราโบลิก

หากเกิดสิ่งสิ่งผิดปกติหรือข้อผิดพลาดจากปัจจัยทั้งห้านี้จะเป็นสาเหตุทำให้อัตราขยายลดลง โดยจานรับสัญญาณแบบพาราโบลิก จะมีค่าสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพ (η) กำหนดเอาไว้เช่นเดียวกับสายอากาศแบบอื่นเช่นกัน ซึ่งค่า η ของสายอากาศแบบพาราโบลิกจะมีประมาณ 60-75 % ในการออกแบบจานรับสัญญาณแบบพาราโบลิกนั้น ผู้ออกแบบสามารถคำนวณอัตราการขยายกำลังของจานรับสัญญาณแบบนี้ โดยใช้สูตร

$$G = 10\log\left[\eta_0\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2\right] \quad (2-113)$$

เมื่อ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของจานรับสัญญาณ
 λ เป็นความยาวคลื่น
 η เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนโค้งของจานรับสัญญาณจะทำหน้าที่คล้ายกับเลนส์ คือ ทำการบีบสัญญาณให้แคบลงแล้วพุ่งตรงไปยังด้านหน้า และตรงกับจุดศูนย์กลางของสายอากาศ (ลักษณะนี้เรียก โบเรสไซต์(Boresight)) จะทำให้สัญญาณที่ได้รับได้มีความแรงมากที่สุด ขณะเดียวกันก็จะมีการกำจัดสัญญาณอื่น ๆ (อาจเป็นสัญญาณรบกวน) ที่มาจากทิศทางอื่นออกไปด้วย ปริมาณของสัญญาณที่ถูกส่งจากจานออกไปนั้นจะเป็นจุดที่รับ แอลเอ็นบี (LNB) ได้ดีที่สุด

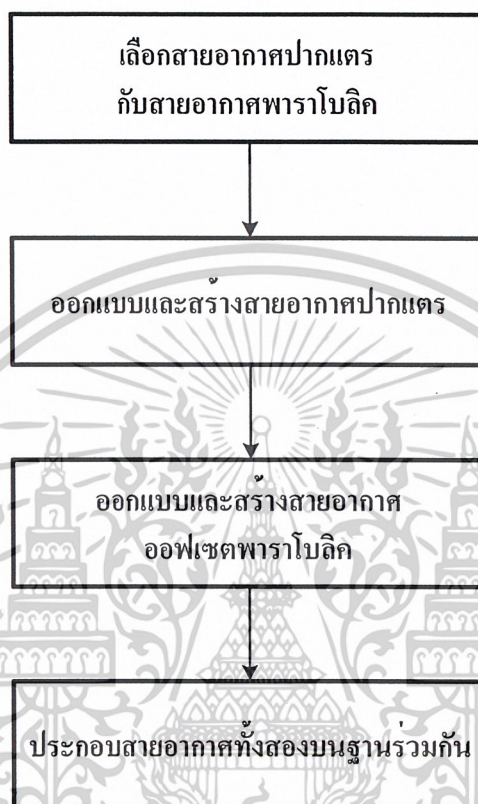


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้าง

3.1 ขั้นตอนการทำงาน



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงาน

3.2 การออกแบบสายอากาศ

3.2.1 การออกแบบสายอากาศปากแตร

สำหรับ สายอากาศปากแตรแบบเรคแทนกูลาร์ (Rectangular Horn Antenna) จะมีรูปแบบของระนาบไฟฟ้า (E-Plan Pattern) ของ เซกเตอร์รอลฮอร์น (Sectoral Horn) จะเหมือนกับ ระนาบของสนามไฟฟ้าของพีรามิดฮอร์น

ช่วงความถี่ (Frequency Range) (GHz)

$$f_{\text{low}} = 9.6$$

$$f_{\text{high}} = 10$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงความถี่ที่ออกแบบ (Design Frequency) (GHz)

$$f = 9.60$$

อัตราขยายของฮอร์น (Horn Gain) (dB)

$$f = 19.0$$

ความกว้างของท่อนำคลื่น (Waveguide Dimensions) (cm):

$$a = 2.3$$

$$b = 1$$

ความยาวคลื่น (Wavelength):

$$\lambda = \frac{30}{f}$$

$$\lambda = 3.125$$

$$G_p = 10^{(0.1 \cdot G_0)}$$

$$G_{dB} = G_0$$

$$G_p = 79.433$$

$$X1 = \frac{G_p}{\sqrt{8 \cdot \pi^3}}$$

ให้

$$\left(\sqrt{2 \cdot X1} - \frac{b}{\lambda} \right)^2 \cdot (2 \cdot X1 - 1) = \left(\frac{G_p}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{3}{2 \cdot \pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{X1}} - \frac{a}{\lambda} \right)^2 \cdot \left[\left(\frac{G_p^2}{6 \cdot \pi^3} \right) \cdot \frac{1}{X1} - 1 \right]$$

$$X = \text{Find}(X1)$$

$$X = 4.764$$

$$\rho_e = \lambda \cdot X$$

$$\rho_h = \lambda \cdot \frac{G_p^2}{8 \cdot \pi^3 \cdot X}$$

$$B = \lambda \cdot \sqrt{2 \cdot X}$$

$$A = \lambda \cdot \frac{G_p}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{3}{2 \cdot \pi \cdot X}}$$

$$\rho_e = (B - b) \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_e}{B} \right)^2 - \frac{1}{4}}$$

$$\rho_h = (A - a) \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_h}{A} \right)^2 - \frac{1}{4}}$$

$$\alpha_h = \text{atan} \left(\frac{A - a}{2 \cdot \rho_h} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_e = \text{atan}\left(\frac{B-b}{2\rho_e}\right)$$

$$C(X) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t^2\right) dt$$

$$S(X) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot t^2\right) dt$$

$$G_E(b\lambda) = \frac{3200}{\pi} \cdot \frac{1}{b\lambda} \left[C\left(\frac{b\lambda}{10}\right)^2 + S\left(\frac{b\lambda}{10}\right)^2 \right]$$

$$u(a\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{\sqrt{50}}{a\lambda} + \frac{a\lambda}{\sqrt{50}} \right]$$

$$v(a\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{\sqrt{50}}{a\lambda} - \frac{a\lambda}{\sqrt{50}} \right]$$

$$G_H(a\lambda) = 200 \cdot \pi \cdot \frac{1}{a\lambda} \left[(C(u(a\lambda)) - C(v(a\lambda)))^2 + (S(u(a\lambda)) - S(v(a\lambda)))^2 \right]$$

$$\lambda\lambda(f) = \frac{30}{f}$$

$$\rho_{le} = B \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_e}{B-b}\right)^2 + \frac{1}{4}}$$

$$\rho_{lh} = \frac{A}{A-a} \sqrt{\left[\rho_e^2 - \left(\frac{B}{2}\right)^2 \left(1 - \frac{b}{B}\right)^2 + \left(\frac{A-a}{2}\right)^2\right]}$$

$$a'(f) = \frac{A}{\lambda\lambda(f)} \cdot \frac{\sqrt{50 \cdot \lambda_0(f)}}{\rho_{lh}}$$

$$b' = \frac{B}{\lambda\lambda(f)} \cdot \frac{\sqrt{50 \cdot \lambda_0(f)}}{\rho_{le}}$$

$$GE(f) = \text{if}\left(b'(f) < 2, \frac{32}{\pi} \cdot b'(f), G_E(b'(f))\right)$$

$$GH = \text{if}\left(a'(f) < 2, \frac{32}{\pi} \cdot a'(f), G_H(a'(f))\right)$$

$$G_{2p} = \frac{GE(f) \cdot GH(f)}{\frac{32}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{50 \cdot \lambda_0(f)}}{\rho_{le}} \cdot \frac{\sqrt{50 \cdot \lambda_0(f)}}{\rho_{le}}}$$

$$G_{dB} = 10 \log(G_{2p}(f))$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลเฉลยของการออกแบบ (Results of the design):

ความถี่ (Frequency) (GHz)

$$f = 9.6$$

$$\lambda = 3.125$$

ความกว้างของท่อนำคลื่น (Waveguide Dimensions) (cm)

$$a = 2.3$$

$$b = 1$$

อะพอร์เจอร์ (Aperture) (cm)

$$A = 12.507$$

$$B = 9.646$$

ความยาวเอียง (Slant Length) (cm)

$$\rho_e = 14.888$$

$$\rho_h = 16.685$$

ความยาวแกน (Axial Length) (cm)

$$\rho_e = 12.624$$

$$\rho_h = 12.624$$

มุมเอียง (Slant Angle)

$$\alpha_h = 22.011^\circ$$

$$\alpha_e = 18.903^\circ$$

อัตราขยาย (Gain)

$$G_{dB}(9.0) = 18.7$$

$$G_{dB}(9.6) = 19.023$$

$$G_{dB}(10) = 19.211$$

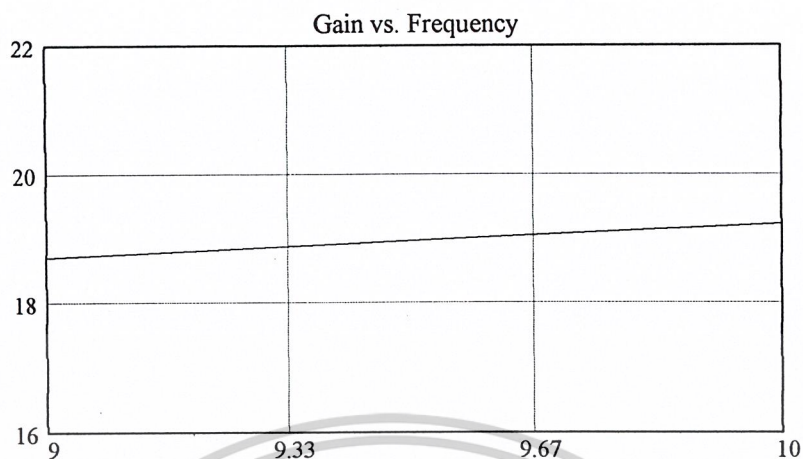
HPBW ของสายอากาศปากแตร

$$E - \text{plan} \quad \text{HPBW} = \frac{56a_E}{\lambda} = \frac{56 \times 12.507}{30} = 23.346^\circ$$

$$H - \text{plan} \quad \text{HPBW} = \frac{67a_H}{\lambda} = \frac{67 \times 9.646}{30} = 21.543^\circ$$

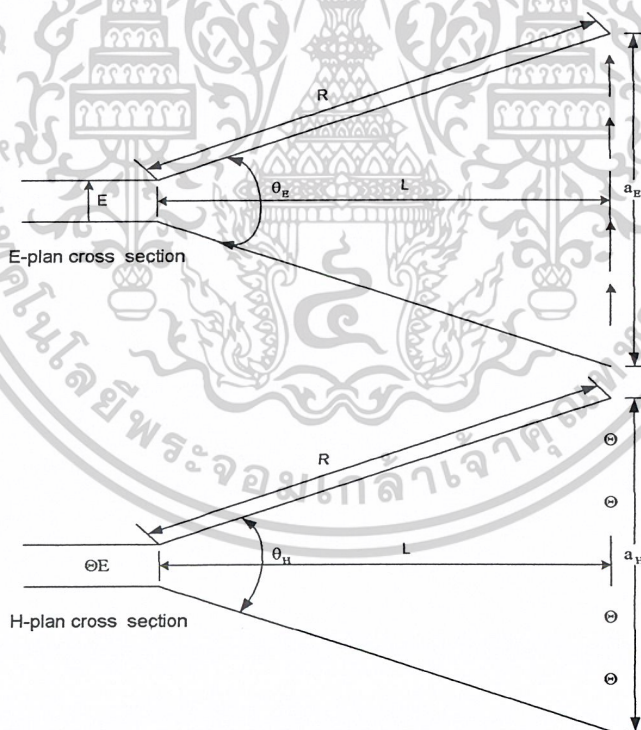
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_r := f_{low}, f_{low} + 0.1 .. f_{hi}$$



รูปที่ 3.2 อัตราขยายความถี่

และนำค่าที่ได้มาสร้างตามรูปด้านล่าง

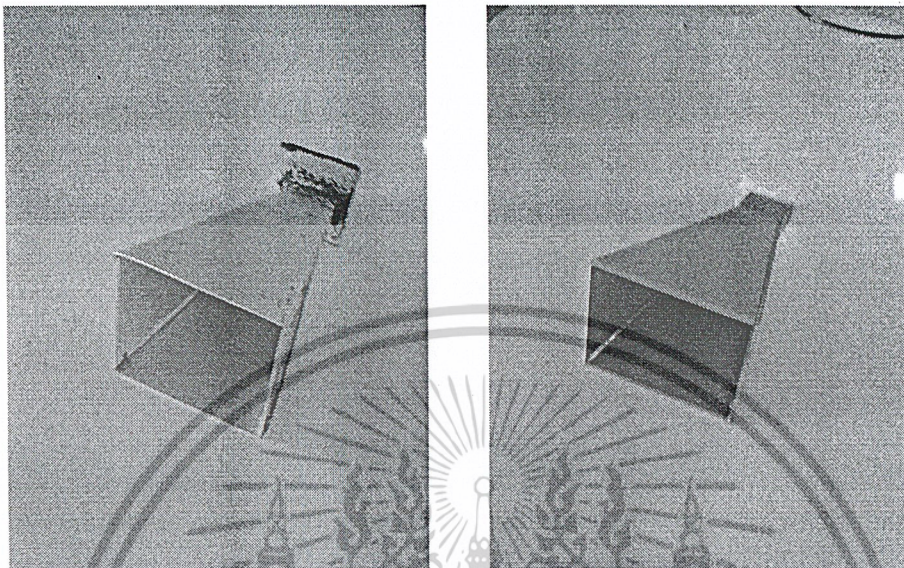


รูปที่ 3.3 รูปแบบของปากแตรที่นำมาใช้แทนค่าจากที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การสร้างสายอากาศปากแตร มีขั้นตอนดังนี้

1. แผ่นอลูมิเนียมและแผ่นทองแดงมาตัดและตัดให้ได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้
2. นำแผ่นอลูมิเนียมและแผ่นทองแดงมาประกอบและเชื่อมให้ติดกันดังรูป
3. ทำการเจาะรูสำหรับใส่เนื้อขี้ควินบริเวณส่วนที่ต่อกับท่อนำคลื่น

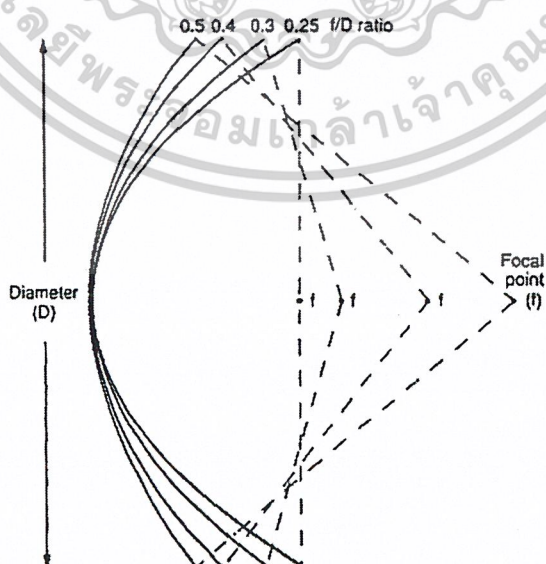


รูปที่ 3.4 สายอากาศปากแตรที่สร้างมาจากอลูมิเนียมและแผ่นทองแดงตามลำดับ

3.3 การออกแบบสายอากาศพาราโบลิก

3.3.1 การเลือกค่าอัตราส่วน จุดศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (F/D) ที่เหมาะสม

โดยมีตั้งแต่ค่า 0.25 จนถึงค่า 0.5 โดยที่ค่าที่มากจะหมายถึงความถึงงานแบบลึก งานแบบลึกนี้จะมีสัญญาณรบกวนจากภาคพื้นดินต่ำกว่าแบบตื้นแต่จะเกิดการสูญเสียของสัญญาณที่รับได้มากกว่าแบบตื้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์
รูปที่ 3.5 ระยะ โฟกัสสำหรับค่าจุดศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ต่างๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การกำหนดช่วงความถี่ใช้งาน

จานสายอากาศแบบ ออฟเซทพาราโบลิก (Offset Parabolic) จะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าจานสายอากาศแบบเซนเตอร์โฟกัส (Center focus) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่าๆกันที่ความถี่สูง ๆ เพราะว่าจะไม่มีก้านของฟีดและตัวฟีดมาบังเส้นทางการเดินของคลื่น เราจะออกแบบให้ใช้งานกับย่านความถี่ที่ 9.6 GHz

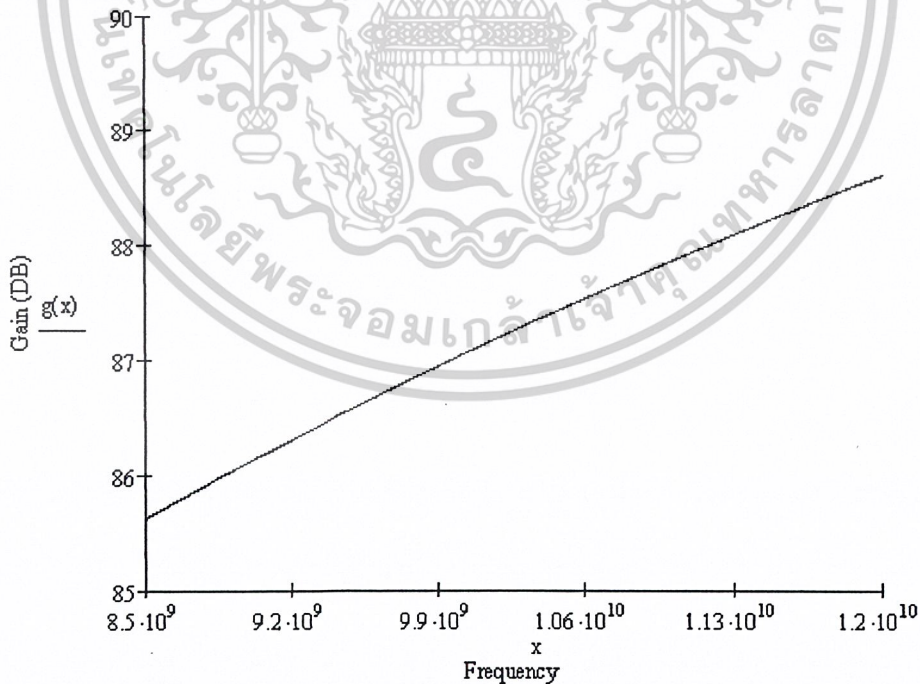
3.3.3 การคำนวณหาค่าอัตราขยาย

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศแบบ ออฟเซทพาราโบลิก (สามารถคำนวณหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมได้จากสมการ

$$G = 10 \log \left[\eta \left(\frac{\pi D f}{c} \right)^2 \right] \text{ (dB)} \quad (3-1)$$

โดยที่	G	ค่าอัตราขยายของสายอากาศ
	D	เส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศ
	f	ความถี่ที่ใช้งาน
	η	ค่าสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพ
	c	ความเร็วแสงมีค่า 3×10^8 เมตร/วินาที

ซึ่งความถี่ที่เราจะใช้ทดสอบคือ 9.6 GHz โดยที่สายอากาศแบบ ออฟเซทพาราโบลิก (Offset Parabolic) จะมีค่า $\eta_{\max} \approx 0.8$ และเราใช้งานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 120 เซนติเมตร จะได้ค่าดังกราฟ



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายกับความถี่ที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การออกแบบสายอากาศ พาราโบลา (Parabolic) แบบศูนย์รวมโฟกัส (Center focus)

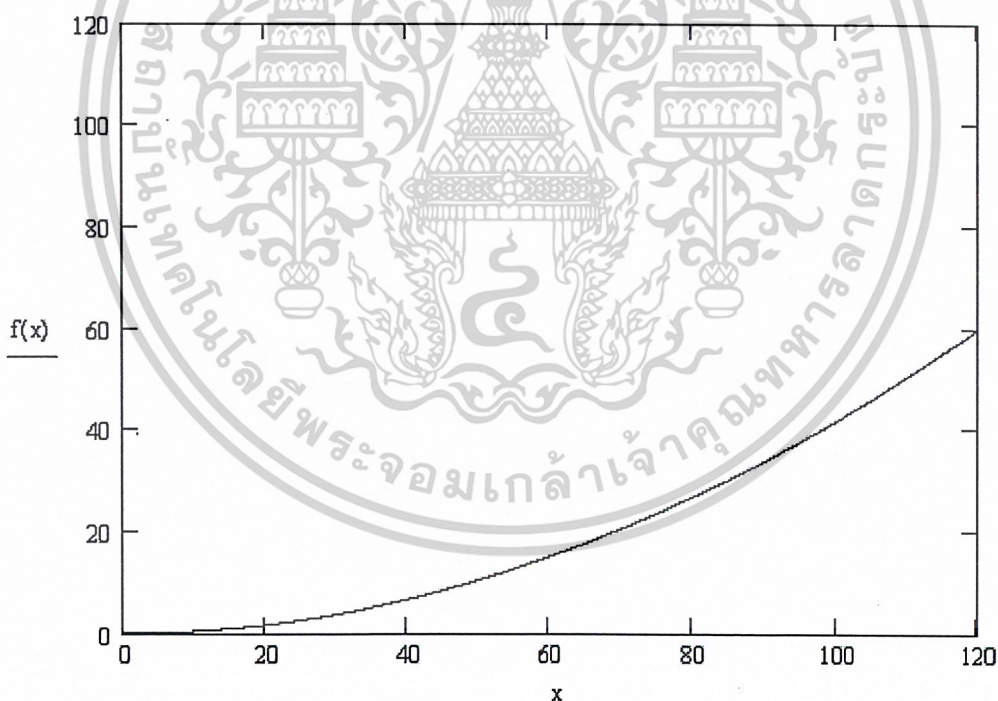
โดยเราจะต้องออกแบบงานสายอากาศแบบ ศูนย์รวมโฟกัส ให้ได้ก่อนจึงจะสามารถนำมาสร้างสายอากาศแบบ ออฟเซตพาราโบลา โดยจะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศแบบ ออฟเซตพาราโบลา หรือมีค่า จุดศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง น้อยกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของของเดิม จากสมการของพาราโบล

$$y^2 = 4cx \quad (3-2)$$

เมื่อจัดให้อยู่ในรูปของ จุดศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง จะสามารถเขียนเป็นสมการซึ่งเป็นสมการรูปทรงของสายอากาศแบบ ศูนย์รวมโฟกัส ได้ดังนี้

$$y^2 = 4D(f/D)x \quad (3-3)$$

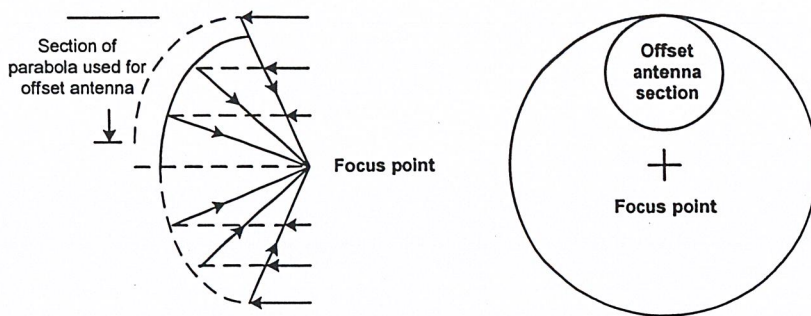
เมื่อแทนค่าความสัมพันธ์แล้วจะได้ความสัมพันธ์ดังกราฟ



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง x และ y

สายอากาศแบบ ออฟเซตพาราโบลา เป็นการนำเอาส่วนหนึ่งของสายอากาศแบบ ศูนย์รวมโฟกัสขนาดใหญ่ โดยนำเอาส่วนของผิวมาใช้งาน อุปกรณ์การรับยังคงติดตั้งอยู่ที่เดิม ซึ่งจะอยู่บริเวณด้านล่างของงานสายอากาศ หากว่างานมีขนาดใหญ่ก็จะทำให้แกนพีคของงานยาวขึ้น ซึ่งเนื่องมาจากจุดโฟกัสที่ยาวขึ้น ซึ่งจะเป็นดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การทำออฟเซตโพกัสมาจากเซ็นเตอร์โพกัส

การสร้างสายอากาศแบบ ออฟเซทพาราโบลิก ทำได้โดยใช้สายอากาศแบบ ศูนย์รวมโพกัสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 240 เซนติเมตรที่มีความยาวโพกัสเท่ากับ 60 เซนติเมตร โดยให้ขนาดของ โปรเจกอะเพอเจอร์ (Project Aperture) ของสายอากาศให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 120 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.8

3.3.5 กระบวนการสร้าง

งานสายอากาศแบบออฟเซทพาราโบลิก การสร้างนั้นจะต้องเป็นงานสายอากาศแบบ ศูนย์กลางโพกัส ที่มีผิวหน้าที่เรียบและจะต้องมีรูปร่างเป็นพาราโบลาตามสมการอีกทั้งจะต้องมี โปรเจกอะเพอเจอร์ เป็นสายอากาศแบบ ออฟเซทพาราโบลิก ดังนั้นเพื่อที่จะได้รูปทรงตามที่ต้องการจึงต้องใช้เวลาและความชำนาญสูง ดังนั้นจึงได้ใช้งานต้นแบบ ตามค่าที่ได้คำนวณมา นำมาเป็นแบบ โดยจะทำการสร้างโมเดลขึ้นมาก่อนและจึงจะทำงานสายอากาศจากโมเดลที่สร้างขึ้น

3.3.5.1 การสร้างโมเดล

1. ทำความสะอาดงานสายอากาศต้นแบบที่บริเวณหน้าและขอบงาน โดยเช็ดทำความสะอาดให้ผิวสะอาดเรียบ
2. ทาแวกซ์ลงบนหน้าและขอบของงานต้นแบบเพื่อไม่ให้ผิวของแบบกับโมเดลติดกัน และทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที
3. ทา PVA ทับลงแวกซ์เพื่อเป็นผิวหน้าของโมเดล แล้วทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที
4. เติมโคบอลต์ลงไปในเจลโค้ดประมาณครึ่งหยดและเติมน้ำยาทำแข็งลงไปประมาณ 2 % แต่ไม่ควรผสมน้ำยาทำแข็งลงไปพร้อมกัน เพราะอาจเกิดปฏิกิริยาทำให้ติดไฟง่าย แล้วจึงทิ้งไว้ให้แห้ง
5. ตัดใยผิวให้มีพื้นที่มากกว่าหน้าและขอบงานเล็กน้อย ผสมน้ำยาทำแข็งกับเรซินเข้าด้วยกัน และนำใยทึบวางทับบนเจลโค้ด ทาทับด้วยเรซินที่ผสมไว้ให้ทั่ว ทิ้งไว้จนแห้ง
6. ตัดใยแก้วให้มีขนาดเท่ากับใยทึบหรือใหญ่กว่าเล็กน้อย วางทับเป็นชั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทาทับด้วยเรซินที่ผสมเช่นเดียวกับข้อที่ 5 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง
8. ทำในข้อ 7-8 ซ้ำอีก 2 ครั้ง
9. ทำในข้อ 7-8 ซ้ำอีกครั้ง แต่ใช้ไซสานแทน
10. แคะโมลและงานสาขอากาศออกจากกัน โดยใช้ค้อนยางเคาะที่ด้านหลังงานเพื่อให้โมลกะเทาะออกจากกัน
11. ใช้เครื่องเจียรทำการตัดส่วนที่เกิดจากขอบโมลออก และแต่งให้เรียบ โดยจะต้องใช้ไบตัดไฟเบอร์ทำการเจียร

หมายเหตุ การทาเรซินนั้นควรใช้ลูกกลิ้งถูไล่ฟองอากาศออก เนื่องจากจะทำให้ผิวไม่เรียบ

3.3.5.2 การสร้างสาขานอากาศ

1. ทำความสะอาดโมลที่บริเวณหน้าและขอบงาน โดยเช็ดทำความสะอาดให้ผิวสะอาดเรียบ ถ้าเปียกควรเช็ดให้แห้ง
 2. ทำตามขั้นตอนที่ 3-6 แต่ใช้โมลเป็นต้นแบบแทน
 3. ตัดแผ่นไฟเบอร์ให้มีขนาดเท่ากับไซผิว หรือใหญ่กว่าเล็กน้อย วางทับเป็นชั้นต่อไป
 4. ทาทับด้วยเรซินที่ผสมเช่นเดียวการสร้างโมล แล้วรอให้แห้ง
 5. ตัดในผ้าให้มีขนาดเท่ากับไซผิว หรือใหญ่กว่าเล็กน้อย วางทับเป็นชั้นต่อไป
 6. ทาทับด้วยเรซิน แล้วรอให้แห้ง
 7. ตัดแผ่นไฟเบอร์ให้มีขนาดเท่ากับไซผิว หรือใหญ่กว่าเล็กน้อย วางทับเป็นชั้นต่อไป
 8. ทาทับด้วยเรซิน แล้วรอให้แห้ง ซึ่งจะเป็นชั้นสุดท้าย
 9. แคะโมลและงานสาขอากาศที่ได้ออกจากกัน โดยใช้ค้อนยางเคาะที่ด้านหลังของโมลเพื่อให้งานค่อยๆ หลุดออกจากโมลแล้วค่อยดึงออกจากกัน
 10. ใช้เครื่องเจียรทำการตัดส่วนที่เกิดจากขอบโมลออก และแต่งให้เรียบ โดยจะต้องใช้ไบตัดไฟเบอร์ทำการเจียร
 11. แบ่งงานออกเป็น 4 ส่วนตามความสูงใช้เครื่องเจียรตัดส่วนบนและส่วนล่างออก
 12. เจาะรูที่งานเพื่อประกอบเข้ากับฐานรองแล้วยึดด้วยน็อต
 13. โดยทาผิวงานด้วยกาวแล้วจึงปิดทับด้วยแผ่นอลูมิเนียมรีดแผ่นอลูมิเนียมให้เรียบ
- คิดผิวงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

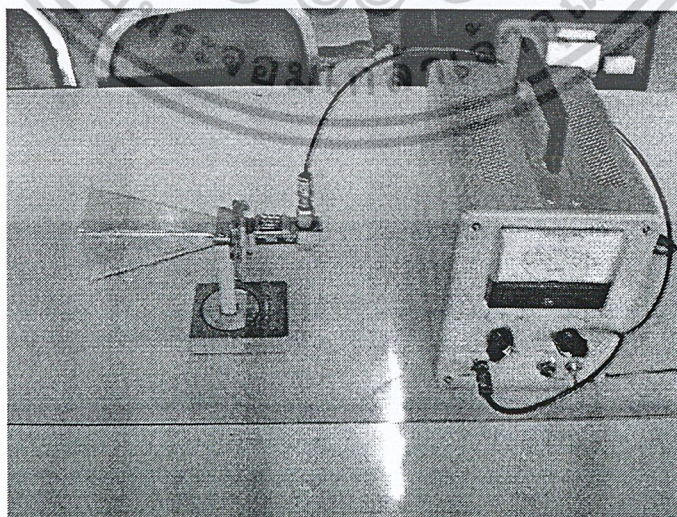
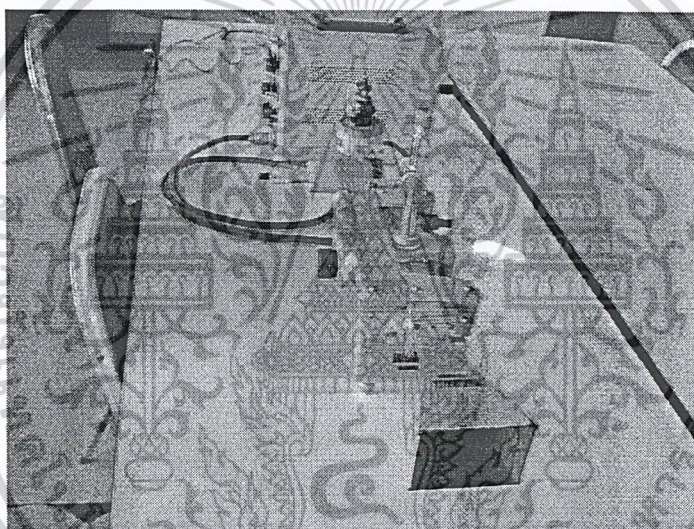
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองคุณสมบัติของสายอากาศปากแตร

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

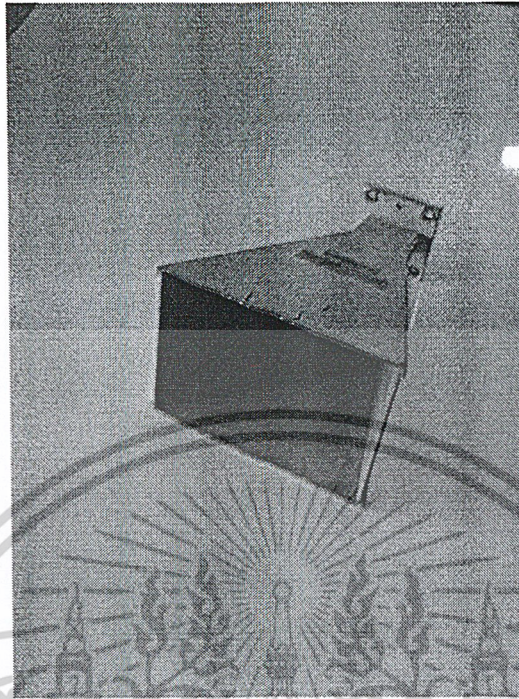
1. Gunn Diode
2. Waveguide
3. Wave Generator
4. VSWR Meter
5. Frequency Meter



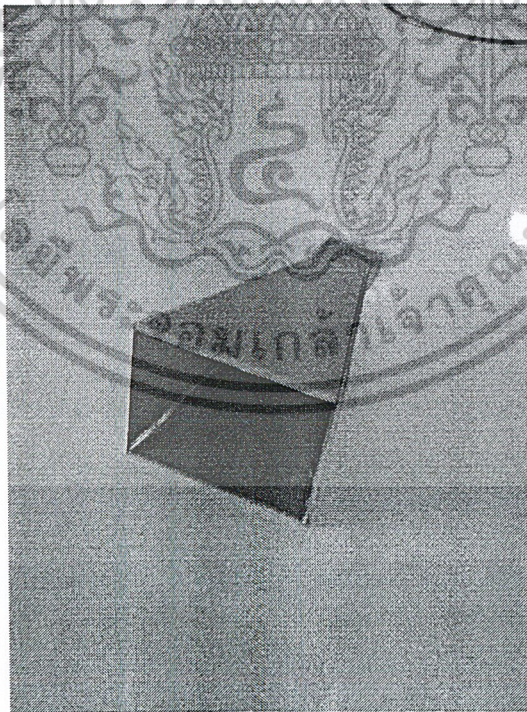
รูปที่ 4.1 ภาพอุปกรณ์ในการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศปากแตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดลอง

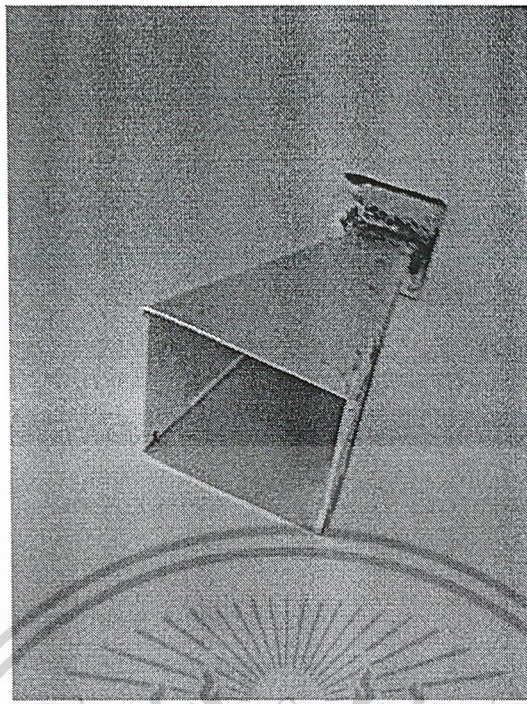


รูปที่ 4.2 สายอากาศปากแตรต้นแบบ



รูปที่ 4.3 ภาพสายอากาศปากแตรที่ทำมาจากทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



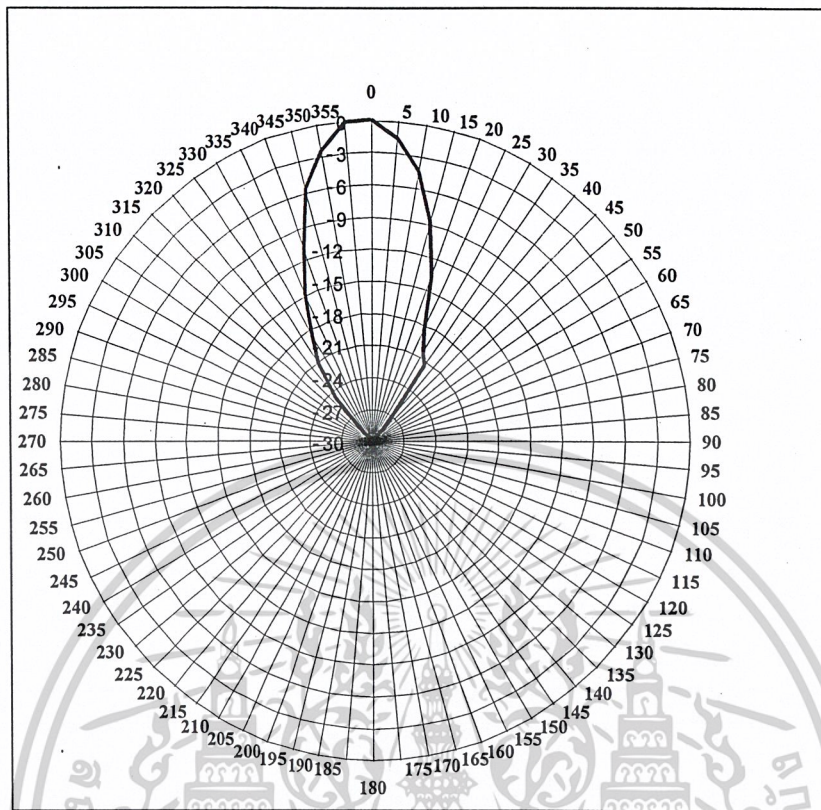
รูปที่ 4.4 ภาพสายอากาศสปากแตรที่ทำมาจากอลูมิเนียม

ตารางที่ 4.1 ค่า VSWR ของสายอากาศสปากแตรชนิดต่างๆ

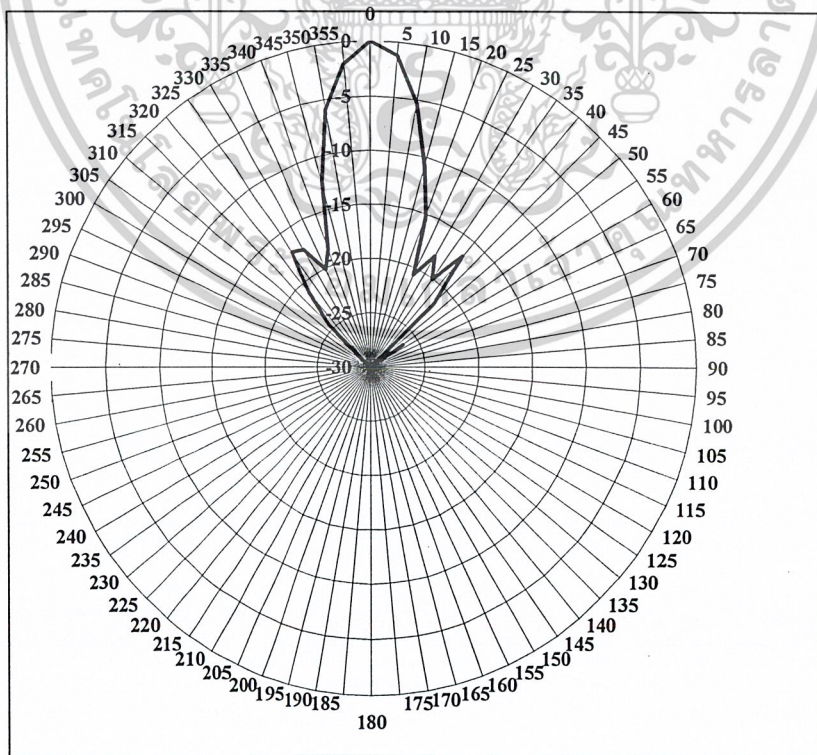
อุปกรณ์	VSWR
มาตรฐาน	1.13dB
ทองแดง (PCB)	1.19dB
อลูมิเนียม	1.325dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

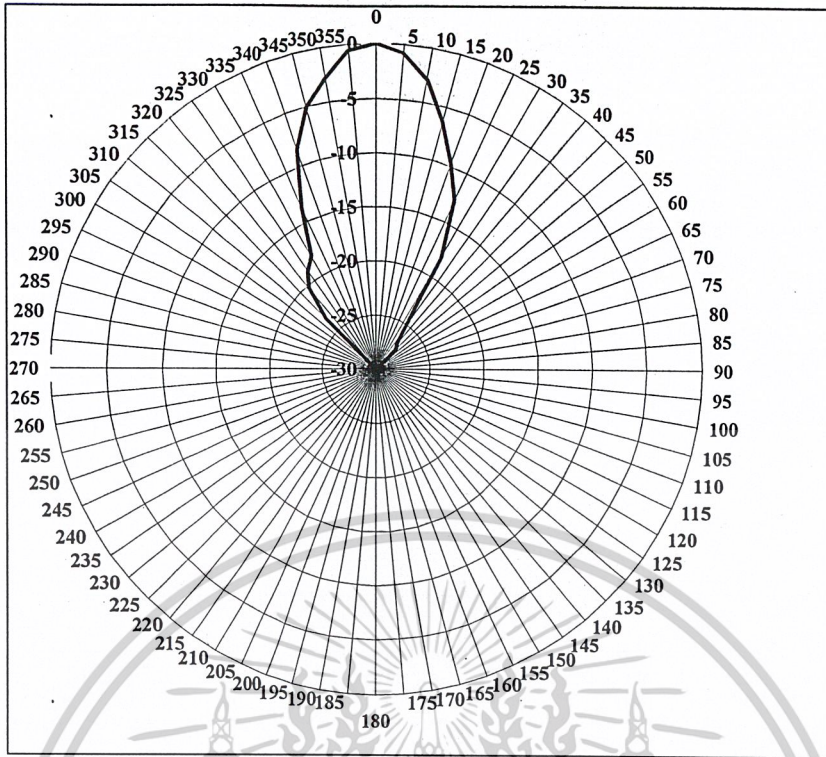
4.1.3 ค่าการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร



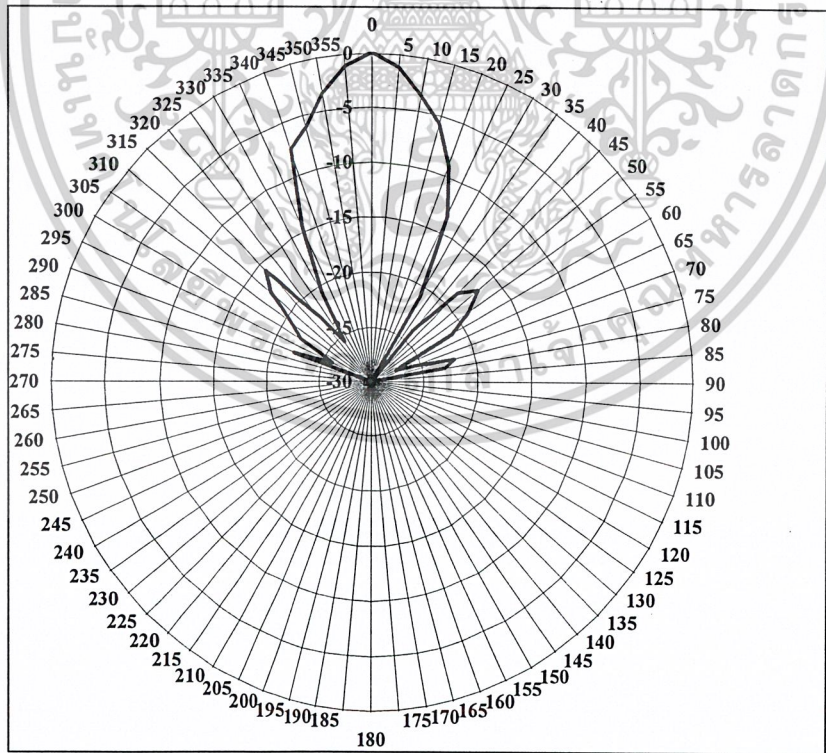
รูปที่ 4.5 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศปากแตรต้นแบบในแนวนอน (Horizontal Pattern)



รูปที่ 4.6 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศปากแตรต้นแบบในแนวตั้ง (Vertical Pattern)
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

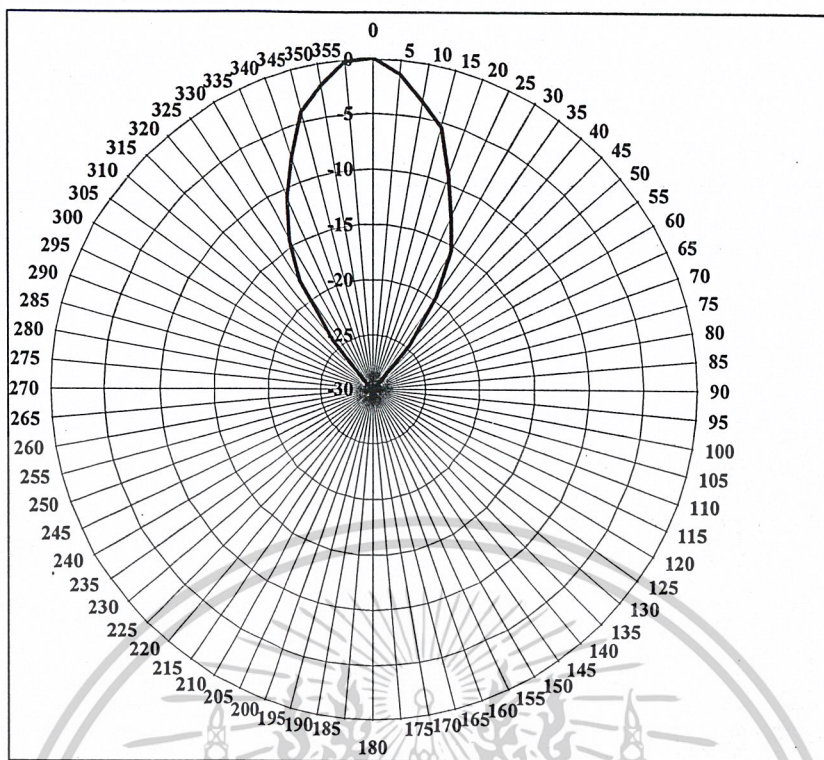


รูปที่ 4.7 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศปากแตรทองแดงในแนวนอน (Horizontal Pattern)

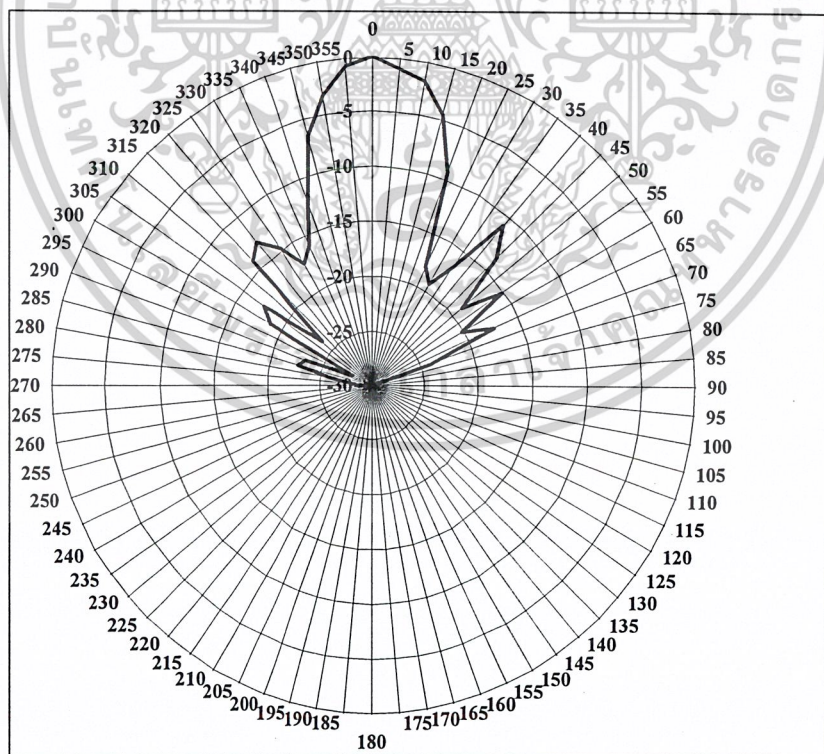


รูปที่ 4.8 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศปากแตรทองแดงในแนวตั้ง (Vertical Pattern)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

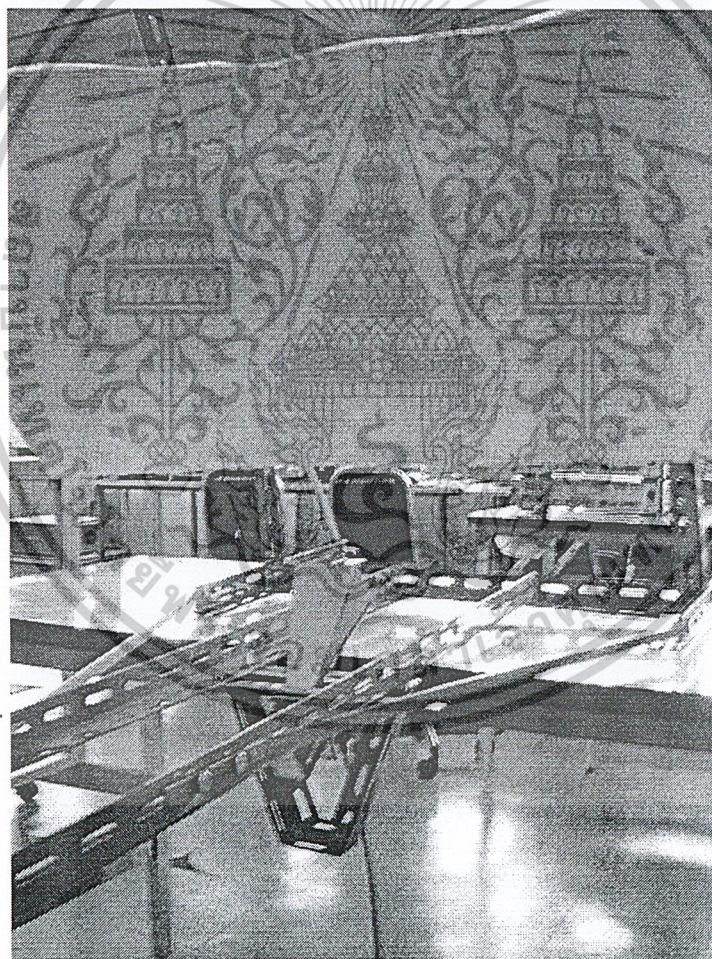
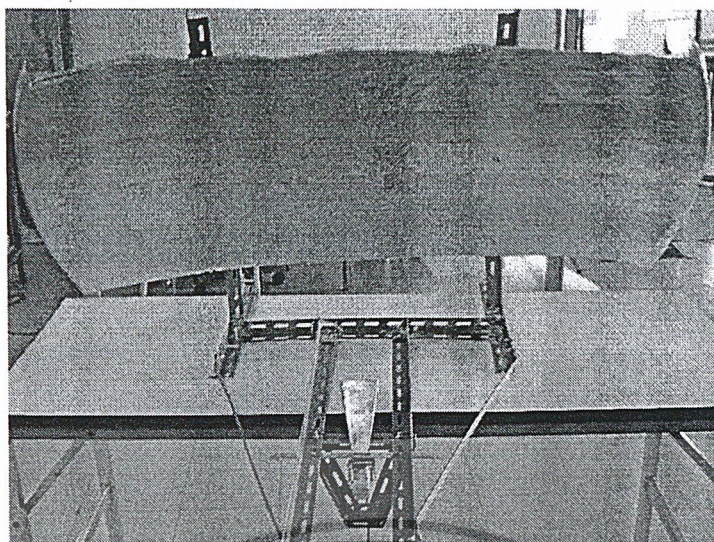


รูปที่ 4.9 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศปากแตรลูมินีเยมในแนวนอน (Horizontal Pattern)



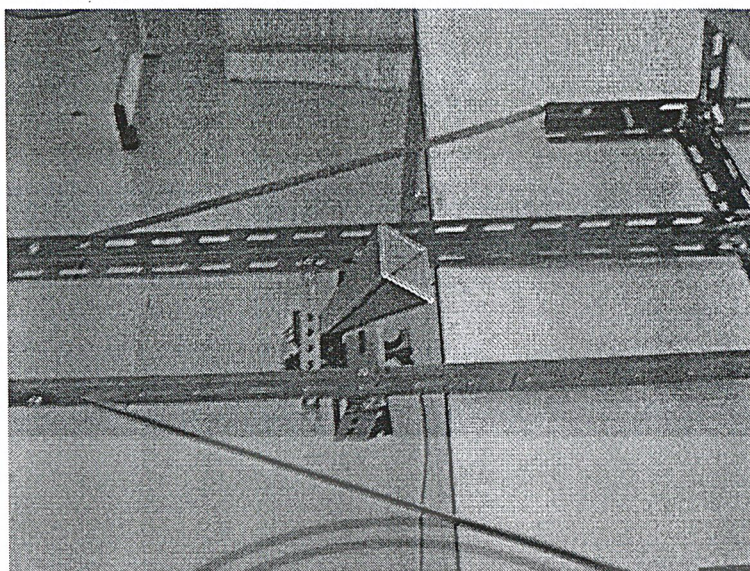
รูปที่ 4.10 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศปากแตรลูมินีเยมในแนวตั้ง (Vertical Pattern)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ภาพการประกอบเป็นสายอากาศเรดาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 สายอากาศปากแตรที่จะนำมาประกอบกับงานพาราโบลิก

4.1.4 คุณสมบัติของสายอากาศเรดาร์ (Radar Antenna)

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของสายอากาศเรดาร์

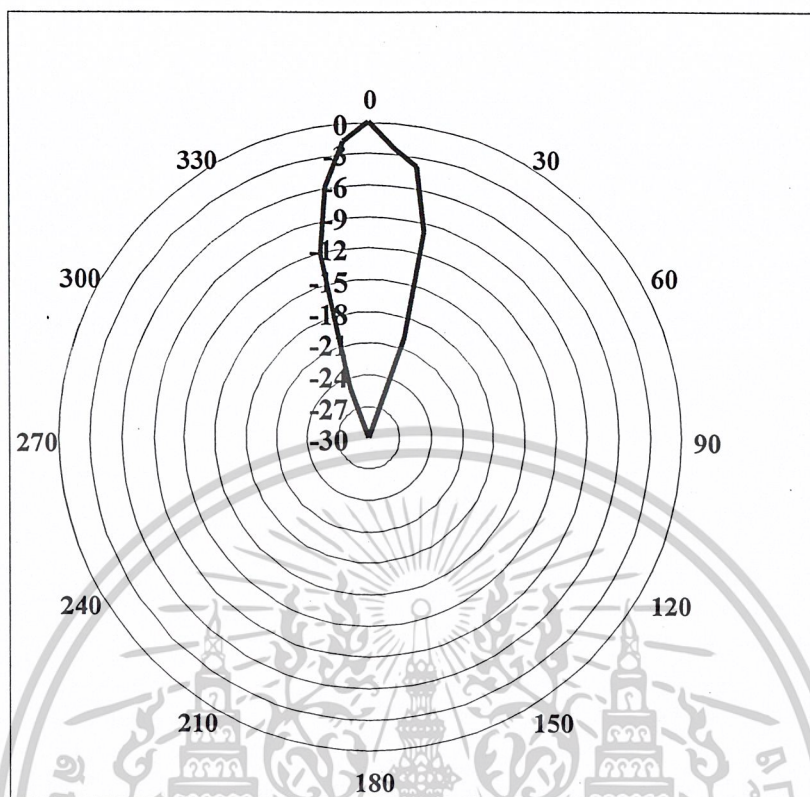
ค่าวีเอสดีบีวัวร์ (VSWR) ของสายอากาศฮอร์(อคูมิเนียม)	1.325
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศปากแตรในแนวตั้ง	22 °
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศปากแตรในแนวนอน	21 °
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศเรดาร์ในแนวตั้ง	11 °
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศเรดาร์ในแนวนอน	10 °
อัตราขยายรวมของสายอากาศปากแตร	18.7 dBi
อัตราขยายรวมของสายอากาศเรดาร์	25.7 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

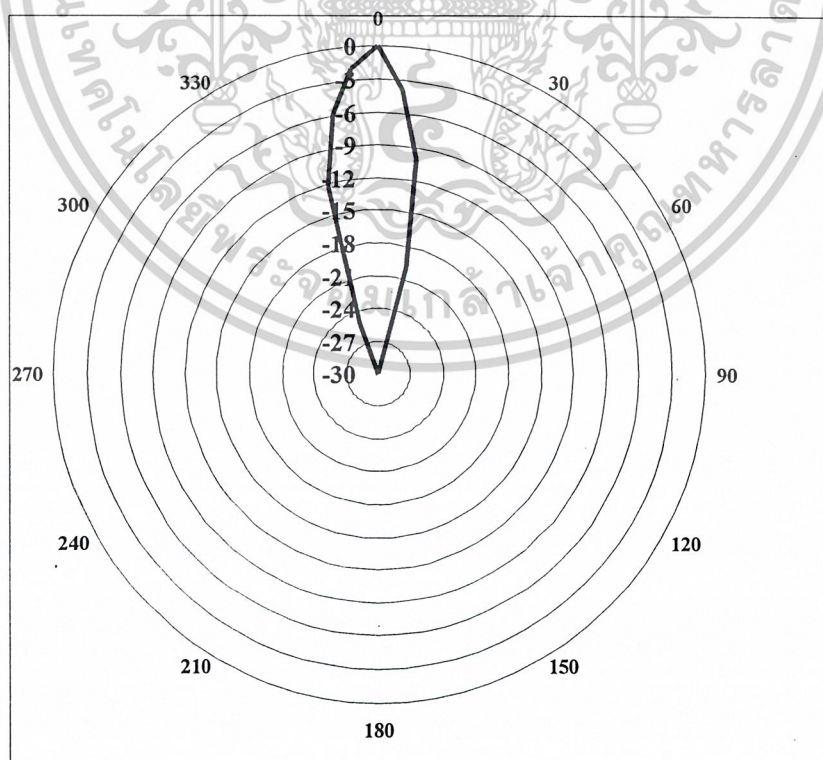


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ค่าการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเรดาร์



รูปที่ 4.13 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศเรดาร์อคูมิเนียมในแนวตั้ง (Vertical Pattern)



รูปที่ 4.14 กราฟเชิงขั้วแสดงรูปแบบของสายอากาศเรดาร์อคูมิเนียมในแนวนอน (Horizontal Pattern)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับโครงการศึกษาค้นคว้าเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ปฏิญานิพนธ์นี้ได้เปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศปากแตรที่ออกแบบใช้งานในย่านความถี่ 9.6 GHz โดยนำมาจากวัสดุที่เป็นทองแดงและอลูมิเนียม จากการสร้างและผลการทดลองในบทที่ 4 จะเห็นว่าสายอากาศปากแตรที่ทำมาจากทองแดงนั้นจะมีคุณสมบัติดีกว่าคั้งนี้ สายอากาศปากแตรที่ทำมาจากทองแดงมีค่า VSWR เข้าใกล้ 1 มากกว่าอลูมิเนียม และลักษณะการแพร่กระจายคลื่นทั้งในแนวตั้ง (Horizontal Pattern) และในแนวนอน (Vertical Pattern) มีการกระจายคลื่นที่ดีกว่าคือ จะมีความกว้างลำคลื่นลำปริมที่แคบกว่าและปริมาณ ลำคลื่นข้างๆ (Side Lobe) น้อยกว่า

เนื่องจากว่าในการทดลองยังมี ลำคลื่นข้างๆ (Side Lobe) อยู่อาจจะเนื่องจากการเชื่อมต่อในตอนที่ไม่ค่อยดีทำให้การสะท้อนคลื่นได้ไม่ค่อยดีเพราะผู้ทำไม่ค่อยมีความชำนาญมากนัก ในการเลือกวัสดุในการทำสายอากาศปากแตรควรเลือกที่เนื้อวัสดุที่ทำให้ค่า VSWR มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุดเพราะจะทำให้การสะท้อนคลื่นได้ดีกว่าและได้ผลที่ดีกว่า

ช่วงที่ 2 การออกแบบข้างต้นได้ออกแบบให้สายอากาศแบบปากแตรทำหน้าที่เป็นฟีดและให้งานสายอากาศมีหน้าที่บีบลำคลื่นให้มีขนาดแคบลงผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่างานรับนี้สามารถลดขนาดลำคลื่นลงได้มาก อย่างไรก็ตามลำคลื่นในแนวนอนนั้นยังมีขนาดที่เท่ากับลำคลื่นในแนวตั้งซึ่งการใช้งานทางทะเลนั้นควรจะมีลำคลื่นในแนวนอนที่แคบกว่าค่าอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบนี้มีค่าต่ำกว่าการออกแบบ เนื่องจากมีปัญหาในด้าน โครงสร้างจึงทำให้งานสะท้อนสัญญาณไม่สามารถทำการรวมสัญญาณไว้ที่จุดโฟกัสได้เต็มที่จึงทำให้กำลังขยายของสายอากาศเรดาร์นั้นมีค่าต่ำกว่าในทางทฤษฎี

หนังสืออ้างอิง

1. John D Kraus, "Antennas for all applications" Third Edition, McGraw-Hill/2002
2. ณรงค์ เหมกรณ์, "การสื่อสารดาวเทียม" ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กทม.
3. อภินันท์ มัชฌานนท์, "มารีนเรด้า" ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กทม.
4. จเร สุรวัดณ์ปัญญา, "วิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้า" ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กทม.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้