



สายอากาศเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น
EXPONENTIAL HORN ANTENNA



โดย
นาย สำเร็จ เหมันต์
นาย สุทธิพงศ์ ดวงดารัตน์

เลขเรียกหนังสือ... ๗๗-๕๙๓๗ ๒๕๕๑
เลขทะเบียน... ๒๑๐๒๙๒
วัน เดือน ปี... ๑๑ กค ๕๑

ปริญญาานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๑

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้

๒๑๐๒๙๒

สายอากาศเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น
EXPONENTIAL HORN ANTENNA



ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น

EXPONENTIAL HORN ANTENNA

ผู้จัดทำ

1. นาย สำเร็จชัย เหมันต์ รหัสประจำตัว 39013061
2. นาย สุทธิพงษ์ ดวงคาร์ตัน รหัสประจำตัว 39013062


.....
(ผศ. สมผล โกศลวิตร)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศเอ็กโปเนนเชียลฮอร์น

EXPONENTIAL HORN ANTENNA

โดย นาย สำเร็จ เหมันต์ 39013061

นายสุทธิพงศ์ ดวงคาร์ตน์ 39013062

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. สมผล โกศลวิตร

บทคัดย่อ

สายอากาศโมโนโพล $\lambda/4$ บนกราวนด์เพลนได้ถูกออกแบบให้ติดตั้งบนส่วนของท่อนำคลื่นกลมของสายอากาศแบบปากแตร ที่มาจากตัวลำโพงแบบปากแตรขนาดปากกว้าง 50 ซม. ผลการทดลองได้ค่า VSWR ต่ำกว่า 1.5:1 ตลอดย่านความถี่ 1700 - 1800 MHz และได้แสดงผลของอิมพีแดนซ์, รีเทิร์น-ลอส, เกน, ไดเรกทิวิตี ตลอดจนเรดิเอชันแพทเทิร์นไว้ด้วย

ABSTRACT

The $\lambda/4$ monopole antenna is designed and constructed on the ground plane of circular waveguide section of conventional exponential loudspeaker reflector. The experiment results in VSWR less than 1.5:1 over the entire band of 1700 - 1800 MHz, the radiation pattern, return loss, gain, directivity, efficiency and impedances are also include.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ	3
2.1 แพนทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่น	3
2.1.1 แพนทเทอร์นแบบไอโซโทรปิก ไคเรคชันแนลและออมนิไคเรคชันแนล	3
2.1.2 แพนทเทอร์นหลัก	4
2.1.3 โลบของแพนทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่น	5
2.1.4 บริเวณต่าง ๆ ของสนามจากสายอากาศ	6
2.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์	9
2.3 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย	9
2.4 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	10
2.5 ไคเรคตีวิตี	10
2.6 เกน	13
2.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ	15
2.8 อินพุตอิมพีแดนซ์	16
2.9 แบนด์วิดท์	16
บทที่ 3 ท่อนำคลื่นและสายอากาศแบบฮอร์น	18
3.1 ท่อนำคลื่นแบบกลม	18
3.1.1 รูปแบบของคลื่นที่ส่งในท่อนำคลื่นแบบกลม	18
3.1.2 ความยาวคลื่นคัทออฟสำหรับท่อนำคลื่นแบบกลม	19
3.1.3 การใช้งานท่อนำคลื่นแบบกลม	20
3.2 สนามของท่อนำคลื่นแบบกลม	21
3.3 การเดินทางของคลื่นในท่อนำคลื่น	22
3.4 ชนิดและการใช้งานสายอากาศแบบฮอร์น	23
3.5 โหมดหลักของฮอร์นแบบกรวยกลม	25
3.5.1 แพนทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่น	25
3.5.2 เกนของฮอร์นแบบกรวยกลม	26
3.5.3 เกนของฮอร์นแบบกรวยกลมที่สูงสุด	27
3.6 สายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์	28
3.7 การแพร่กระจายคลื่นจากอะเพอร์เจอร์ : วิธีฟูรีเยร์ทรานซฟอร์ม	28
3.8 การแพร่กระจายคลื่นจากอะเพอร์เจอร์วงกลม	32
3.9 สนามบนอะเพอร์เจอร์เป็นแบบเทเปออร์	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.10 การประยุกต์หลักการสนามสมมูลย์กับการแพร่กระจายคลื่นจากอะเพอร์เจอร์	35
3.11 คุณสมบัติของสนามที่แพร่กระจายคลื่นจากอะเพอร์เจอร์	37
3.11.1 อะเพอร์เจอร์ขนาดเล็ก	37
3.11.2 อะเพอร์เจอร์กลม	38
3.12 สายอากาศแบบโมโนโพล	39
3.13 การออกแบบและการสร้างสายอากาศ	40
3.13.1 การคำนวณและออกแบบ	40
3.13.2 ขั้นตอนการสร้าง	41
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	43
4.1 ขั้นตอนการทดลอง	43
4.2 ผลการวัดทดลอง	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	66
ภาคผนวก ก. แสดงรูปเครื่องมือที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติของสายอากาศ	67
หนังสืออ้างอิง	70

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ส่วนประกอบหลักของระบบการสื่อสารโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	1
2.1 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	3
2.2 แพทเทอรันของสายอากาศที่ทิศทาง (ออมนีไดเรกชันแนล)	4
2.3 แพทเทอรันหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร	5
2.4 a) โลบต่างๆ และบีบิวิตซ์ของแพทเทอรันสายอากาศ	6
b) แพทเทอรันในแบบลิเนียร์	6
2.5 แสดงการแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	7
2.6 รูปแสดงจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน	8
2.7 มุมตันของบีบิวิตซ์ที่มีแพทเทอรันของการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรและสมมาตรกัน	12
2.8 ขั้วอ้างอิง และการสูญเสียของสายอากาศ	14
2.9 สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์	16
3.1 ความหมายของ m และ n	18
3.2 แสดงโหมด TE และ TM ของท่อนำคลื่น	19
3.3 ท่อนำคลื่นแบบกลมและแพทเทอรัน	21
3.4 การเดินทางของคลื่นในท่อนำคลื่น	23
3.5 แสดงสายอากาศแบบฮอร์นชนิดสี่เหลี่ยม	24
3.6 แสดงสายอากาศฮอร์นแบบกรวย	24
3.7 แสดงแพทเทอรันของฮอร์นแบบกรวยกลมที่เส้นผ่าศูนย์กลางต่าง ๆ	25
3.8 ค่าเกณฑ์เหมาะสมสำหรับฮอร์นแบบกรวย	27
3.9 อะเพอร์เจอร์ในระนาบ $Z = 0$	28
3.10 (a) อะเพอร์เจอร์วงกลมที่มีขนาดสม่ำเสมอ	32
3.10 (b) แพทเทอรันการแพร่กระจายคลื่น	33
3.11 แสดงรูปของอะเพอร์เจอร์ขนาดเล็กและแพทเทอรันจากสมการสนามในตารางที่ 3.2	37
3.12 แสดงรูปของอะเพอร์เจอร์กลมและแพทเทอรันจากสมการสนามในตารางที่ 3.3	38
3.13 สายอากาศโมโนโพลและสายอากาศภาพเสมือน	40
3.14 แสดงโครงสร้างของสายอากาศเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์นและ โพรบ	41
4.1 แสดงเครื่องเนทเวิร์คอะนาไลเซอร์	44
4.2 แสดงค่า VSWR ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์นตัวที่ 1	45
4.3 แสดงค่า VSWR ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์นตัวที่ 2	45
4.4 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์นตัวที่ 1	46
4.5 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์นตัวที่ 2	46

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ทางปัญญาของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

4.6 แสดงค่ารีเทิร์นลอสของเอ็กซ์โพเนนเชียลฮอร์นตัวที่ 1	47
4.7 แสดงค่ารีเทิร์นลอสของเอ็กซ์โพเนนเชียลฮอร์นตัวที่ 2	47
4.8 แสดงค่าเรดิเอชันแพทเทิร์นของเอ็กซ์โพเนนเชียลฮอร์นตัวที่ 1 ในระนาบ H - Plane	60
4.9 แสดงค่าเรดิเอชันแพทเทิร์นของเอ็กซ์โพเนนเชียลฮอร์นตัวที่ 1 ในระนาบ E - Plane	60
4.10 แสดงค่าเรดิเอชันแพทเทิร์นของเอ็กซ์โพเนนเชียลฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ H - Plane	61
4.11 แสดงค่าเรดิเอชันแพทเทิร์นของเอ็กซ์โพเนนเชียลฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ E - Plane	61
4.12 แสดงค่าเรดิเอชันแพทเทิร์นของเอ็กซ์โพเนนเชียลฮอร์นตัวที่ 1 ในระนาบ E - Plane, H - Plane และ Crosspolarization	62
4.13 แสดงค่าเรดิเอชันแพทเทิร์นของเอ็กซ์โพเนนเชียลฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ E - Plane, H - Plane และ Crosspolarization	62



สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ค่ารากของเบสเซล	20
ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของคลื่นที่แพร่กระจายเนื่องจากสนามที่อะเพอร์เจอร์ขนาดเล็ก	38
ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของคลื่นที่แพร่กระจายเนื่องจากสนามที่อะเพอร์เจอร์กลม	39
ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 1 ในระนาบ H - Plane	48
ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 1 ในระนาบ E - Plane	51
ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ H - Plane	54
ตารางที่ 4.4 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ E - Plane	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

1.1 บทนำ

ในระบบการสื่อสารแบบที่ใช้การกระจายคลื่นนั้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ เครื่องส่ง สายนำสัญญาณ สายอากาศ และเครื่องรับดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1.1 สายนำสัญญาณจะทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศ หรือสายอากาศมายังเครื่องรับ สายอากาศนั้นอาจกล่าวได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้า จากเครื่องส่งให้เป็นกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมี



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบหลักของระบบการสื่อสาร โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ประสิทธิภาพ ในขณะที่เดียวกันสายอากาศรับก็จะทำหน้าที่รับกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วส่งเข้าสายนำสัญญาณในรูปของกำลังไฟฟ้า เพื่อส่งผ่านไปยังเครื่องรับต่อไป อันที่จริงแล้วกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านไปตามสายนำสัญญาณนั้น ถ้าพิจารณากันอย่างลึกซึ้งแล้วก็จะเป็นการส่งผ่านของกำลังในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกัน เพียงแต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นถูกบังคับให้ส่งผ่านไปตาม โครงสร้างของสายนำสัญญาณเท่านั้น ตัวอย่างของสายนำสัญญาณที่เห็น ได้ชัดว่าส่งผ่านกำลังงาน ไฟฟ้าไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือ ท่อนำคลื่นซึ่งทำด้วยโลหะตัวนำไฟฟ้าเพียงชั้นเดียว ในท่อนำคลื่นนั้นนิยามเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าจะ ไม่มีความหมายที่ชัดเจนอะไร

สายอากาศจึงคว่า เป็นอุปกรณ์สำคัญที่สุดอันหนึ่งในระบบการสื่อสารที่ใช้คลื่น เพราะสายอากาศที่ดีและมีประสิทธิภาพสูงจะทำให้สามารถประหยัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องส่ง และทำให้สามารถติดต่อกันในระยะที่ไกลขึ้น สายอากาศจึงได้รับการคิดค้นและพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะต่างๆ คงจะเห็นได้ว่าสายอากาศที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายแบบด้วยกัน

เมื่อพิจารณากันอย่างกว้าง ๆ แล้วสายอากาศอาจจะมีโครงสร้างได้มากมายหลายรูปแบบจนเกือบนับไม่ถ้วน เพราะถ้าเราสามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลบนโลหะอย่างเหมาะสมแล้ว ก็จะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านออกไปได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้นสายอากาศที่ถูกนำมาใช้งานนั้นนอกจากจะต้องมีประสิทธิภาพสูง มีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นตามต้องการแล้ว ยังต้องมีรูปร่างที่สะดวกต่อการสร้างมีความแข็งแรง และมีราคาถูกด้วย ด้วยเหตุนี้สายอากาศที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันจึงมีจำนวนรูปแบบที่จำกัด และในจำนวนนี้จะมีสายอากาศที่เป็นพื้นฐานที่มีโครงสร้างง่าย ๆ และมีคุณสมบัติในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายคลื่นอยู่ ในเกณฑ์ดี เช่นสายอากาศไดโพลเป็นต้น สายอากาศที่เป็นพื้นฐานเหล่านี้มักจะได้รับการพิจารณาในการใช้งานเสมอ

ถึงแม้สายอากาศจะได้รับการคิดค้นและพัฒนากันมาหลายสิบปีแล้วก็ตาม ในปัจจุบันนี้ก็ยังมีการวิจัยและพัฒนาสายอากาศรูปแบบใหม่ ๆ ขึ้นเสมอ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าความต้องการของการสื่อสารที่ใช้คลื่นนั้นได้แผ่กว้างออกไป และได้มีความต้องการในลักษณะเฉพาะต่าง ๆ เกิด ขึ้นเสมอ ยกตัวอย่าง เช่น ในระบบสื่อสารดาวเทียมภายในประเทศ (Domestic satellite communication system) สายอากาศบนดาวเทียมจะต้องส่งคลื่นลงมาตรงบริเวณที่ต้องการเท่านั้น โดยไม่ล้ำเข้าเขตของประเทศที่ไม่ต้องการคลื่นนั้น ในลักษณะเช่นนี้สายอากาศบนดาวเทียมก็จำเป็นต้องได้รับการออกแบบพิเศษให้มีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นตามต้องการนั้น

สายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ (Aperture) เป็นสายอากาศที่มีใช้กันอย่างกว้างขวางในย่านความถี่ไมโครเวฟ ทั้งนี้เพราะในย่านความถี่นี้ การส่งผ่านสัญญาณโดยใช้สายนำสัญญาณจะมีการสูญเสีย และการผิดเพี้ยนของสัญญาณสูง แต่การส่งผ่านสัญญาณโดยการกระจายคลื่นการสูญเสียกำลังคลื่นน้อย และมีราคาถูกกว่า สายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ที่พบบ่อย ๆ ได้แก่ สายอากาศสะท้อนคลื่นรูปทรงพาราโบลอย (Paraboloidal Reflector Antenna) และสายอากาศปากแตร (Horn Antenna) สายอากาศอะเพอร์เจอร์นี้จะต้องมีความกว้างและความยาวของอะเพอร์เจอร์อย่างน้อยหลาย ๆ เท่า ของความยาวคลื่นเพื่อให้มีเกนสูง

โครงการนี้ ทำการออกแบบสายอากาศแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ที่ใช้ในย่านความถี่ 2 GHz และทดลองวัดแพทเทิร์น, ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ, คำนวณค่าเกน, โดเรคทีวิตีและประสิทธิภาพ เพื่อนำผลการทดลอง ไปเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี

บทที่ 2

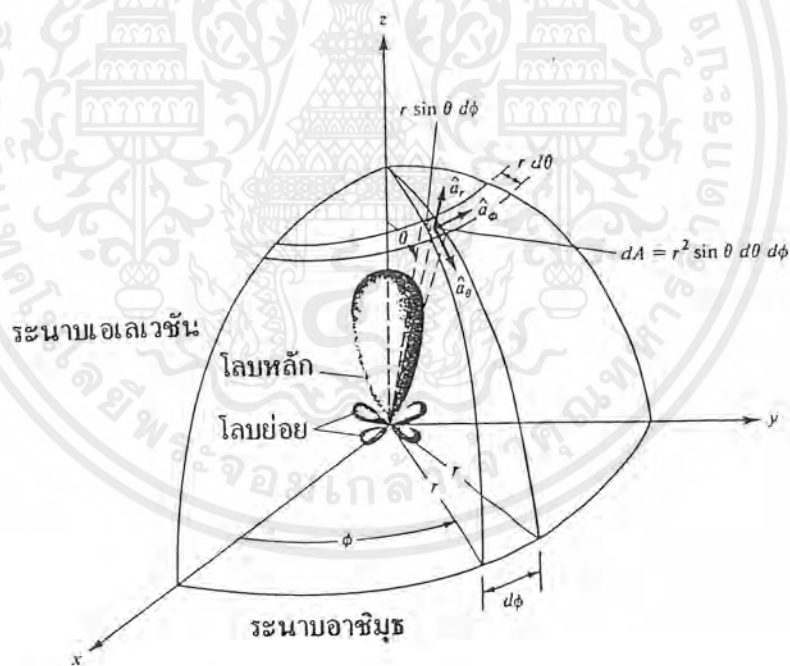
พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

2.1 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซ โคออดิเนท (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นนั้นมักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นจะอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือ โพลาริเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.1 แสดงระบบโคออดิเนทที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น สำหรับการใช้นี้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่มีชื่อเรียกว่า แพทเทิร์นกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่มีชื่อเรียกว่าแพทเทิร์นสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น



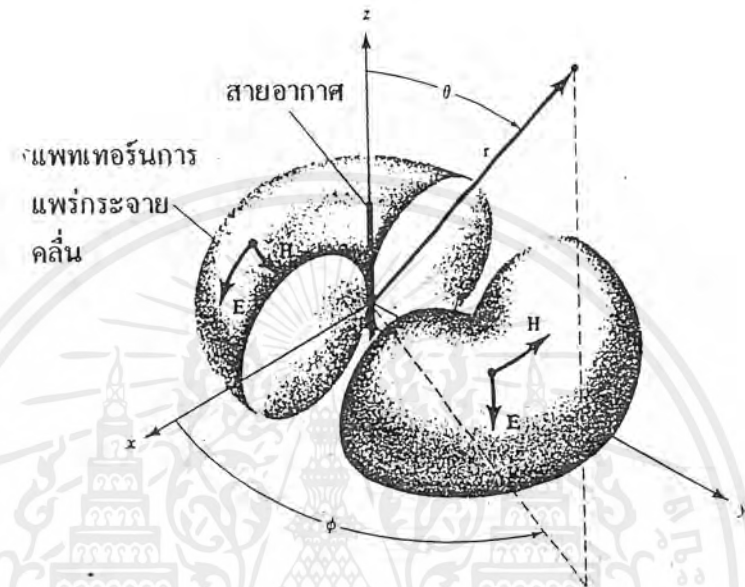
รูปที่ 2.1 ระบบ โคออดิเนทสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

2.1.1 แพทเทิร์นแบบไอโซโทรปิก ไคเรชันแนล และออมนิไคเรชันแนล

ตัวแพร่คลื่นไอโซโทรปิก (Isotropic Radiator) คือ สายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น พอยท์ซอร์ส (Point-Source) เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวแทนเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบออมนิไดเรกชันแนล (Omnidirectional Antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้มีดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แพทเทอรินของสายอากาศชี้ทิศทาง (ออมนิไดเรกชันแนล)

ตามรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าแพทเทอรินแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุท (Azimuth Plane) [$f(\theta), \phi = \text{ค่าคงที่}$] แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชัน (Elevation Plane) [$g(\theta), \phi = \text{ค่าคงที่}$] แพทเทอรินแบบออมนิไดเรกชันแนลนี้เป็นกรณีพิเศษของแพทเทอรินแบบชี้ทิศทาง

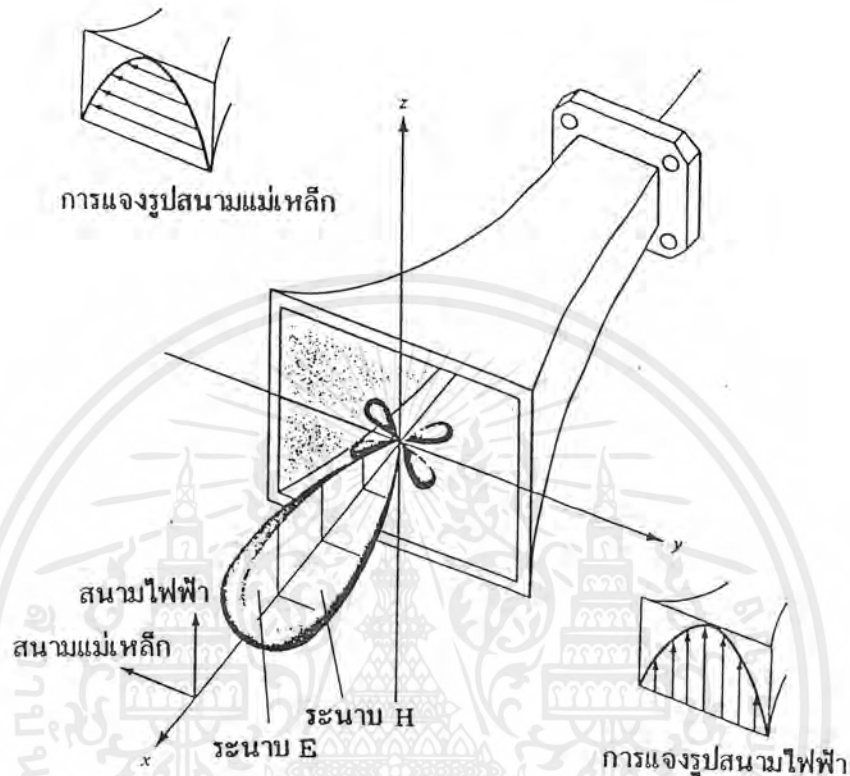
2.1.2 แพทเทอรินหลัก

เรามักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในทอมของแพทเทอริน ในระนาบหลัก (Principal - Pattern) ของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H สำหรับสายอากาศลิเนียร์ลิโพลาไรเซชัน (Linearly Polarization) แพทเทอรินในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแพทเทอรินในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงแพทเทอรินหลักมีดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยมีระนาบ XZ (ระนาบเอเลเวชัน ; $\phi = 0$) เป็นระนาบ E หลัก และมีระนาบ XY (ระนาบอาซิมุท ; $\theta = \pi / 2$) เป็นระนาบ H หลัก

2.1.3 โลกของแพทเทอรินการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแพทเทิร์น การแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นค่า รูปที่ 2.4 แสดง โพลาร์แพทเทิร์น (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็น โอบแบบต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 2.3 แพทเทิร์นหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร

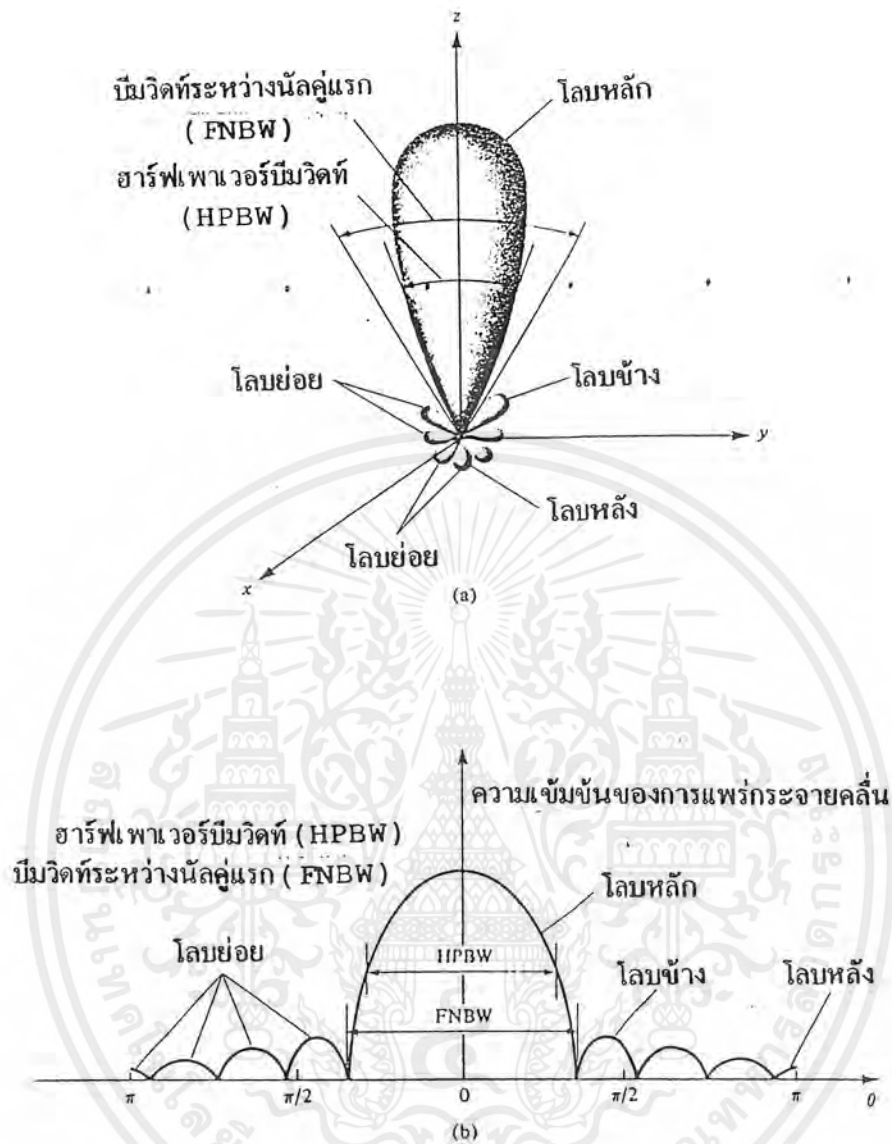
โอบหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นโอบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 2.4 มีโอบหลักอยู่ในทิศทาง $\theta=0$ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีโอบหลักมากกว่าหนึ่งโอบ เช่น สายอากาศแยกบีม (Split Beam Antenna)

โอบย่อย (Minor Lobe) ได้แก่โอบอื่น ๆ นอกเหนือไปจากโอบหลัก

โอบข้างหรือไซด์โอบ (Side Lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ติดกับโอบหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโอบหลัก

โอบหลัง (Back Lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโอบหลักปกติแล้วโอบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโอบเหล่านี้ให้น้อยที่สุด ระดับของโอบย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในโอบที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโอบหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของไซด์โอบ (Side Lobe Ratio) หรือระดับของไซด์โอบ (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โอบน้อยกว่า -20 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 a) โลบต่างๆ และบีมวิดท์ของแพทเทอรินสายอากาศ

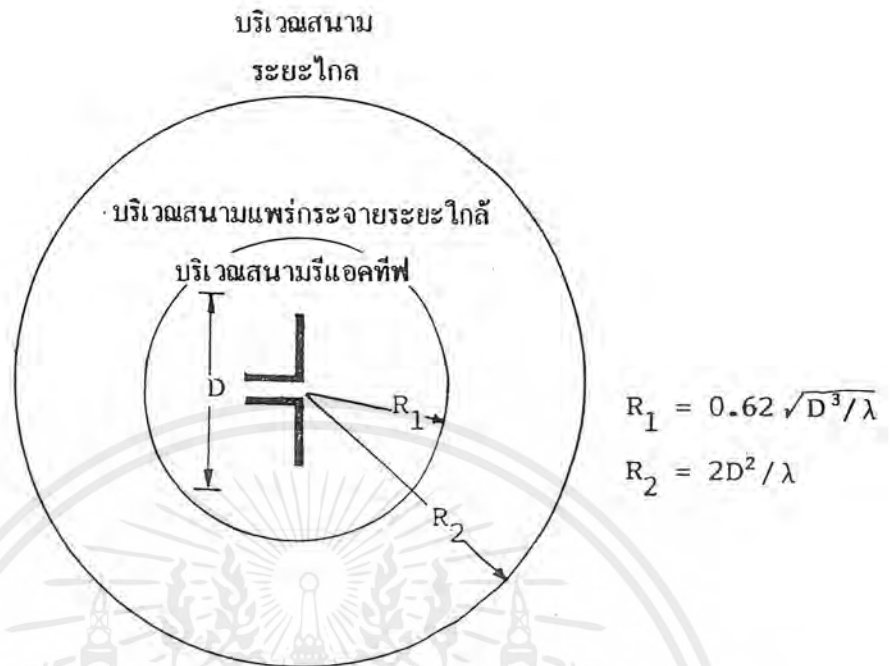
b) แพทเทอรินในแบบลิเนียร์

2.1.4 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบด้วยสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive - Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating - Near Field) และสนามระยะไกล (Far Field) ดังรูปที่ 2.5

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ จากผิวของสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงการแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

อากาศ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะไกล เป็นบริเวณของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอดทิฟที่ระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศเมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะมีระยะ $0.62\sqrt{D^3 / \lambda} \leq R \leq 2D^2 / \lambda$

บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง R มากกว่า $2D^2 / \lambda$ จากสายอากาศ

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

2.1.5 เวกเตอร์และสเตอริออน

การวัดมุมบนระนาบจะมีหน่วยเป็นเรเดียน หนึ่งเรเดียนเป็นมุมบนระนาบ ซึ่งยอดของมันอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมที่มีรัศมี r และถูกปิดด้วยส่วนของเส้นรอบวงกลม ซึ่งยาว r ดังแสดงในรูป 2.6a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเส้นรอบวงรัศมีที่มีรัศมี r มีความยาว $c = 2\pi r$ ดังนั้นบนหนึ่งรอบวงกลมจะมี $2\pi r$ เรเดียน
($2\pi / r$)

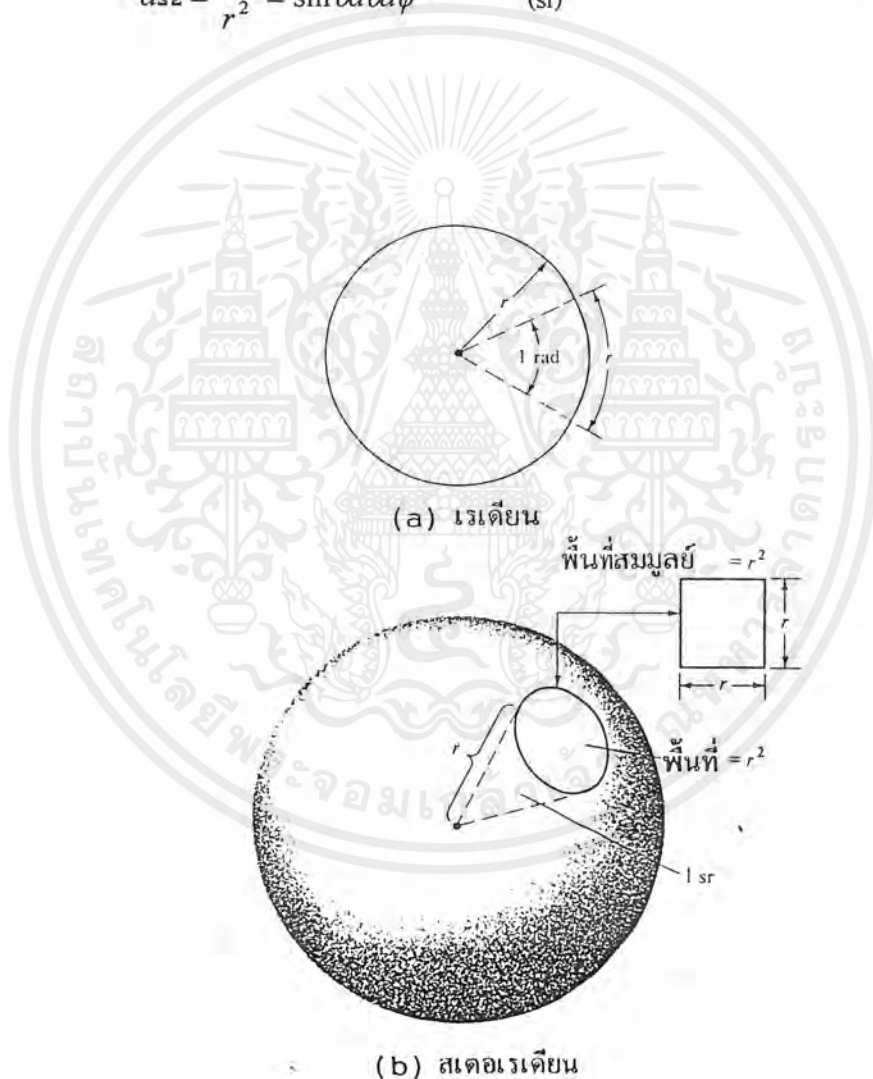
การวัดมุมตันมีหน่วยเป็นสเตอรเดียน (sr) หนึ่งสเตอรเดียนเป็นมุมตันที่มียอดอยู่ที่จุดศูนย์กลาง
กลางของทรงกลมที่มีรัศมี r ดังแสดงในรูปที่ 2.6a เนื่องจากพื้นที่ของทรงกลมรัศมี r มีค่าเท่ากับ $4\pi r^2$ ดังนั้น
ตลอดทรงกลมจะมี 4π sr

ตามรูปที่ 2.1 พื้นที่ขนาดจิ๋ว dA บนผิวของทรงกลมรัศมี r จะคำนวณได้เป็น

$$dA = r^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (m) \quad (2.1)$$

ดังนั้นเอเลเมนต์ (Element) ของมุมตัน ของทรงกลมเขียนได้เป็น

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi \quad (sr) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.6 รูปแสดงคำจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทท์ (Half-Power Beamwidth : HPBW)

ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทท์ เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในโลบหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เพื่อความสะดวกต่อไปจะใช้คำย่อ HPBW แทน

2.3 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลางถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานและกำลังงานไฟฟ้า โดยใช้ตัวความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่ พอยคิงเวกเตอร์ ช่วงเวลานั้น (Instantaneous Poynting Vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ ดังนี้คือ

$$W = E \times H \quad (2.3)$$

เมื่อ W = พอยคิงเวกเตอร์ช่วงเวลานั้น

E = ความเข้มสนามไฟฟ้าช่วงเวลานั้น

H = ความเข้มสนามแม่เหล็กช่วงเวลานั้น

เนื่องจากพอยคิงเวกเตอร์มีความหมายแสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นผิวปิดจะสามารถหาได้โดยอินทิเกรตส่วนของพอยคิงเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวทั้งหมด ซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$P = \oint_S W \cdot d\vec{s} = \oint_S W \cdot \vec{n} da \quad (2.4)$$

เมื่อ P = กำลังงานทั้งหมดซึ่งช่วงเวลานั้น (w)

da = พื้นที่จวบวนพื้นที่ปิด (m^2)

ในกรณีของสนามที่แปรผันกับเวลา มักจะหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของกำลังงานได้โดยการอินทิเกรตค่าพอยคิงเวกเตอร์ช่วงเวลานั้น ตลอด 1 คาบ แล้วหารด้วยคาบเวลานั้น สำหรับสนามที่แปรผันกับเวลา ซึ่งกระจายเป็นฮาร์โมนิค ในรูป $e^{j\omega t}$ เมื่อกำหนดสนาม \vec{E} และ \vec{H} เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชิงซ้อน แล้วจะหาความสัมพันธ์กับค่า E และ H ช่วงเวลาใด ๆ ได้จาก

$$E(x, y, z, t) = \text{Re}[\vec{E}(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.5)$$

$$H(x, y, z, t) = \text{Re}[\vec{H}(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.6)$$

จาก (2.5), (2.6) และโดยอาศัย $\text{Re}[\vec{E}e^{j\omega t} + \vec{E}^*e^{-j\omega t}]$ (2.3) จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$W = E \times H = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] + \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}e^{j\omega t}] \quad (2.7)$$

เทอมแรกของ (2.7) ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลา และเทอมที่สองมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพอยคิงเวกเตอร์จึงสามารถที่จะหาได้เป็น

$$\bar{W}_{av}(x, y, z) = [W(x, y, z, t)]_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] \quad (w/m^2) \quad (2.8)$$

ตัวประกอบ ๘ ใน (2.7) และ (2.8) เกิดขึ้นเพราะสนาม \vec{E} และ \vec{H} เป็น ค่าสูงสุด ไม่ใช่ค่า rms

จาก (2.8) กำลังงานเฉลี่ยที่แพร่กระจายจากสายอากาศ จะเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{Pr ad} &= P_{\text{av}} = \iint_s \vec{W}_{\text{rad}} \cdot d\vec{s} \\
 &= \iint_s \vec{W}_{\text{av}} \cdot d\vec{s} \\
 &= \frac{1}{2} \iint_s \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] \cdot d\vec{s}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

2.4 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

คำจำกัดความของค่าความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น และผลจากการกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{\text{rad}} \tag{2.10}$$

เมื่อ U = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (w/หน่วยมุมตัน)

W_{rad} = ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น (w / m^2)

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$\begin{aligned}
 U(\theta, \phi) &= r^2 |\vec{E}(r, \theta, \phi)|^2 \\
 &\approx \frac{r^2}{2\eta} [|E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2] \\
 &\approx \frac{1}{2\eta} [|E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2]
 \end{aligned} \tag{2.10a}$$

เมื่อ \vec{E} = ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

E_θ, E_ϕ = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

η = อินทริเนตคิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นเพทเทอร์นของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึง ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้เช่นกัน กำลังงานทั้งหมดนี้หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ตาม (2.10) ตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมด ซึ่งจะได้

$$\text{Pr ad} = \iint_\Omega U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi \tag{2.11}$$

2.5 ไคเรคตีวิตี (Directivity)

เพื่อที่จะเข้าใจถึงคำว่าไคเรคตีวิตี เราจำเป็นต้องรู้จักไคเรคทีฟเกน (Directive Gain) ไว้ก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคเรคทีฟเกนในทิศทางที่กำหนด คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (Istropic Point Source)

โคเรคทีฟคือค่าของโคเรคทีฟเกน ในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด หรือกล่าวง่าย ๆ ว่าโคเรคทีฟของต้นกำเนิด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซโทรปิก คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.12)$$

$$D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.13)$$

D_g = โคเรคทีฟเกน (ไม่มีหน่วย)

D_0 = โคเรคทีฟเกน (ไม่มีหน่วย)

U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (w/หน่วยมุมตัน)

U_{max} = ความสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (w/หน่วยมุมตัน)

U_0 = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (w/หน่วยมุมตัน)

P_{rad} = กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (w)

จาก (2.12) และ (2.13) เราทราบว่า โคเรคทีฟเกนและโคเรคทีฟของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส มีค่าเป็นหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า U, U_{max} และ U_0 ต่างมีค่าเท่ากัน

ข้อสรุปอีกข้อหนึ่งในที่นี้ก็คือ ค่าของโคเรคทีฟเกนจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากับโคเรคทีฟ ($0 \leq D_g \leq D_0$)

โดยทั่วไปสูตรของโคเรคทีฟเกนและโคเรคทีฟอาจเป็นฟังก์ชันของทั้งมุม θ, ϕ ด้วย (ที่แล้มาแสดงเฉพาะฟังก์ชันของมุม θ เท่านั้น)

ต่อไปลองสมมติให้ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นอยู่ในลักษณะดังนี้คือ

$$U = B_0 F(\theta, \phi) \cong \frac{\eta}{2} \left[|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.14)$$

เมื่อ B_0 เป็นค่าคงที่, E_θ และ E_ϕ เป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่ระยะทางไกล ค่าสูงสุดของ (2.14) หาได้คือ

$$U = B_0 F(\theta, \phi) \Big|_{\max} = B_0 F_{\max}(\theta, \phi) \quad (2.15)$$

กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมดหาได้จาก

$$\begin{aligned} P_{rad} &= \iint U(\theta, \phi) d\Omega \\ &= B_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (2.16)$$

ดังนั้นจะได้สูตรทั่วไปของโคเรคทีฟเกนและโคเรคทีฟเป็นดังนี้คือ

$$D_g(\theta, \phi) = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.17)$$

$$D_0(\theta, \phi) = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)|_{\max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.18)$$

หรือเขียน (2.18) ใหม่ได้เป็น

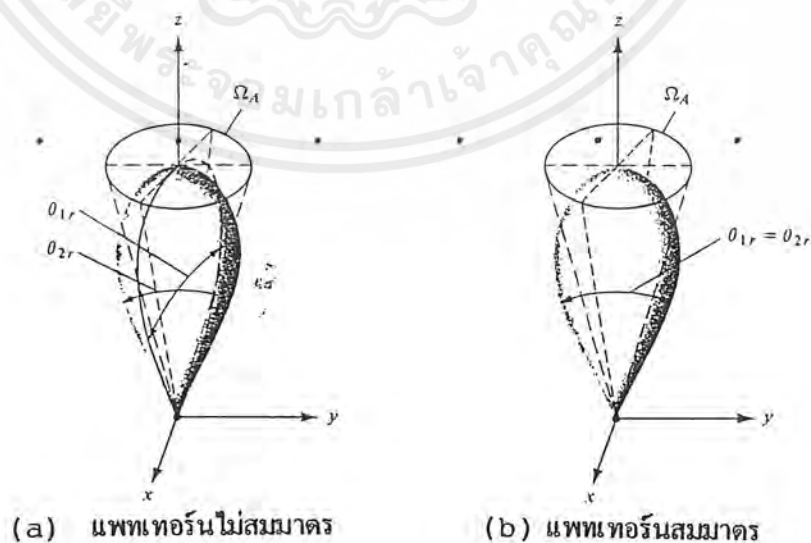
$$D_0(\theta, \phi) = \frac{4\pi}{\left[\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \right] / F(\theta, \phi)|_{\max}} = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (2.19)$$

เมื่อ Ω_A เป็นมุมตันของบีม (Beam) ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned} \Omega_A &= \frac{1}{F(\theta, \phi)|_{\max}} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F_n(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$F_n(\theta, \phi) = \frac{F(\theta, \phi)}{F(\theta, \phi)|_{\max}} \quad (2.21)$$

$F(\theta, \phi)|_{\max}$ นำมาหารใน (2.10) เพื่อออร์มอไลซ์ (Normalize) ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น $F(\theta, \phi)$ ให้มีค่าสูงสุดเป็นหนึ่ง



รูปที่ 2.7 มุมตันของบีมซึ่งมีแพทเทอรันของการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรและสมมาตรกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมตันของ Ω_A มีค่าจำกัดความว่าคือมุมตันซึ่งกำลังงานทั้งหมดของสายอากาศจะไหลผ่านเมื่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นมีค่าคงที่ (และมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของ U) ที่ทุกมุมภายใน Ω_A

สายอากาศซึ่งมีโบลหลักแคบ ๆ เพียงโบลเดียวและมีโบลย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้ มุมตันของบีมจะมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณของ HPBW ในสองระนาบซึ่งตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 สำหรับแพทเทิร์นของสายอากาศที่หมุนแล้วสมมาตรกันโดยรอบ HPBW ในระนาบใด ๆ จะเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7b

โดยอาศัยการประมาณนี้ (2.19) จะเขียนได้ใหม่เป็นดังต่อไปนี้

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} \approx \frac{4\pi}{\Theta_{1r}\Theta_{2r}} \quad (2.22)$$

มุมตันของบีม Ω_A ประมาณได้จาก

$$\Omega_A = \Theta_{1r}\Theta_{2r} \quad (2.23)$$

เมื่อ Θ_{1r} = HPBW ในระนาบใด ๆ (เรเดียน)

Θ_{2r} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (เรเดียน)

เมื่อรู้บีมวิคท์เป็นองศา (2.22) จะตัดแปลงให้เหมาะสมที่จะแทนค่าบีมวิคท์นั้นโดยตรง ได้เป็น

$$D_0 \approx \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} = \frac{41253}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} \quad (2.24)$$

เมื่อ Θ_{1d} = HPBW ในระนาบใด ๆ (องศา)

Θ_{2d} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

สำหรับพลาเนอาร์เรย์ (Planar Array) จะประมาณ (2.24) ได้เป็นดังนี้คือ

$$D_0 \approx \frac{32400}{\Omega_A^2} = \frac{32400}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} \quad (2.25)$$

(2.22) และ (2.25) จะใช้ได้ผลดี เมื่อแพทเทิร์นมีเพียงโบลหลักโบลเดียวและโบลย่อยจะต้องมีขนาดเล็กมาก ๆ เท่านั้น สำหรับแพทเทิร์นซึ่งมีสองโบลหลักที่เหมือนค่าของไดเรคตีวิตีที่หาจาก (2.22) หรือ (2.25) จะเป็นสองเท่าของค่าจริง ส่วนแพทเทิร์นที่มีโบลย่อยที่มีระดับสูง การหาไดเรคตีวิตีโดยใช้ (2.22) หรือ (2.25) ซึ่งตัดโบลย่อยทิ้งจะมีค่าสูงเกินความจริง

โดยปกติเรามักจะแสดงไดเรคทีฟเกนและไดเรคตีวิตีเป็นเดซิเบล (dB)

$$D_g = 10 \log_{10} [D_g] \quad (2.26)$$

$$D_0 = 10 \log_{10} [D_0] \quad (2.27)$$

2.6 เกน (Gain)

สิ่งที่แสดงคุณสมบัติของสายอากาศอีกอย่างหนึ่งก็คือ เกน

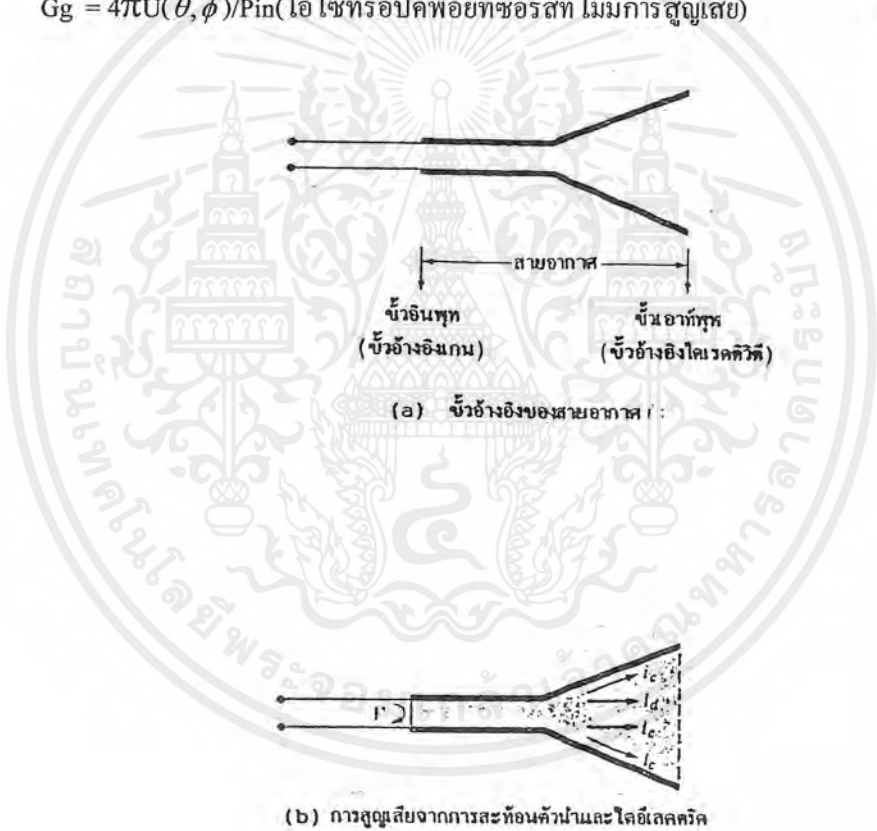
เกนเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากไดเรคตีวิตี โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ไดเรคตีวิตี อธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

เพาเวอร์เกน (Power Gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้ นั้นมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตรา ส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ในทิศทางนั้นคือกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อ ของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วเราจะคิดเพาเวอร์เกนในทิศทางที่มี การแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

$$Gain = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.28)$$

โดยนัยทั่วไปแล้วเรามักจะพูดถึงเกนสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเพาเวอร์เกนในทิศทางที่ กำหนดให้ต่อเพาเวอร์เกนของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสาย อากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศสปาก- แมตร หรือสายอากาศอื่น ๆ ซึ่งคำนวณเกนได้ง่าย หรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่สายอา- กาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$G_g = 4\pi U(\theta, \phi) / P_{in} \quad (\text{ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย}) \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.8 ขั้วอ้างอิง และการสูญเสียของสายอากาศ

จากรูปที่ 2.8a เราสามารถเขียนได้ว่ากำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลัง งานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_{in}) ด้วย

$$P_{rad} = e_r P_{in} \quad (2.30)$$

เมื่อ e_r เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ใช้ (2.30) จะทำให้ (2.32) มีความ สัมพันธ์ง่ายเข้าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_g(\theta, \phi) = e_i \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.31)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับไดเรกทิฟเทนใน (2.17) คือ

$$G_g(\theta, \phi) = e_i D_g(\theta, \phi) \quad (2.32)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของเกนจะสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตี โดย

$$\begin{aligned} G_0 &= G_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} = e_i D_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} \\ &= e_i D_0 \end{aligned} \quad (2.33)$$

ดังนั้นค่าประมาณของเกนจะมีค่าเป็น

$$G_0 \approx \frac{30,000}{\Theta_{1d} \Theta_{2d}} \quad (2.34)$$

ในทางปฏิบัติเมื่อก้าวถึงเกนมักจะหมายถึงเพาเวอร์เกนที่มีค่าสูงสุด ดังแสดงใน (2.33)

$$G_0(\text{dB}) = 10 \log_{10} [e_i D_0] \quad (2.35)$$

2.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ จะใช้เมื่อเราคำนึงถึงการสูญเสียต่างๆ ที่ขั้วและภายใน โครงสร้างของสายอากาศคือ การสูญเสียต่างๆ เมื่ออ้างอิงตามรูป 2.8b อาจเนื่องมาจาก

1. การสะท้อนกลับเนื่องจากความไม่แมตช์ (Mismatch) กันระหว่าง สายส่ง (Transmission - Line) กับสายอากาศ
2. การสูญเสียทั้งในตัวนำและฉนวน ($I^2 R$)

โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.36)$$

เมื่อ

e_t = ประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)

e_r = ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ = $(1 - |\Gamma|^2)$ (ไม่มีหน่วย)

e_c = ประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)

e_d = ประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)

Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนของศักดาไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศ

$[\Gamma = (Z_m - Z_0) / (Z_m + Z_0)]$ เมื่อ Z_m = อิมพีแดนซ์ที่แดนซ์ของสายอากาศ, Z_0 = อิมพีแดนซ์ คุณสมบัตินี้ (Characteristic Impedance) ของสายส่ง]

ปกติ e_c และ e_d คำนวณหาได้ลำบาก ส่วนมากมักหาได้จากการทดลอง แต่ถึงกระนั้นก็แยก e_c จาก e_d ไม่ออก ดังนั้นเพื่อความสะดวกมักจะเขียน (2.36) ใหม่เป็น

$$e_t = e_r e_{cd} = e_{cd} (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.37)$$

เมื่อ $e_{cd} = e_c e_d$ = ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

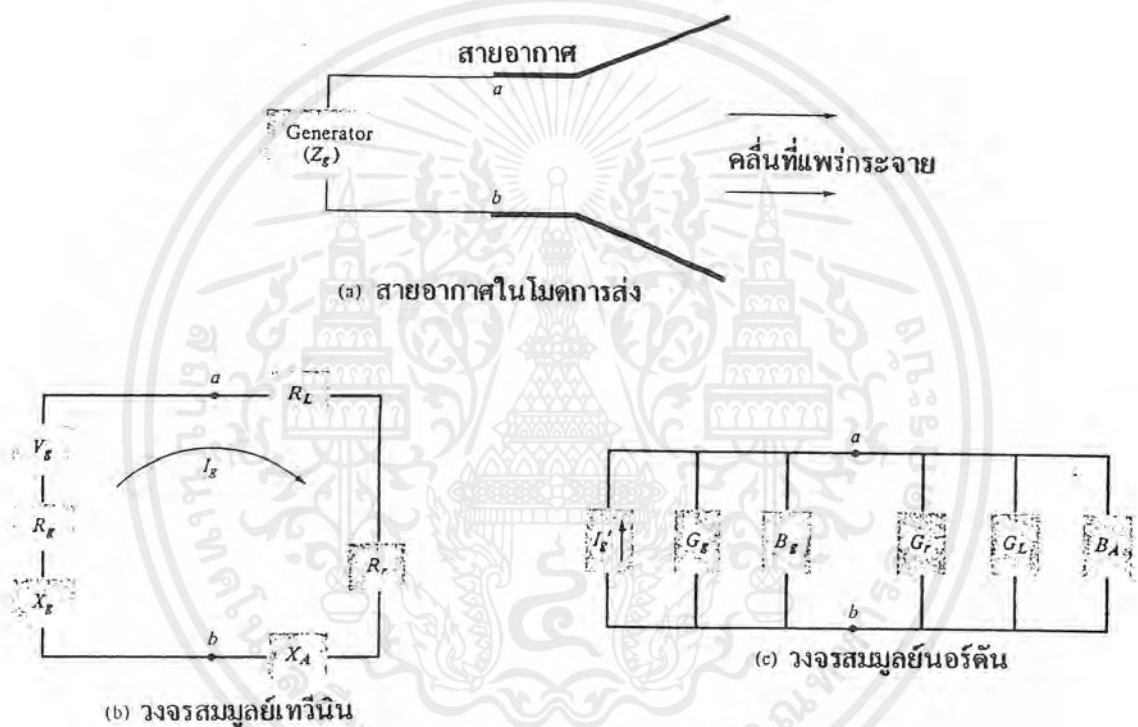
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 อินพุทอิมพีแดนซ์

อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) ของสายอากาศใด ๆ จะเป็นอินพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้น ๆ อาจเป็นอัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศนั้น หรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใด ๆ ในรูปที่ 2.9a a-b เป็นขั้วของสายอากาศอัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนี้ เมื่อ ไม่ได้ต่อ โหลด (Load) จะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งมีค่า

$$Z_A = R_A + jX_A \tag{2.37}$$

- เมื่อ Z_A = อิมพีแดนซ์ที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ (โอห์ม)
- R_A = ความต้านทานที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ (โอห์ม)
- X_A = รีแอกแตนซ์ที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ (โอห์ม)



รูปที่ 2.9 สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์

ปกติอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และจะสัมพันธ์กับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่ช่วงหนึ่ง ๆ เท่านั้น นอกจากนี้อินพุทอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับ แฟลคเตอร์ต่าง ๆ อีก ได้แก่ รูปทรง,วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะพบว่า ส่วนใหญ่ จะหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลอง

2.9 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ อินพุทอิมพีแดนซ์, แพทเทิร์น, บีมวิดท์, โพลาริเซชัน, ระดับของไซด์โลบ, เกน, ประสิทธิภาพของการแพร่กระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือ ไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบ จนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนดหรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้างมักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ ด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำ ยกตัวอย่าง เช่น แบนด์วิดท์ 10:1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูง มีค่ามากกว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำอยู่ 10 เท่า สำหรับสายอากาศแบนด์แคบ แบนด์วิดท์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ)หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น เช่น แบนด์วิดท์ 5% แสดงว่าผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศ เป็น 5% ของความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

เนื่องจากจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ (ได้แก่ อินพุทอิมพีแดนซ์, แพทเทอรัน, เกน, โพลาริเซชัน ฯลฯ) ไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติได้อย่างใดอย่างหนึ่งแต่เพียงอย่างเดียวได้ จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่างไป ปกติแล้วคุณสมบัติของแพทเทอรันกับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์แบนด์วิดท์จึงมักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ นอกจากนี้แบนด์วิดท์ของเกน, ระดับของไอซ์โลบ, บีมวิดท์, โพลาริเซชัน จะมีแบนด์วิดท์ค่าเดียวกับแพทเทอรันแบนด์วิดท์ ในขณะที่แบนด์วิดท์ของอินพุทอิมพีแดนซ์ และประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น จะเป็นค่าเดียวกับอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ท่อนำคลื่น และ สายอากาศแบบฮอร์น (Wave Guide And Horn Antenna)

3.1 ท่อนำคลื่นแบบกลม (Circular waveguide)

ท่อนำคลื่นแบบกลมเป็นท่อนำคลื่นอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กัน ท่อนำคลื่นนั้นจะใช้เป็นรูปทรงลักษณะใดก็ได้ แต่ที่เลือกใช้เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือกลม เพราะการคำนวณวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับโหมดการส่งคลื่นและรูปแบบของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กทำได้ง่ายกว่า ท่อนำคลื่นรูปทรงอื่นจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมกัน

3.1.1 รูปแบบของคลื่นที่ส่งในท่อนำคลื่นแบบกลม

เนื่องจากท่อนำคลื่นเป็นรูปแบบทรงกลม จึงทำให้มีความสลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในการวิเคราะห์คำนวณ แก้ปัญหาต่าง ๆ จึงต้องใช้เบสเซลฟังก์ชัน (Bessel Function) มาช่วยคำนวณแทนที่จะใช้ฟังก์ชันตรีโกณมิติธรรมดาที่ใช้กัน การคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการหาสูตรหารูปแบบสนาม E และ H ในท่อนำคลื่นต่าง ๆ เหล่านี้เป็นเรื่องยุ่งยากอยู่ จะนำสูตรหรือผลจากการวิเคราะห์มาใช้งานเลย

โหมดการส่งคลื่นในท่อนำคลื่นแบบกลมจะเหมือนกับโหมดของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า เงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อก็เหมือนกันสามารถนำมาใช้ได้ โหมดการส่งคลื่นที่ใช้ก็มีโหมด $TE_{m,n}$ และ $TM_{m,n}$ โดยที่ m จะแสดงถึงจำนวนเต็มของความยาวคลื่นวนรอบท่อนำคลื่นแบบกลม (เวกเตอร์ย่อยในแนวรัศมีของสนามไฟฟ้า) n จะแสดงถึงจำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำคลื่นแบบกลม

m = จำนวนเต็มของความยาวคลื่นวนรอบด้านในของท่อนำคลื่นแบบกลม

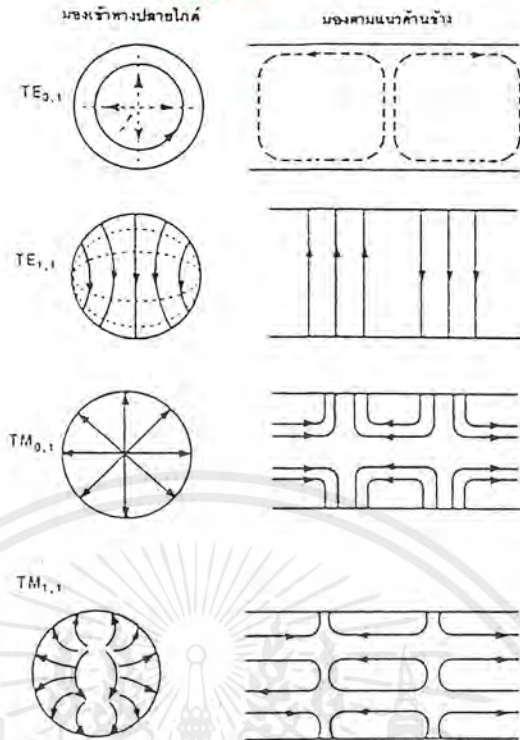
n = จำนวนเต็มของครึ่งความยาวคลื่นบนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำคลื่นแบบกลม



รูปที่ 3.1 ความหมายของ m และ n

ความสัมพันธ์ของ m และ n แสดงไว้ในภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบกลม ดังรูปที่ 3.1 รูปแบบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (Electric and Magnetic pattern) ที่ใช้งานกันในโหมด $TE_{m,n}$ และ $TM_{m,n}$ ของท่อนำคลื่นแบบกลมแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดง โหมด TE และ TM ของท่อนำคลื่น

3.1.2 ความยาวคลื่นคัตออฟสำหรับท่อนำคลื่นแบบกลม

ในท่อนำคลื่นแบบกลม ความถี่ต่ำสุดที่สามารถส่งผ่านท่อนำคลื่นได้ คือ โหมด $TE_{1,1}$ ซึ่งถือว่าเป็นโหมดหลักในการส่งคลื่น (Principal mode) โหมดหลัก $TE_{1,1}$ ของท่อนำคลื่นแบบกลมเทียบได้กับโหมด TE_{10} ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ถ้าเปรียบเทียบรูปแบบของสนาม (Field pattern) จากโหมด TE_{10} กับโหมด $TE_{1,1}$ ในรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าไม่มีความคล้ายคลึงกันเลย แต่เมื่อท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกส่งด้วยคลื่นในโหมด TE_{10} และท่อนำคลื่นนี้นำไปต่อเข้ากับท่อนำคลื่นแบบกลมด้วยการเชื่อมต่อที่ดีไม่เกิดการมิสมแมทซ์คลื่นที่ผ่านเข้าไปในท่อนำคลื่นแบบกลมจะได้เป็น mode $TE_{1,1}$ เนื่องจากทั้งคู่เป็นโหมดหลักนั่นเอง

การหาความยาวคลื่นคัตออฟของท่อนำคลื่นแบบกลม โดยต้องใช้ค่ารากของเบสเซลฟังก์ชัน (Roots of Bessel functions) ซึ่งที่ความยาวคลื่นคัตออฟของโหมด TE_{nm} มีค่าเท่ากับ

$$\lambda_{cutoff} = \frac{2\pi r}{u'_{nm}} \tag{3.1}$$

โดยที่

λ_{cutoff} = ค่าความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดในท่อนำคลื่นสำหรับโหมดที่กำหนด, cm

r = รัศมีด้านในของท่อนำคลื่นแบบกลม

u'_{nm} = ค่ารากของสมการเบสเซล (มาจากตารางที่ 3.1 ก.)

ส่วนความยาวคลื่นคัตออฟของโหมด TE_{nm} มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_{cutoff} = \frac{2\pi r}{u_{nm}} \quad (3.2)$$

โดยที่

λ_{cutoff} = ค่าความยาวที่ยาวที่สุดในท่อนำคลื่นสำหรับ โหมดที่กำหนด, cm

r = รัศมีด้านในของท่อนำคลื่นแบบกลม

u_{nm} = ค่ารากของสมการเบสเซล (มาจากตารางที่ 3.1 (ข.))

ตารางที่ 3.1 ค่ารากของเบสเซล

ค่ารากเบสเซลสำหรับโหมด TE

$u'_{01} = 3.8821$	$u'_{02} = 7.016$
$u'_{11} = 1.841$	$u'_{12} = 5.332$
$u'_{21} = 3.054$	$u'_{22} = 6.706$
$u'_{31} = 4.201$	$u'_{32} = 8.031$

(ก)

ค่ารากเบสเซลสำหรับโหมด TM

$u_{01} = 2.405$	$u_{02} = 5.520$	$u_{03} = 8.654$
$u_{11} = 3.832$	$u_{12} = 7.016$	
$u_{22} = 5.136$		

(ข)

จากตารางที่ 3.1 (ก.) จะพบว่า u'_{11} มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งถ้านำไปแทนลงในสมการที่ 3.1 และทราบค่า r มากกว่าใช้ค่า u'_{11} หมายความว่าต้องใช้ท่อนำคลื่นแบบกลมขนาดใหญ่ขึ้น ด้วยเหตุนี้โหมด TE_{11} จึงถือว่าเป็นโหมดหลัก และเช่นเดียวกันในตารางที่ 3.1 (ข.) โหมด TM_{01} จะเป็นโหมดหลักสำหรับคลื่น TM เนื่องจากท่อนำคลื่นแบบกลมนั้นจะมีความสมมาตรในทุกด้านทุกมุม การหมุนท่อนำคลื่นไปในลักษณะใดจึงไม่มีผลต่อการส่งคลื่น ผิดกับท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเมื่อทำการหมุนจะเกิดเสียความสมมาตรและส่งผลกระทบต่อคลื่นที่ส่งผ่านท่อนำคลื่นด้วย

3.1.3 การใช้งานท่อนำคลื่นแบบกลม

การประยุกต์ใช้งานที่มีความสำคัญ และเหมาะสมมากที่สุดงานหนึ่ง ก็คือใช้เป็นโรตารีจอยท์ (Rotary joint) โรตารีจอยท์ซึ่งเราอาจเรียกง่าย ๆ ว่า ข้อต่อหมุน เป็นคอนเนคเตอร์หรือข้อต่อที่ต่อที่อยู่ระหว่างท่อนำคลื่น ทำให้สามารถหมุนท่อนำคลื่นด้านหนึ่งไปรอบตัวได้ โดยท่อนำคลื่นอีกด้านหนึ่งหยุดนิ่งอยู่กับที่ ตัวอย่างการใช้งานที่เราพบเห็นกันได้บ่อย ก็คือ ใช้ในสายอากาศเรดาร์แบบหมุนได้รอบตัว (Rotating radar antenna) ซึ่งเราไม่สามารถใช้ท่อนำคลื่นชนิดอื่น เช่น ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นต้น แทนที่โดยไม่เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณ ท่อนำคลื่นแบบกลมนี้มีความสมมาตรรอบตัวอยู่แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารหลังพิมพ์และได้รับการแก้ไขเนื้อหาบางส่วนเพื่อให้อ่านง่ายขึ้น และอยู่ภายใต้ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ H ก็ตาม ดังนั้นงานที่ต้องการหลีกเลี่ยงการเกิดสัญญาณสะท้อนกลับ จึงนิยมใช้ลักษณะความสมมาตรของท่อนำคลื่นแบบกลมให้เป็นประโยชน์ เช่น ใช้เป็นข้อต่อหมุน เป็นต้น

3.2 สนามของท่อนำคลื่นแบบกลม

จากรูปที่ 3.3 โหมดหลัก ทำงานในรูปแบบ TE_{11} mode ซึ่งสนามไฟฟ้าจะกระจายทั่วพื้นที่หน้าตัดตั้งในสมการ 3.16 และ 3.17

$$E_\rho = \frac{2 \sin \phi}{\rho} J_1 \left(1.84 \frac{\rho}{a} \right) \quad (3.3)$$

$$E_\theta = \frac{2a \cos \phi}{1.84} \frac{dJ_1 \left(1.84 \frac{\rho}{a} \right)}{d\rho} \quad (3.4)$$

เมื่อ a คือรัศมี และ J_1 คือ เบสเซลฟังก์ชัน แบบที่ 1 Order ที่ 1 และ ρ คือ รัศมีของ โคออดิเนตทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.3 ในโคออดิเนตทรงสี่เหลี่ยม แสดงการกระจายของสนามดังนี้

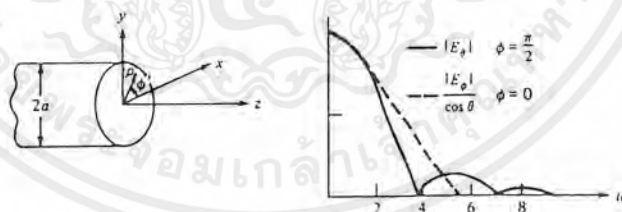
$$E_x = E_\rho \cos \phi - E_\theta \sin \phi \quad (3.5)$$

$$E_y = E_\rho \sin \phi + E_\theta \cos \phi \quad (3.6)$$

สำหรับ E_ρ, E_θ สามารถใช้ความสัมพันธ์ของรีเคอร์เรนซ์ (Recurrence relations) ดังนี้

$$\frac{dJ_1(u)}{du} = \frac{1}{2} [J_{m-1}(u) - J_{m+1}(u)] \quad (3.7)$$

$$\frac{m}{u} J_m(u) = \frac{1}{2} [J_{m-1}(u) + J_{m+1}(u)] \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.3 ท่อนำคลื่นแบบกลม และแพทเทิร์น

เราจะได้ว่าดังนี้

$$E_x = J_2 \left(1.84 \frac{\rho}{a} \right) \sin 2\phi \quad (3.9)$$

$$E_y = J_0 \left(1.84 \frac{\rho}{a} \right) - J_2 \left(1.84 \frac{\rho}{a} \right) \cos 2\phi \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเราสมมุติว่าสนามที่ปากเปิด ก็สามารถหาค่าสนามที่แพร่กระจายได้ ในส่วนของการหา f_x และ f_y โดยการอินทิเกรตตลอดปากเปิด

$$\begin{aligned} k_x x' + k_y y' &= k_0 \rho \sin \phi (\cos \phi \cos \phi' + \sin \phi \sin \phi') \\ &= k_0 \rho \sin \phi \cos(\theta - \phi) \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\int u J_n(\alpha u) J_n(\beta u) = \frac{u}{\alpha^2 + \beta^2} \left[J_n(\alpha u) \frac{dJ_n(\beta u)}{du} - J_n(\beta u) \frac{dJ_n(\alpha u)}{du} \right] \quad (3.12)$$

โดยใช้การกระจายฟังก์ชัน $\exp(jk_0 \rho \sin \theta \cos(\phi - \phi'))$ แล้วใช้สูตร Lommel Integral ดังนี้

$$E_\theta = \frac{jk_0}{r} e^{jk_0 r} 2a^2 \sin \phi \frac{J_1(1.84) J_1(u)}{1.84} \quad (3.13)$$

$$E_\phi = \frac{jk_0}{r} e^{-jk_0 r} 2a^2 \cos \phi \cos \theta \left[\frac{1.84 J_1(1.84)}{1.84^2 - u^2} \frac{dJ_1(u)}{du} \right] \quad (3.14)$$

เมื่อ $u = k_0 a \sin \theta$

ในระนาบ $\phi = \pi/2$ เป็นระนาบของแพทเทิร์นสนามไฟฟ้า E และในระนาบ $\phi = 0$ เป็นระนาบของแพทเทิร์นสนามแม่เหล็ก H

เราจะหาค่าไดเรคทิวิตีได้โดย

$$D = \frac{66 \pi a^2}{\beta \lambda_0 \lambda_0^2} \quad (3.15)$$

เมื่อ $\beta = \left[k_0^2 - \left(\frac{1.84}{a} \right)^2 \right]^{1/2}$ ซึ่งเป็นค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (Propagation -Constant) สำหรับคลื่น TE_{11} โหมด

3.3 การเดินทางของคลื่นในท่อนำคลื่น

คลื่น 2 ชุด เดินทางไปตามท่อนำคลื่นแบบซิกแซกเป็นรูปพื้นปลาด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของแสงเมื่อคิดคลื่นลัพธ์ (Resultant) ออกมาจะมีทิศทางของเวกเตอร์ชี้ไปตามแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่น ความเร็วของคลื่นลัพธ์นี้ที่เดินทางไปในแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่นนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางรูปพื้นปลา ลัพธ์จะมีค่าน้อยกว่าความเร็วแสงเสมอ และเรียกว่า ความเร็วคลื่นกลุ่ม v_g (Group velocity) ความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นตกกระทบ และความเร็วคลื่นกลุ่ม v_g ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะเห็นว่าหน้าคลื่นของคลื่นตกกระทบขนานกับด้านข้างของหน้าคลื่นด้วยมุม θ และสะท้อนออกไปด้วยมุมที่เท่ากัน ระยะทางของคลื่นลัพธ์ที่เดินทางไปตามกึ่งกลางของท่อนำคลื่น ในเวลาที่กำหนด t มีค่าเป็น

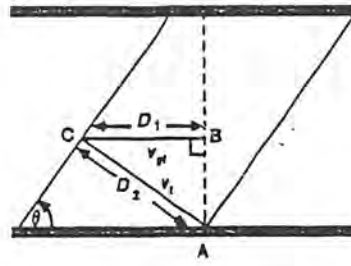
$$\text{ระยะทาง} = \text{ความเร็ว} * \text{เวลา}$$

จากรูปที่ 3.4 คลื่นลัพธ์ซึ่งเดินทางไปตามแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่นได้ระยะทาง D_1 ในเวลา t และ D_1 จะมีค่าเท่ากับ

$$D_1 = v_g \cdot t = D_2 = v \cdot t \quad (3.16)$$

$$\sin \theta = \frac{v_g \cdot t}{v \cdot t} \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การเดินทางของในท่อนำคลื่น

จากเวกเตอร์ลัพธ์ของความเร็วลำคลื่นนี้ คลื่นจะมีความเร็วลดลง เพราะมุมตกกระทบของคลื่นจะน้อยกว่า 90 องศาเสมอ

$$\cos \theta = \frac{\lambda}{2a} \quad (3.18)$$

$$\sin \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \theta} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad (3.19)$$

$$\therefore v_g = v \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad (3.20)$$

$$\sin \theta = \frac{\lambda/2}{\lambda_g/2} = \frac{\lambda}{\lambda_g} \quad (3.21)$$

$$\therefore \lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (3.22)$$

3.4 ชนิดและการใช้งานสายอากาศแบบฮอร์น

โดยทั่วไปสายอากาศแบบฮอร์น เป็นอุปกรณ์ที่มีผลในการส่งผ่านระหว่างการแพร่กระจายคลื่นในสายอากาศกับท่อนำคลื่นและการแพร่กระจายของคลื่นผ่านตัวกลางไปจนถึงสูญญากาศ (Free Space)

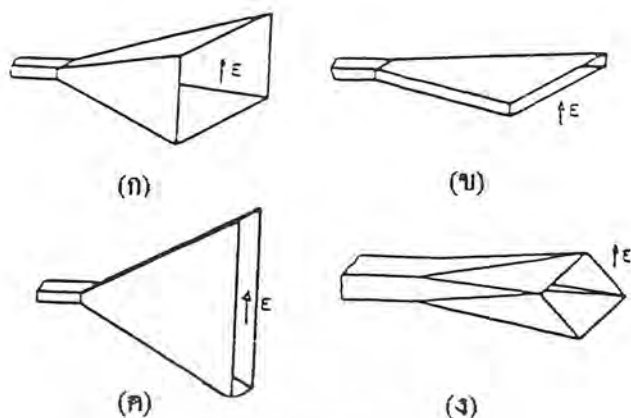
โครงสร้างโดยทั่วไปของ สายอากาศแบบฮอร์น จะขึ้นอยู่กับขนาดของรูปร่าง เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์และคุณสมบัติของสายอากาศ เช่น เกน (Gain) แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น

(Radiation Pattern) และอิมพีแดนซ์ (Impedance) จากรูปที่ 3.5 แสดงสายอากาศแบบฮอร์นชนิดสี่เหลี่ยม

รูปที่ 3.5 ก. แสดงสายอากาศฮอร์นแบบปริมาตร ซึ่งสามารถกำหนดมาตรฐานเบื้องต้นโดยจะคำนวณเกนเริ่มต้นตั้งแต่ 0.1 dB เมื่อเรารู้ขนาดของฮอร์นและส่วนที่สำคัญในการควบคุม ปริมาตรของฮอร์นคือเราสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดของพื้นที่ของการรับคลื่นที่ ปากของฮอร์น

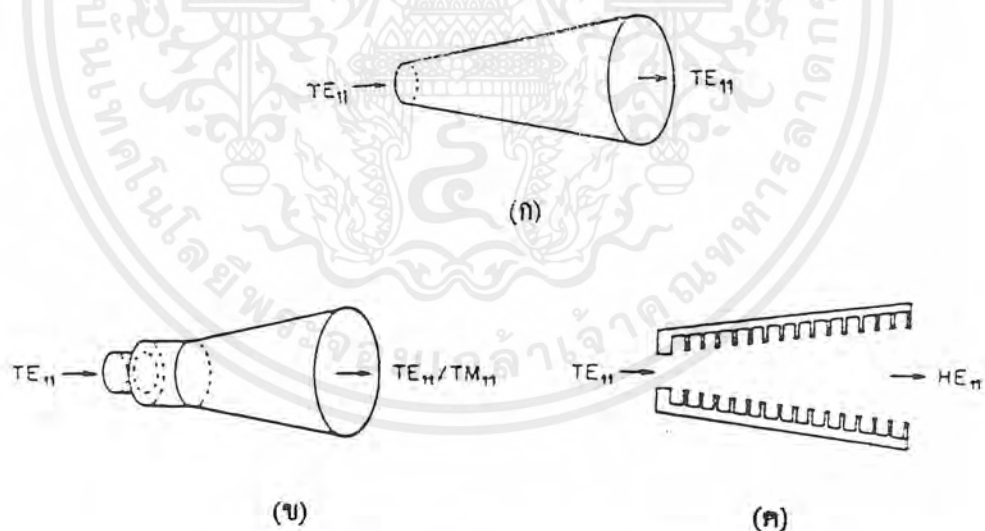
รูปที่ 3.5 ข. และ ค. แสดงสายอากาศแบบเซกเตอร์ฮอร์น (Sectoral Horn) มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางเดียว โดยมันจะแพร่กระจายคลื่นออกไปในลักษณะปริมแบบพัด (Fan Shape) ซึ่งปริมจะกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงสายอากาศแบบฮอร์นชนิดสี่เหลี่ยม

รูปที่ 3.5 ง. แสดงสายอากาศแบบ Diagonal Horn จะมีลักษณะพิเศษกว่าสายอากาศที่กล่าวมาแล้ว พื้นที่ที่ปากฮอร์นมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สนามไฟฟ้าจะแพร่กระจายออกไปขนานกับปากของฮอร์นแพทเทิร์นในการแพร่กระจายคลื่นจะอยู่ในระดับสูงในลักษณะสมมาตรกันทั้งสองด้าน



รูปที่ 3.6 แสดงสายอากาศฮอร์นแบบกรวย (Conical Horn)

รูปที่ 3.6 แสดงสายอากาศฮอร์นแบบกรวย (Conical Horn) ซึ่งมีข้อดีดังนี้ คือ จะมีรูปทรงที่สมมาตรกันและสามารถที่จะทำให้อยู่ในโหมดหลัก (Dominant Mode, TE_{11}) ในทางปฏิบัติจะเหมาะสมกับโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular Polarization) แม้ว่ารูปทรงจะสมมาตรกัน บีมวิดท์ที่อยู่ในระนาบโดยทั่วไปจะไม่เท่ากันเหมือนสายอากาศฮอร์นแบบปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

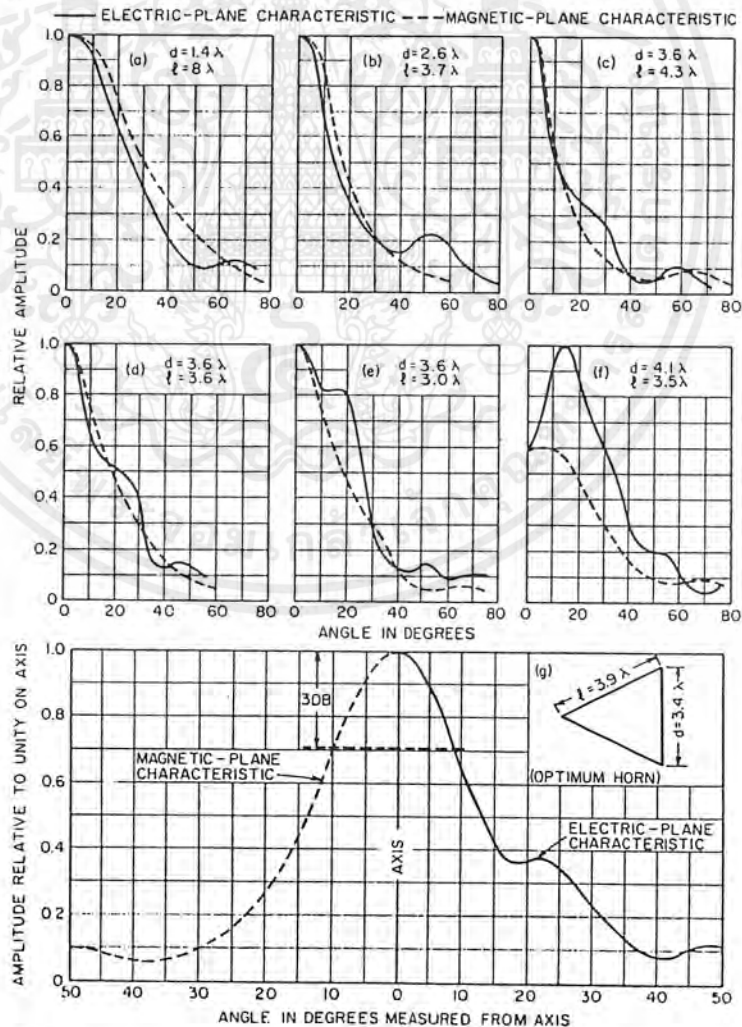
รูปที่ 3.6 แสดงสายอากาศฮอร์นแบบกรวยกลม (Conical Horn) ซึ่งมีข้อดีดังนี้ คือ จะมีรูปทรงที่สมมาตรกันและสามารถที่จะทำให้อยู่ในโหมดหลัก (Dominant Mode, TE_{11}) ในทางปฏิบัติจะเหมาะสมกับโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular Polarization) แม้ว่ารูปทรงจะสมมาตรกัน บีมวิดท์ที่อยู่ในระนาบ โดยทั่วไปจะไม่เท่ากันเหมือนสายอากาศฮอร์นแบบพีรามิด

สองโหมด (Dual Mode) และฮอร์นแบบลูกฟูก (Corrugate Horn) จากรูปที่ 3.6 ข และ ค การแพร่กระจายคลื่นไม่สมมาตรกัน Dual Mode จะแพร่กระจายคลื่นจะมี 2 ลักษณะ คือ ในช่วงแรกจะเป็น แต่ตรงปากฮอร์นจะมีการแพร่กระจายแบบ TM_{11} ในรูปที่ 3.6 ค. การแพร่กระจายคลื่นมีลักษณะผสมกันระหว่าง TE_{11} กับ TM_{11} เรียกว่า HE_{11}

3.5 โหมดหลักของฮอร์นแบบกรวยกลม (Dominant Mode Conical Horn)

3.5.1 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น

สายอากาศฮอร์นแบบกรวย (Conical Horn) ป้อนคลื่นด้วยท่อนำคลื่นแบบกลมในโหมด TE_{11} ซึ่งจะคล้ายกับสายอากาศฮอร์นแบบพีรามิด (Pyramidal Horn) จะถูกกระตุ้นโดยท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมในโหมด TE_{10} และมีคุณสมบัติบางประการที่คล้ายคลึงกับ สายอากาศฮอร์นแบบกรวยกลม



รูปที่ 3.7 แสดงแพทเทิร์นของฮอร์นแบบกรวยกลมที่เส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลจากการทดลองหาแพทเทิร์นของสายอากาศฮอร์นแบบกรวยของ King ที่ แสดงในรูปที่ 3.7 นั้น ได้มาจากการทดลองเมื่อ 40 ปีที่แล้ว แพทเทิร์นของสายอากาศฮอร์นแบบกรวยได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางของปากเปิดของกรวยกลมในช่วง $1.4 < \frac{d}{\lambda} < 4.3$ มีค่าเฟสแฟคเตอร์ (Phase factor) $s = d^2 / 8l\lambda$ อยู่ระหว่าง 0.03 - 0.6 จาก $s = d^2 / 8l\lambda$ ซึ่ง l คือค่าความยาวลาดเอียงของฮอร์น และ L คือค่าความยาวของฮอร์น มุมขยายออกของฮอร์น สามารถหาได้จากสมการที่ 3.23

$$\tan \theta_f = \frac{d}{2L} \text{ or } \sin \theta_f = \frac{d}{2L} \quad (3.23)$$

ฮอร์นในรูปที่ 3.7a และ b มีเส้นผ่าศูนย์กลางของปากเปิดน้อยกว่าค่าที่ดีที่สุด (Optimum) ฮอร์นในรูปที่ 3.7c มีค่าใกล้เคียงกับค่าออฟติมัม ในส่วนของรูปที่ 3.7g แสดงแพทเทิร์น ออฟติมัม โดยขนาดของฮอร์นในรูปที่ 3.7g นี้เป็นตัวอย่าง ซึ่งให้ค่าเกินสูงที่สุด แม้ว่าจะมีแพทเทิร์นของฮอร์นที่มีขนาดแตกต่างกันเพียง 6 แพทเทิร์น แต่สามารถใช้ในการประมาณแพทเทิร์นของฮอร์น ที่มีขนาดต่างๆ ได้ โดยใช้ค่าเฟสแฟคเตอร์ (s) ที่ใกล้เคียงกัน ตัวอย่างเช่น ปากเปิดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง $d = 6\lambda$ ซึ่งไม่มีในรูปที่ 3.7 และถ้าฮอร์นยาว $l = 10\lambda$ ดังนั้นจะได้ $s = 0.45$ ซึ่งในรูปที่ 3.7d มีค่า s ที่ใกล้เคียงกับ 0.45 เพราะฉะนั้นแพทเทิร์นฮอร์นนี้อาจใช้แพทเทิร์นในรูปที่ 3.7d นี้

3.5.2 เกนของฮอร์นแบบกรวยกลม (Gain)

กราฟในรูปที่ 3.7 แสดงค่าเกน (dB) ของสายอากาศฮอร์นแบบกรวยกลม ที่ขนาดต่างกัน มีค่าพารามิเตอร์ $\frac{L}{\lambda}$ ที่ เป็นความยาวแกนของฮอร์น การหาอัตราการขยายของฮอร์นแบบกรวย สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ ดังสมการที่ 3.24 และ 3.25

$$G = \left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)^2 R \quad (3.24)$$

$$\text{Gain (dB)} = 20 \log\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right) - L \quad (3.25)$$

เมื่อ R และ L มีค่าใกล้เคียงกับของเซคเตอร์ฮอร์น ค่าการสูญเสีย L แสดงในรูปที่ 3.7 L คือ ค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็นเดซิเบล และค่า $S = d^2 / 8l\lambda$ เมื่อ l คือความยาวลาดเอียงกรณี $S = 0$ ซึ่งก็คือท่อนำคลื่นแบบกลม โดยแพร่กระจายคลื่นในโหมด TE_{11} สามารถคำนวณหาเกนได้โดยสมการที่ 3.26

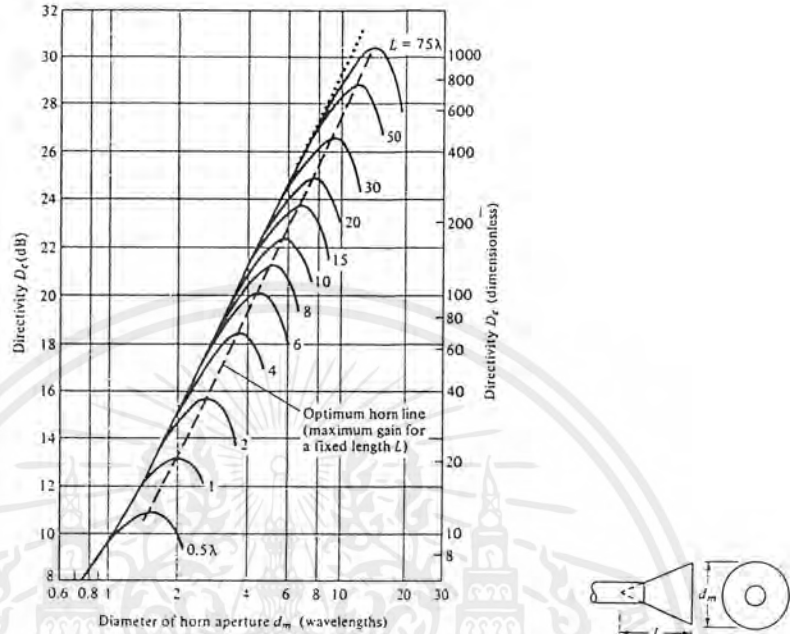
$$G = \left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)^2 \frac{\left| \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_g} + \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_g} + \Gamma}} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_g} - \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_g}}} \right) \right|^2}{2(\rho'_{11}{}^2 - 1)(1 - |\Gamma|^2)} \quad (3.26)$$

เมื่อ $\rho'_{11} = 1.841$ คือค่ารากที่หนึ่งของ $J'_1(\rho) = 0$ และ Γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ปากฮอร์น สำหรับกรณีที่ ปากฮอร์น มีขนาดใหญ่่มาก ๆ อัตราการขยายสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 3.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G = 0.83 \left(\frac{\pi d l}{\lambda} \right)^2 \tag{3.27}$$

จากสมการที่ 3.27 ค่า $R=0.837$ สำหรับฮอร์นที่มีขนาดยาว และค่า $S=0$ สำหรับค่า $L=0.773$ dB ดูจากรูปที่ 3.7 ค่าของ R ในของฮอร์นแบบกรวยกลม มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง



รูปที่ 3.8 ค่าเกณฑ์ที่เหมาะสม สำหรับฮอร์นแบบกรวย

3.5.3 เกณฑ์ของฮอร์นแบบกรวยกลมที่สูงที่สุด

จากรูปที่ 3.8 เส้นประในรูปแสดงค่าเกณฑ์สูงสุด และขนาดของฮอร์นในรูปของ $(d/\lambda), (L/\lambda)$ ที่เกณฑ์สูงสุด จากการทดลอง ได้สมการที่คำนวณหาเกณฑ์ได้จากสมการที่ 3.28

$$Gain(dB) = 7.0 + 20.6 \log \frac{d}{\lambda} \tag{3.28}$$

เมื่อความมากน้อยของขนาด $d^2 / 8L\lambda$, L คือ ความยาวของแกน การหาค่าอัตราขยายสูงสุดจากรูปที่ 3.7 มีการเปลี่ยนแปลงค่า $L = 0.5 \lambda$ ถึง $L = 75 \lambda$ สำหรับค่าความลาดเอียงสามารถหาได้โดย เมื่อเรารู้ค่าของ l และ d โดยใช้สูตรจากสมการที่ 3.29

$$l = L^2 + \frac{d^2}{4} \tag{3.29}$$

ถ้าคำนวณหาค่า s ได้ระหว่าง 0.30 - 0.375 ขนาดของที่เหมาะสมของฮอร์นแบบกรวย (Obtimum Conical Horn) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.30

$$d = \sqrt{n\lambda l} \quad \text{เมื่อ } n \text{ มีค่าอยู่ระหว่าง 2.4 และ 3.0} \tag{3.30}$$

3.5.4 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบฮอร์น (Impedance)

คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ของฮอร์นจะเกิดขึ้นระหว่างปากฮอร์นกับ Free Space ความยาวของรัศมีของท่อนำคลื่นระหว่าง Horn Aperture และบริเวณช่วงคอและการแมทซ์ที่รอยต่อของท่อนำคลื่น และช่วงคอของฮอร์น VSWR ของระนาบ E-PLANE ของฮอร์นโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 1.05 และ 1.5 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความลาดเอียงของฮอร์นจะไม่คงที่ ความยาวในท่อนำคลื่นของ E-PLANE ในฮอร์นจะเท่ากับ ความยาวของท่อนำคลื่นแบบวงกลม

อินพุทอิมพีแดนซ์ของ H-PLANE ของฮอร์น จะแตกต่างจาก E-PLANE การแมทช์ที่รอยต่อของฮอร์นกับท่อนำคลื่นที่มีขนาดเล็กกว่าพื้นที่รับคลื่นที่ปากฮอร์น ผลที่ได้ก็คือ อินพุท VSWR ของ H-PLANE ฮอร์นจะมีขนาดคงที่ และจะมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสกับความยาวของฮอร์นที่เปลี่ยนไป

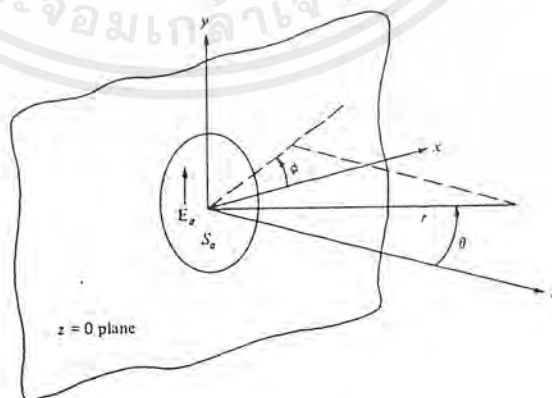
3.6 สายอากาศแบบอะพอร์เจอร์ (Aperture Antenna)

สายอากาศแบบเส้นลวด สามารถวิเคราะห์ได้ในเทอมของกระแสที่แฉกรูปอยู่บนสายอากาศนั้น มีสายอากาศอีกชนิดหนึ่งเรียกว่าสายอากาศแบบอะพอร์เจอร์ (Aperture Antennas) ซึ่งการแผ่กระจายคลื่นที่เกิดจาก โครงสร้างซึ่งมีลักษณะเป็นช่องเปิด สายอากาศแบบนี้ที่พบบ่อยๆ ได้แก่ สายอากาศสะท้อนคลื่นรูปทรงพาราโบลอย (Paraboloidal Reflector Antenna) และสายอากาศปากแตร (Horn-Antenna) สายอากาศแบบอะพอร์เจอร์จะต้องมีความกว้างและความยาวของอะพอร์เจอร์อย่างน้อยหลายเท่าของความยาวคลื่นเพื่อให้มีเกนสูง จึงมักจะพบว่ามีการใช้สายอากาศแบบนี้มากในย่านความถี่ไมโครเวฟซึ่งมีความยาวคลื่นเพียงไม่กี่เซนติเมตร

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่จำเป็นสำหรับการคำนวณสนามที่แผ่กระจาย จากสายอากาศในเทอมของสนามที่แฉกรูปอยู่บนอะพอร์เจอร์ ซึ่งสมมุติว่าเราทราบค่าอยู่แล้ว ทฤษฎีนี้คล้ายกับทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณสนามที่เกิดจากการแฉกรูปกระแสบนเส้นลวดที่เรา รู้ค่าอยู่แล้ว

3.7 การแผ่กระจายคลื่นจากอะพอร์เจอร์ระนาบ : วิธีฟูเรียร์ทรานซฟอร์ม

วิธีการแรกที่จะใช้ในการหาสนามที่แผ่กระจายจากอะพอร์เจอร์ระนาบ คือจะใช้ฟูเรียร์ทรานซฟอร์ม (Fourier Transform) สิ่งสำคัญของวิธีนี้อยู่ที่มันแสดงให้เห็นว่า แพทเทิร์นของสนามที่แผ่กระจาย



รูปที่ 3.9 อะพอร์เจอร์ในระนาบ $Z = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลายเป็นฟูรีเยร์ทรานซฟอร์มของสนามที่อยู่บนอะเพอร์เจอร์ทำให้เราสามารถ ใช้คุณสมบัติต่าง ๆ ของคู่ฟูรีเยร์ทรานซฟอร์มในการทำนายคุณสมบัติของสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ได้

ในรูป 3.8 มีอะเพอร์เจอร์ อยู่ในระนาบ $Z=0$ สมมุติว่าเรารู้ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับผิวของอะเพอร์เจอร์ และให้มีค่าเป็น \bar{E}_a เราต้องการหาสนามที่แพร่กระจายในบริเวณ $Z>0$ จะสามารถคิดได้ว่าสนามที่อะเพอร์เจอร์เกิดจากคั่นกำเนิดตัวหนึ่งในบริเวณ $Z<0$ แต่เราไม่จำเป็นต้องรู้รายละเอียดของคั่นกำเนิดนี้ เพราะสนาม \bar{E}_a บนอะเพอร์เจอร์จะเป็นตัวกำหนดในมาในครึ่งสเปส $Z>0$ แต่เพียงผู้เดียว

ถ้ามีฟังก์ชันของ x เป็น $w(x)$ ฟูรีเยร์ทรานซฟอร์มของฟังก์ชันนี้จะมีค่าดังนี้คือ

$$w(k_x) = \int_{-\infty}^{\infty} w(x)e^{jk_x x} dx \quad (3.31a)$$

และค่าอินเวิร์ซ (Inverse) ฟูรีเยร์ทรานซฟอร์มของมันจะเป็นดังนี้

$$w(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(k_x)e^{-jk_x x} dk_x \quad (3.31b)$$

ตัวแปร k_x และ x เทียบเคียงได้กับเวลา t และความถี่เชิงเส้น ω ในการวิเคราะห์ฟูรีเยร์ของสัญญาณ ทำนองเดียวกันถ้าเรามีฟังก์ชันของทั้ง x และ y คือ $u(x,y)$ เราสามารถใช้ฟูรีเยร์ทรานซฟอร์ม กับทั้งสองตัวแปรนี้ได้ดังนี้

$$U(k_x, k_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} u(x,y)e^{jk_x x + jk_y y} dx dy \quad (3.32a)$$

ซึ่งค่าอินเวิร์ซฟูรีเยร์ทรานซฟอร์มจะมีค่าเป็นดังนี้คือ

$$u(x,y) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} U(k_x, k_y)e^{-jk_x x - jk_y y} dk_x dk_y \quad (3.32b)$$

สองสมการนี้เป็นสมการพื้นฐานที่จะใช้ต่อไป

จากสมการแมกซ์เวลล์ สามารถแสดงได้ว่าสนามไฟฟ้าเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$\nabla_x \nabla_x \bar{E} - k^2 \bar{E} = -j\omega\mu_0 \bar{J}_0 \quad (3.33)$$

ในที่นี้ $\nabla_x \nabla_x \bar{E} - k^2 \bar{E} = \nabla \nabla \cdot \bar{E} - \nabla^2 \bar{E}$ ในบริเวณ $Z>0$ ทั้ง J และ p จะเป็นศูนย์ ดังนั้น $\nabla \cdot \bar{E} = 0$ และสมการที่สนามไฟฟ้า \bar{E} สองคล้องด้วยจะเป็นกลายเป็นดังนี้คือ

$$\nabla^2 \bar{E} + k_0^2 \bar{E} = 0 \quad (3.33a)$$

$$\nabla \cdot \bar{E} = 0 \quad (3.33b)$$

ในฟูรีเยร์ทรานซฟอร์มมีคุณสมบัติว่า

$$\mathfrak{F}_r \frac{ds(t)}{dt} = j\omega \mathfrak{F}_r s(t) \quad (3.34)$$

นั่นคือฟูรีเยร์ทรานซฟอร์มของอนุพันธ์ ของฟังก์ชันเทียบกับเวลามีค่าเท่ากับ เท่าของฟูรีเยร์ทรานซฟอร์มของฟังก์ชันนั้น ในลักษณะเดียวกันจะได้ว่า

$$\mathfrak{F}_r \frac{\partial u(x,y)}{\partial x} = -jk_x \mathfrak{F}_r u(x,y) \quad (3.35a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathfrak{I}_x \frac{\partial^2 u(x,y)}{\partial x^2} = (-jk_x)^2 \mathfrak{I}_x u(x,y) \quad (3.35b)$$

$$\mathfrak{I}_{yx} \frac{\partial^2 u(x,y)}{\partial x^2} = -k_x^2 \mathfrak{I}_{yx} u(x,y) \quad (3.35c)$$

อักษรห้อยท้ายในสมการข้างบน แสดงว่าทำฟูเรียร์ทรานซฟอร์มเทียบกับอักษรห้อยท้ายนั้นมีเครื่องหมายลบใน (3.35a) แต่ไม่มีใน (3.34) เพราะ x เทียบได้กับ ω และ k_x เทียบได้กับ t ในสมการพื้นฐาน (3.31a)

เมื่อกระจาย (3.33a) และ (3.33b) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 \right) E(x,y,z) = 0 \quad (3.36a)$$

$$\frac{\partial E_x(x,y,z)}{\partial x} + \frac{\partial E_y(x,y,z)}{\partial y} + \frac{\partial E_z(x,y,z)}{\partial z} = 0 \quad (3.36b)$$

ถ้าทำฟูเรียร์ทรานซฟอร์มทั้งสองสมการนี้เทียบกับ x และ y จะได้

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0^2 + k_x^2 + k_y^2 \right) E(k_x, k_y, z) = 0 \quad (3.37a)$$

$$k_x E_x(k_x, k_y, k_z) + k_y E_y(k_x, k_y, k_z) + j \frac{\partial E_z(k_x, k_y, k_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.37b)$$

โดยที่ $E(k_x, k_y, z)$ เป็นฟูเรียร์ทรานซฟอร์มของสนามไฟฟ้าเทียบกับ x และ y เราใช้สัญลักษณ์ \bar{E} เหมือนกัน แต่อาร์กิวเมนต์ (Argument) ต่างกัน เพื่อแสดงว่า $E(k_x, k_y, z)$ เป็นฟังก์ชันที่ต่างจาก $E(x, y, z)$ ถ้ากำหนดให้

$$k_z^2 = k_0^2 - k_x^2 - k_y^2 \quad (3.38)$$

(3.37a) จะกลายเป็นดังนี้คือ

$$\frac{\partial^2 \bar{E}(k_x, k_y, z)}{\partial z^2} + k_z^2 \bar{E}(k_x, k_y, z) = 0 \quad (3.39)$$

ซึ่งมีคำตอบอยู่ในลักษณะของ $e^{\pm jk_z z}$ แต่เนื่องจากสนามควรประกอบด้วยคลื่นที่เดินทางออกจากอะเพอร์เจอร์ตามทิศทาง z เพราะฉะนั้นจะมีเฉพาะ $e^{-jk_z z}$ เท่านั้น ซึ่งจะได้คำตอบทั่วไปของ (3.39) เป็นดังนี้

$$\bar{E}(k_x, k_y, z) = \bar{f}(k_x, k_y) e^{-jk_z z} \quad (3.40)$$

เมื่อ $\bar{f}(k_x, k_y)$ เป็นฟังก์ชันที่เราจะต้องหา

หลังจากที่แทน (3.40) ลงใน (3.37b) จะพบว่า

$$k_x \bar{f}_x + k_y \bar{f}_y + k_z \bar{f}_z = 0 \quad (3.41a)$$

หรือ

$$\bar{k} \cdot \bar{f} = 0 \quad (3.41b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ \vec{k} เป็นเวกเตอร์ที่มีส่วนประกอบเป็น k_x, k_y, k_z (3.41) บอกให้เราทราบว่า มีเฉพาะสองส่วนประกอบของเวกเตอร์ \vec{f} เท่านั้นที่เป็นอิสระต่อกัน ซึ่งผลอันนี้จะส่งผลบังคับให้สนามไฟฟ้าถูกกำหนดโดยการที่ไดเวอร์เจนซ์ ที่เป็นศูนย์ ดังแสดงใน (3.33b) และ (3.36b)

เมื่อทำอินทิกรัลฟูเรียร์ทรานซฟอร์ม จะเขียนสมการไฟฟ้าได้เป็นดังนี้

$$E(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \vec{f}(k_x, k_y) e^{-j\vec{k}\cdot\vec{r}} dk_x dk_y \quad (3.42)$$

โดยที่ $\vec{k}\cdot\vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z$ สมการนี้มีความหมายว่าสนามไฟฟ้าใดๆ ในครึ่งสเปซ $Z > 0$ สามารถแสดงได้ว่าเป็นสเปกตรัม (Spectrum) ของคลื่นระนาบที่เกิดจาก $\vec{f}(k_x, k_y) e^{-j\vec{k}\cdot\vec{r}}$ ซึ่งเป็นคลื่นระนาบที่มีขนาด \vec{f} เดินทางในทิศทางของเวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ \vec{k} จะเห็นว่า $|\vec{k}| = k_0$ ถ้า $k_x^2 + k_y^2 < k_0^2$ ค่าคงที่ของการเคลื่อนที่ k_z จะเป็นค่าจินตภาพ และคลื่นระนาบในส่วนของสเปกตรัมจะมีค่าลดลงอย่างเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) ในทิศทาง z คลื่นที่มีขนาดลดลงไปนี้จะเป็นสนามระยะใกล้อะเพอร์เจอร์เฉพาะคลื่นระนาบที่มาจากส่วนของสเปกตรัมที่มีค่า $k_x^2 + k_y^2$ อยู่ในวงกลมรัศมี k_0 ในระนาบ $k_x - k_y$ เท่านั้นที่จะทำให้เกิดคลื่นที่แพร่กระจาย ทั้งนี้เนื่องจากคลื่นเหล่านี้เป็นคลื่นที่เดินทางออกไป

เมื่อ $Z = 0$ ค่าส่วนประกอบ x และ y ของสนามไฟฟ้าต้องมีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้าที่สัมผัสกับอะเพอร์เจอร์ซึ่งเรารู้ค่า ดังนั้นถ้าให้ \vec{f}_t แทนส่วนประกอบ x และ y ของ \vec{f} จะต้องได้ว่า

$$\begin{aligned} \vec{E}_a(x, y) &= \vec{E}_{\text{tan}}(x, y, 0) \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \vec{f}(k_x, k_y) e^{-jk_x x - jk_y y} dk_x dk_y \end{aligned} \quad (3.43)$$

เราสามารถคิดได้ว่าสมการข้างบนนี้เป็นฟูเรียร์ทรานซฟอร์ม 2 มิติ เพราะฉะนั้นจาก (3.32a) จะหาได้ว่า

$$\vec{f}_t(k_x, k_y) = \iint_{S_a} \vec{E}_a(xy) e^{jk_x x + jk_y y} dx dy \quad (3.44)$$

จะเห็นว่า \vec{f}_t มีค่าอยู่ในเทอมของฟูเรียร์ทรานซฟอร์มของสนามบนอะเพอร์เจอร์ จาก (3.41b) สามารถหา f_z ได้ว่ามีค่าดังนี้คือ

$$f_z = \frac{-\vec{k}_t \cdot \vec{f}_t}{k_z} = \frac{-k_x f_x - k_y f_y}{\sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}} \quad (3.45)$$

ถึงตอนนี้เราได้คำตอบของสนามไฟฟ้า ณ ทุกๆ แห่งในบริเวณ $Z > 0$ แล้ว ถ้าสามารถหาอินทิกรัลใน (3.42) ได้ โดยทั่วไปการคำนวณทำได้ยาก นอกจากจะคำนวณในบริเวณที่ r มีค่ามาก เมื่อเทียบกับ λ_0 นั่นคือ $k_0 r$ มีค่ามาก เนื่องจากเราสนใจสนามที่แพร่กระจายออกไป ดังนั้นสิ่งที่เราต้องการทราบคือค่าประมาณของ (3.42) เมื่อ r มีค่าเข้าสู่อนันต์ ซึ่งประมาณได้ว่ามีค่า

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{jk_0 \cos\theta}{2\pi r} e^{-jk_0 r} \vec{f}(k_0 \sin\theta \cos\phi, k_0 \sin\theta \sin\phi) \quad (3.46)$$

เมื่อ θ และ ϕ เป็นมุมในระบบโคออดิเนตทรงกลม ดังแสดงในรูป 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้แสดงว่าสนามที่แพร่กระจายในระยะไกล ซึ่งเป็นดิฟแฟรคชันแพทเทิร์น (Diffraction Pattern) ของสนามที่อะเพอร์เจอร์ สัมพันธ์กับฟูรีเยร์ทรานซฟอร์มของสนามที่อะเพอร์เจอร์ที่ทำให้ค่า $k_x = k_0 \sin\theta \cos\phi$ และ $k_y = k_0 \sin\theta \sin\phi$ อันนี้เป็นส่วนประกอบสำคัญของเวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ สำหรับคลื่นที่เดินทางออกตามแนวรัศมี r ในทิศทางที่ถูกกำหนดโดยมุม θ และ ϕ ในการคำนวณค่า \vec{f}_i จะทำการอินทิเกรตตลอดแกน x และ y ในระนาบ $Z=0$ ซึ่งสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสมีค่าไม่เป็นศูนย์ ถ้า S_a เป็นขอบเปิดหรืออะเพอร์เจอร์ในฉากตัวนำสมบูรณ์ ดังนั้นทุกๆ แห่งนอก S_a จะมีสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสเป็นศูนย์

สำหรับอะเพอร์เจอร์ที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น \vec{f}_i จะมีค่าสูงสุดอยู่ในทิศทางแนวแกน Z และในทิศทางนี้ f_z จะน้อยมาก และ $\cos\theta \approx 1$ ดังนั้นสนามที่แพร่กระจายจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า \vec{f}_i มาก ในบริเวณนี้ และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับฟูรีเยร์ทรานซฟอร์มของสนามที่อยู่บนอะเพอร์เจอร์

เนื่องจาก $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ ดังนั้น $\vec{k} \cdot \vec{f} = 0$ จะไม่มีส่วนประกอบในทิศทางของการสังเกต ซึ่งเป็นทิศทางของเวกเตอร์การเคลื่อนที่ \vec{k} สนามจึงเป็นแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวาง (TEM Wave) ในบริเวณที่คลื่นกระจายตามแกน z $\cos\theta = 1$ และ $\vec{E}(\vec{r})$ มีเฉพาะส่วนประกอบตามทิศทาง x และ y ซึ่งแปรผันตาม f_x และ f_y ซึ่งเป็นฟูรีเยร์ทรานซฟอร์มของสนามไฟฟ้าที่อะเพอร์เจอร์ สำหรับในทิศทางของการสังเกตอื่น ๆ จะสะดวกที่จะเขียนสนามในเทอมของส่วนประกอบทรงกลม จึงได้ว่า

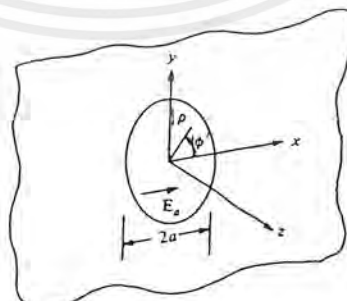
$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{jk_0 e^{-jk_0 r}}{2\pi r} \left[\vec{a}_\theta (f_x \cos\phi \cos\phi + f_y \sin\phi) + \vec{a}_\phi \cos\theta (f_y \cos\phi - f_x \sin\phi) \right] \quad (3.47a)$$

ส่วนสนามแม่เหล็กในบริเวณที่คลื่นแพร่กระจายจะมีค่าดังนี้คือ

$$\vec{H} = Y_0 \vec{a}_r \times \vec{E} \quad (3.47b)$$

ต่อไปจะมาดูตัวอย่างการใช้ (3.46) และ (3.47)

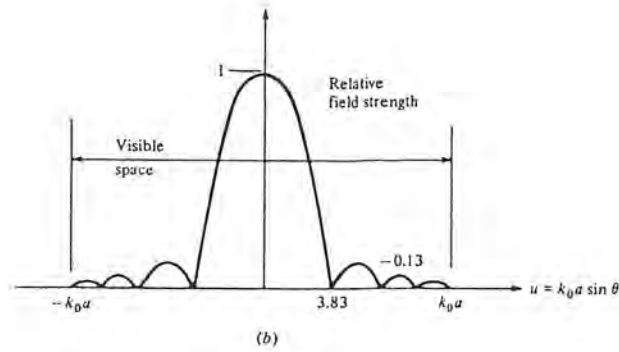
3.8 การแพร่กระจายคลื่นจากอะเพอร์เจอร์วงกลม



(a)

รูปที่ 3.10a) อะเพอร์เจอร์วงกลมที่มีขนาดสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10b) แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น

ในรูป 3.9a เป็นอะเพอร์เจอร์วงกลมที่มีรัศมี a วางอยู่บนระนาบ $Z = 0$

สมมุติว่ามีสนามที่เป็นแบบลิเนียร์ลิโพลไรเซชันมีขนาดสม่ำเสมอมีค่า

$$E_a = E_0 \vec{a}_x \quad x^2 + y^2 \leq a^2 \quad (3.48)$$

$$= 0 \quad \text{ที่อื่น ๆ}$$

อยู่บนอะเพอร์เจอร์ เราจะได้

$$\vec{f}_i = E_0 \vec{a}_x \iint_{s_a} \vec{E}_a(xy) e^{jk_x x + jk_y y} dx dy \quad (3.49)$$

ในการอินทิเกรตจะใช้โคออดิเนตทรงกระบอก ρ, ϕ' เมื่อ $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ ดังนั้น

$x = \rho \cos \phi', y = \rho \sin \phi'$ และจะได้ $k_x = k_0 \sin \theta \cos \phi, k_y = k_0 \sin \theta \sin \phi$

ซึ่ง \vec{f}_i จะมีค่าดังนี้คือ

$$\vec{f}_i = E_0 \vec{a}_x \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{jk_0 \rho \sin \theta \cos(\phi - \phi')} \rho d\phi' d\rho \quad (3.50)$$

ตอนนี้จะเห็นว่า

$$e^{jw \cos(\phi - \phi')} = J_0(w) - 2[J_2(w) \cos 2(\phi - \phi') - J_4(w) \cos 4(\phi - \phi') + \dots] \quad (3.51)$$

$$= 2J_1(w) \cos 2(\phi - \phi') - J_3(w) \cos 3(\phi - \phi') + \dots$$

เมื่อ $J_n(w)$ เป็นเบซเซลฟังก์ชัน (Bessel's Function) ชนิดที่หนึ่งอันดับที่ n ทุกๆ เทอม เมื่อ

อินทิเกรตแล้วจะมีค่าเป็นศูนย์ ยกเว้นเทอม J_0 เสร็จแล้วอินทิเกรตตลอดค่า ρ โดยใช้สูตรต่อไปนี้คือ

$$\int_0^z u^v J_{v-1}(u) du = z^v J_v(z) \quad (3.52)$$

จะหาค่า f_i ได้ดังนี้

$$\vec{f}_i = E_0 \vec{a}_x \int_0^a 2\pi J_0(k_0 a \sin \theta) \rho d\rho$$

$$= 2\pi a^2 E_0 \vec{a}_x \frac{J_1(k_0 a \sin \theta)}{k_0 a \sin \theta} \quad (3.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบซเซลฟังก์ชัน $J_1(x)$ เหมือนกับแอมป์ไซนูซอยดอล (Damped Sinusoidal) และที่ค่า x มาก ๆ จะมีค่า $(2/\pi x)^2 \sin(x - \pi/4)$ ในระนาบ $\phi = 0$ สนามที่แพร่กระจายมีค่าเป็นสัดส่วนกับ f_x ดังแสดงใน (3.37a) ดิฟแฟรคชันแพทเทอร์นหรือแพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่น จาก (3.53) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.9b ซึ่งคล้ายกับ แพทเทอร์นการแพร่กระจายคลื่นของอะเพอร์เจอร์สี่เหลี่ยมต่างกันตรงที่การลดลงของ J_1 ทำให้ไซด์โลบต่ำกว่าโลบหลักและมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ $k_0 a \sin \theta = 3.832$ ซึ่งเป็นค่าศูนย์ค่าแรกของเบซเซลฟังก์ชัน J_1 ความกว้างของโลบหลักจะมีค่า

$$BW = \Delta\theta = 2 \sin^{-1} \frac{3.832}{k_0 a} \approx \frac{3.832}{\pi} \frac{\lambda_0}{a} \quad (3.54)$$

และไซด์โลบที่หนึ่งมีขนาด 0.13 (-17.6dB) เทียบกับโลบหลัก

3.9 สนามบนอะเพอร์เจอร์เป็นแบบเทเปอร์ (Tapered Aperture Field)

ในทางปฏิบัติบางครั้งต้องการให้สายอากาศมีระดับไซด์โลบต่ำมาก ๆ เพื่อลดการรบกวนจากทิศทางอื่นที่ไม่ต้องการติดต่อ มักจะลดไซด์โลบให้ต่ำกว่า 30dB หรือมากกว่าจากโลบหลัก ในอะเพอร์เจอร์สี่เหลี่ยมที่มีสนามสม่ำเสมอ ไซด์โลบแรกลดลงไปเพียง 13dB ส่วนในอะเพอร์เจอร์วงกลมที่มีสนามสม่ำเสมอ ไซด์โลบแรกลดลงไปประมาณ 17.6dB ซึ่งไม่เพียงพอ ในทางทฤษฎีอาร์เรย์พบว่าสามารถลดระดับของไซด์โลบได้โดย เทเปอร์ (Taper) การป้อนกระแสให้กับเอเลเมนต์ เทคนิคนี้ก็ใช้กับอะเพอร์เจอร์ได้เช่นกัน สนามบนอะเพอร์เจอร์ที่ถูกเทเปอร์ จะส่งผลให้ระดับไซด์โลบลดลงได้ การลดระดับลงของไซด์โลบจะทำให้บีมวิดท์กว้างขึ้น และจะลดโคเรคทีวิตีอันจะเป็นผลให้ประสิทธิภาพลดลงไป

ในการแสดงผลของการเทเปอร์สนามบนอะเพอร์เจอร์ เราจะพิจารณาอะเพอร์เจอร์สี่เหลี่ยมที่มีการแจกแจงสนามบนอะเพอร์เจอร์ เป็นรูปสามเหลี่ยมซึ่งอยู่ในลักษณะดังต่อไปนี้

$$\vec{E} = E_0 \vec{a}_x \left(1 - \frac{|x|}{a}\right) \quad |x| \leq a, \quad |y| \leq b \quad (3.55)$$

พบว่า

$$\begin{aligned} \vec{f}_t &= E_0 \vec{a}_x \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left(1 - \frac{|x|}{a}\right) e^{jk_x x + jk_y y} dy dx \\ &= 4bE_0 \vec{a}_x \frac{\sin k_y b}{k_y b} \int_0^a \left(1 - \frac{x}{a}\right) \cos k_x x dx \\ &= 4bE_0 \vec{a}_x \frac{\sin k_y b}{k_y b} \frac{1 - \cos k_x a}{k_x^2 a} \\ &= 2bE_0 \vec{a}_x \frac{\sin k_y b}{k_y b} \left[\frac{\sin k_x (a/2)}{k_x (a/2)} \right]^2 \end{aligned} \quad (3.56)$$

สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายเป็นดังนี้คือ

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{jk_0 ab E_0}{\pi r} e^{-jk_0 r} \frac{\sin v}{v} \left(\frac{\sin u}{u/2} \right)^2 \cdot (\vec{a}_\theta \cos \phi - \vec{a}_\phi \sin \phi \cos \theta) \quad (3.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าความเข้มสนามมีค่าสูงสุดที่ $u=v=0$ มีค่าเป็น $abE_0k_0/r\pi$ แทนที่จะเป็น $2abE_0k_0/r\pi$ เช่นในกรณีอะเพอร์เจอร์ที่มีสนามสม่ำเสมอ การลดลงนี้เกิดจากใช้สนามอะเพอร์เจอร์มีการแจกแจงเป็นรูปสามเหลี่ยม แพทเทอร์นฟังก์ชันตามแกน u ตอนนี้รวมกำลังสองของ $(\sin u)/(u/2)$ แทนที่จะเป็น $(\sin u)/u$ ซึ่งแสดงความกว้างของบีบระหว่างนัลคู่แรก ถูกเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า แต่ในขณะเดียวกันไซด์โลบถูกลดลงจาก 13 dB ไปเป็น 26 dB จะเห็นได้ชัดจากตัวอย่างนี้ว่าการเทเปอร์สนามบนอะเพอร์เจอร์จะมีผลต่อระดับของไซด์โลบมาก แพทเทอร์น การแพร่กระจายคลื่นตามแทน มีค่าศูนย์ 2 ค่าเหมือนกับในกรณีของอาร์เรย์ที่ป้อนกระแสให้มีการแจกแจงเป็นแบบสามเหลี่ยม

แม้ว่าทฤษฎีฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม จะเป็นสูตรที่สะดวกในการคำนวณหาค่าสนามที่แพร่กระจายจากอะเพอร์เจอร์ที่เป็นระนาบ แต่เราไม่สามารถนำมาใช้โดยตรงกับอะเพอร์เจอร์ที่มีผิวโค้ง เช่นทรงกระบอกหรือทรงกลม ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องพัฒนาวิธีการที่ทั่วไปกว่านี้ซึ่งจะอยู่ในสองหัวข้อถัดไป

3.10 การประยุกต์หลักการสนามสมมูลกับการแพร่กระจายคลื่นจากอะเพอร์เจอร์

กลับมาดูอะเพอร์เจอร์ในรูปของตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 อีกที เมื่อให้ \vec{E}_a, \vec{H}_a เป็นสนามที่สัมผัสกับอะเพอร์เจอร์ในระนาบ $Z=0$ ซึ่งสมมุติว่าเรารู้ค่าอยู่แล้ว พบว่า $\vec{E}_a = 0$ ภายนอกของอะเพอร์เจอร์ แต่ \vec{H}_a โดยทั่วไปแล้วไม่เป็นศูนย์ $\vec{J}_{es} = \vec{n} \times \vec{H}_a, \vec{J}_{ms} = -\vec{n} \times \vec{E}_a$

เราสามารถแทนระนาบ $Z=0$ ด้วยตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์และสามารถหาสนามจากกระแสแม่เหล็ก $\vec{J}_{ms} = -\vec{a}_z \times \vec{E}_a$ แต่เพียงอย่างเดียว ถ้าใช้ทฤษฎีเงา (Image Theory) จะสามารถเอาภาคตัวนำออกไปได้ และหาสนามรวมจากคั่นกำเนิดกระแส $2\vec{J}_{ms} = -2\vec{a}_z \times \vec{E}_a$ บนระนาบ $Z=0$ ได้ และคิดว่าแพร่กระจายคลื่นไปสู่ฟรีสเปส หรืออีกวิธีหนึ่งเราสามารถแทนระนาบ $Z=0$ ด้วยตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์และหาสนามในบริเวณ $Z>0$ จาก $\vec{J}_{es} = \vec{n} \times \vec{H}_a$ แต่เพียงอย่างเดียวหรือใช้ทฤษฎีเงาและหาสนามจากคั่นกำเนิดกระแส $2\vec{J}_{es} = 2\vec{n} \times \vec{H}_a$ บนระนาบ $Z=0$ โดยคิดว่ากระจายคลื่นไปสู่ฟรีสเปส

เราจะแสดงวิธีหาผลลัพธ์โดยละเอียดเฉพาะกรณีซึ่งใช้คั่นกำเนิดสมมูล $2\vec{J}_{ms} = -2\vec{a}_z \times \vec{E}_a$ ที่กระจายคลื่นไปสู่ฟรีสเปสเท่านั้น \vec{A}_m จะมีค่าเป็นดังนี้

$$\vec{A}_m(\vec{r}) = -\epsilon_0 e^{-jk_0 r} \vec{a}_z \times \iint_{r_a} \vec{E}_a(x', y') e^{jk_0 \vec{a}_r \cdot (\vec{a}_r x' + \vec{a}_y y')} dx' dy'$$

ตอนนี้ $\vec{a}_r \cdot \vec{a}_x = \sin \theta \cos \phi, \vec{a}_r \cdot \vec{a}_y = \sin \theta \sin \phi$ และคิดว่าอินทิกรัลเป็น

$\vec{f}_i(k_0 \sin \theta \cos \phi, k_0 \sin \theta \sin \phi)$ โดยเปรียบเทียบกับคำจำกัดความของ \vec{f}_i ใน (3.44) และอาศัยความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\vec{a}_z \times \vec{a}_x = \vec{a}_y = \vec{a}_r \sin \theta \sin \phi + \vec{a}_\theta \cos \theta \sin \phi + \vec{a}_\phi \cos \phi$$

และ

$$\vec{a}_z \times \vec{a}_y = -\vec{a}_x = -\vec{a}_r \sin \theta \sin \phi - \vec{a}_\theta \cos \theta \sin \phi + \vec{a}_\phi \sin \phi$$

พบว่า

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{jk_0}{2\pi r} e^{-jk_0 r} [\vec{a}_\theta (f_x \cos \phi + f_y \sin \phi) + \vec{a}_\phi (f_y \cos \phi - f_x \sin \phi) \cos \theta]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งได้กำหนดให้ $\omega\epsilon_0 Z_0 = k_0$ คำตอบนี้เหมือนกับคำตอบที่ได้จากฟูเรียร์ทรานซฟอร์ม ดังแสดงใน (3.47a)

คำตอบที่หาได้จากต้นกำเนิดสมมูลย์แบบอื่น ๆ คือ $2\bar{J}_{es}$ หรือ \bar{J}_{es} และ \bar{J}_{ms} สามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกัน ซึ่งได้รวมผลลัพท์ไว้ข้างล่างนี้ เมื่อฟังก์ชัน \bar{g} , ถูกกำหนดให้เป็นฟูเรียร์ทรานซฟอร์มของสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับระนาบของอะโพร์เจอร์ มีค่าดังนี้คือ

$$\bar{g}_t(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int \bar{H}_a(x', y') e^{jk_x x' + jk_y y'} dx' dy' \quad (3.58)$$

จะหาสนามไฟฟ้าในเทอมของต้นกำเนิดสมมูลย์ $\bar{J}_{es}, \bar{J}_{ms}$ หรือ $2\bar{J}_{es}, 2\bar{J}_{ms}$ ได้ดังนี้

$$\bar{J}_{es}, \bar{J}_{ms}$$

$$E_\theta = \frac{jk_0}{4\pi r} e^{-jk_0 r} [f_x \cos \phi + f_y \sin \phi + Z_0 \cos \theta (g_y \cos \phi - g_x \sin \phi)] \quad (3.59a)$$

$$E_\phi = \frac{jk_0}{4\pi r} e^{-jk_0 r} [\cos \theta (f_y \cos \phi + f_x \sin \phi) - Z_0 (g_y \sin \phi + g_x \cos \phi)] \quad (3.59b)$$

$$2\bar{J}_{es}$$

$$E_\theta = \frac{jk_0 Z_0 \cos \theta}{2\pi r} e^{-jk_0 r} [g_x \cos \phi - g_y \sin \phi] \quad (3.60a)$$

$$E_\phi = \frac{-jk_0 Z_0}{2\pi r} e^{-jk_0 r} [g_y \sin \phi + g_x \cos \phi] \quad (3.60b)$$

$$2\bar{J}_{ms}$$

$$E_\theta = \frac{jk_0}{2\pi r} e^{-jk_0 r} [f_x \cos \phi + f_y \sin \phi] \quad (3.61a)$$

$$E_\phi = \frac{-jk_0 \cos \theta}{2\pi r} e^{-jk_0 r} [f_y \cos \phi + f_x \sin \phi] \quad (3.61b)$$

จะเห็นว่า (3.61) สอดคล้องกับผลลัพท์ที่ได้จากการใช้ฟูเรียร์ทรานซฟอร์มนอกจากนี้ยังพบว่าคำตอบใน (3.59) เป็นค่าเฉลี่ยของ (3.60) และ (3.61) ถ้าผู้สนามในอะโพร์เจอร์อย่างถูกต้องแล้วทั้งสามวิธีที่กล่าวมา จะให้คำตอบที่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามเมื่อค่าสนามของอะโพร์เจอร์ \bar{E}_a, \bar{H}_a เป็นค่าโดยประมาณแล้ว สมการทั้งสามจะให้ผลลัพท์ไม่เหมือนกัน การใช้ (3.60) หรือ (3.61) เดี่ยว ๆ มีข้อดีคือจะกำหนด \bar{E}_a หรือ \bar{H}_a อย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว สำหรับบนผิวโค้งจะใช้ทฤษฎีเงาไม่ได้

ในความเป็นจริงไม่มีต้นกำเนิดแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามก็อาจคิดว่าต้นกำเนิดแม่เหล็กนี้เป็นส่วนของระบบของต้นกำเนิดสมมูลย์ ที่ใช้ในการสร้างสนามเดียวกัน ในบริเวณที่จำกัดว่าเป็นต้นกำเนิดจริง ๆ และจะใช้ต้นกำเนิดแม่เหล็กนี้เพื่อความสะดวกในการคำนวณสนามที่กระจายจากการแจกแจงสนามในอะโพร์เจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนในการหาผลลัพท์ของ (3.61) ซึ่งให้ผลลัพท์เหมือนกับ (3.47a) ที่สามารถหาได้โดยใช้ฟูรีเยร์ทรานซฟอর্ম ไม่เหมือนกับการหาค่าอินทิกรัลใน (3.42) เพื่อหาสนามทั้งหมดเมื่อ $k_0 r$ มีค่ามาก จะพบว่าเอเดเมนทซ์ของพื้นที่ ds ที่มีหน่วยเวกเตอร์ที่ตั้งฉาก \hat{n} และสนามในแนวสัมผัสเป็น $\vec{E}_a(\vec{r}'), \vec{H}_a(\vec{r}')$ จะมีส่วนช่วยหาศักดาเวกเตอร์อันนี้

$$d\vec{A}_e(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi r} e^{-jk_0 r} \hat{n} \times \vec{H}_a(\vec{r}') e^{jk_0 \vec{a}_r \cdot \vec{r}'} d\vec{s} \quad (3.62a)$$

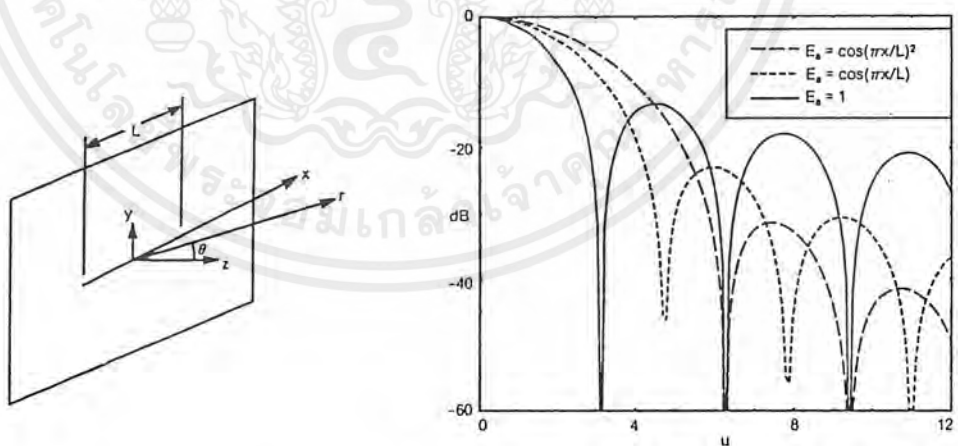
$$d\vec{A}_m(\vec{r}) = \frac{-\epsilon_0}{4\pi r} e^{-jk_0 r} \hat{n} \times \vec{E}_a(\vec{r}') e^{jk_0 \vec{a}_r \cdot \vec{r}'} d\vec{s} \quad (3.62a)$$

การคำนวณหาการแพร่กระจายคลื่นจากอะเพอร์เจอร์ ในผิวตัวนำทรงอื่น เช่น ทรงกระบอก, ทรงกลม จะยุ่งยากกว่าการคำนวณในระนาบตัวนำมาก เพราะสูตรที่มักใช้จะปิดอะเพอร์เจอร์ด้วยตัวนำสมบูรณ์แล้วฉายแผ่นกระแสแม่เหล็ก $\vec{J}_{ms} = -\hat{n} \times \vec{E}_a$ อยู่ข้างหน้าอะเพอร์เจอร์ อาจหาสนามที่กระจายได้จากคันทันกำเนิดกระแสแม่เหล็กนี้แต่จะต้องคิดให้ $-\hat{n} \times \vec{E}_a$ เป็นศูนย์กลางบนผิวตัวนำ เราไม่สามารถคิดว่ากระแสแม่เหล็กกระจายคลื่นในฟรีสเปส ถ้าหากไม่สามารถประมาณค่า \vec{J}_{ms} ได้ดีแล้วจะต้องคิดว่า \vec{J}_{ms} เป็นตัวไม่รู้ค่า ในปัญหาเกี่ยวกับค่าที่บริเวณขอบเขต ต้องการหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมด ทั้งภายในและภายนอกปิดที่ทำให้สนามในแนวสัมผัสเป็นค่าต่อเนื่องตาม อะเพอร์เจอร์ที่เปิด สมการ (3.62) ใช้ได้เฉพาะถ้าเรารู้ทั้ง $\hat{n} \times \vec{H}_a$ และ $\hat{n} \times \vec{E}_a$ ตลอดผิวทั้งหมดที่เราสนใจ

3.11 คุณสมบัติของสนามที่แพร่กระจายจากอะเพอร์เจอร์ (Radiation characteristics from apertures)

3.11.1 อะเพอร์เจอร์ขนาดเล็ก (Line source aperture)

อะเพอร์เจอร์ขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 3.11 เมื่อ L เป็นความยาวของอะเพอร์เจอร์ ตามแนวแกน x ฟูรีเยร์ทรานซฟอर्मของสนามที่อะเพอร์เจอร์ได้ดังนี้



รูปที่ 3.11 แสดงรูปของอะเพอร์เจอร์ขนาดเล็กและแพทเทิร์นจากสมการสนามในตารางที่ 3.2

$$f_x = \int_{-L/2}^{L/2} E_a(x') e^{jk_x \sin \theta \cos \phi} dx' \quad (3.63)$$

ถ้าให้สนามที่อะเพอร์เจอร์ $E_a(x') = 1$; ($|x| < L/2$) ซึ่งเป็นสนามแบบยูนิฟอร์ม (Uniform) ดังนั้นสนามที่แพร่กระจายออกมามีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_x = \frac{\sin u}{u} \tag{3.64}$$

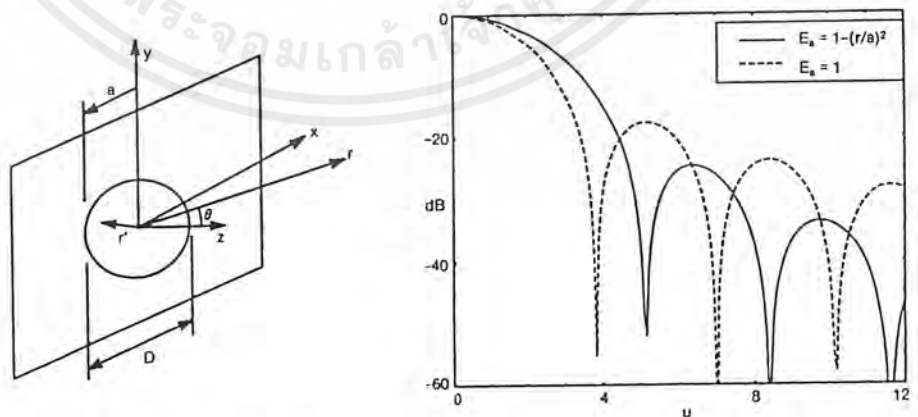
เมื่อ $u = (kL/2) / \sin \theta$ และ $k = 2\pi/\lambda$ นำสมการ (3.64) ไปพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 3.12 และตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของคลื่นที่แพร่กระจาย เนื่องจากสนามที่อะเพอร์เจอร์ ($E_a(x')$) ในรูปแบบต่าง ๆ จะเห็นว่าเมื่อสนามที่อะเพอร์เจอร์มีการกระจายในรูปแบบ $\cos \pi x' / L$ แล้วจะทำให้ระดับของไซด์โลบต่ำกว่าสนามยูนิฟอร์ม

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของคลื่นที่แพร่กระจาย เนื่องจากสนามที่อะเพอร์เจอร์ขนาดเล็ก

Distribution	Aperture field	Normalised pattern $f(u)$	-3 dB full beamwidth	-10 dB full beamwidth	First-sidelobe level (dB)
Uniform		$\frac{\sin u}{u}$	$0.88 \lambda/L$	$1.48 \lambda/L$	-13.2
$\cos\left(\frac{\pi x'}{L}\right)$		$\frac{\cos u}{1 - \left(\frac{2u}{\pi}\right)^2}$	$1.2 \lambda/L$	$2.04 \lambda/L$	-23.1
$\cos^2\left(\frac{\pi x'}{L}\right)$		$\frac{1 - \frac{\sin u}{u}}{1 - \left(\frac{u}{\pi}\right)^2}$	$1.44 \lambda/L$	$2.51 \lambda/L$	-31.5
$\sin\left(\frac{\pi x'}{L}\right)$		$\frac{u \cos u}{1 - \left(\frac{2u}{\pi}\right)^2}$	—	—	—
$C + (1+C)\cos\left(\frac{\pi x'}{L}\right)$		$C \frac{\sin u}{u} + (1-C) \frac{2}{\pi} \frac{\cos u}{1 - \left(\frac{2u}{\pi}\right)^2}$	$1.03 \lambda/L$ (C = -10 dB)	$1.75 \lambda/L$	-20.0
		$C + (1-C) \frac{2}{\pi}$	$1.09 \lambda/L$ (C = -15 dB)	$1.86 \lambda/L$	-21.9

3.11.2 อะเพอร์เจอร์กลม (Circular Aperture)

อะเพอร์เจอร์กลมแสดงในรูปที่ 3.12 สมการสนามของอะเพอร์เจอร์กลม แสดงได้ดังสมการ (3.65)



รูปที่ 3.12 แสดงรูปของอะเพอร์เจอร์กลมและแพทเทิร์นจากสมการสนามในตารางที่ 3.3

$$f = \int_0^{2\pi} \int_0^u E_a(r', \phi') e^{jk' r \sin \theta \cos(\phi - \phi')} r' dr' d\phi' \tag{3.65}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการอินทิเกรตแล้วจะได้

$$f = \int_0^a E_a(r') J_0(kr' \sin \theta) r' dr' \tag{3.66}$$

ถ้าให้สนามที่อะเพอร์เจอร์ เป็นสนามแบบยูนิฟอร์ม $E_a(r') = 1$ แล้วสมการที่ (3.66) จะได้

$$f = 2 \frac{J_1(u)}{u} \tag{3.67}$$

เมื่อ $u = ka \sin \theta$ ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของคลื่นที่แพร่กระจาย เนื่องจากสนามที่อะเพอร์เจอร์ ($E_a(r')$) ในรูปแบบต่าง ๆ แสดงบีมวิดท์ที่ระดับ -3 dB และ -10 dB และระดับของไซด์โลบหลักแรก จะเห็นว่าระดับของไซด์โลบต่ำลง เมื่อสนามที่อะเพอร์เจอร์มีการกระจายในรูปแบบ $1 - (r/a)^2$

ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของคลื่นที่แพร่กระจาย เนื่องจากสนามที่อะเพอร์เจอร์กลม

Distribution	Normalised pattern	-3 dB full beamwidth	-10 dB full beamwidth	First-sidelobe level (dB)
$\left\{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right\}^n$	$f(\theta, n) = \frac{2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}(u)}{u^{n+1}}$			
$n = 0$ (uniform)	$2 \frac{J_1(u)}{u}$	$1.03 \lambda/D$	$1.74 \lambda/D$	-17.6
$n = 1$	$8 \frac{J_2(u)}{u^2}$	$1.27 \lambda/D$	$2.19 \lambda/D$	-24.6
$C + (1+C) \cos\left\{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right\}^n$	$f(\theta, n, C) = \frac{Cf(\theta, n=0) + \frac{1-C}{n+1} f(\theta, n)}{C + \frac{1-C}{n+1}}$			
$n = 1, C = -10 \text{ dB}$		$1.14 \lambda/D$	$1.95 \lambda/D$	-22.3
$n = 1, C = -15 \text{ dB}$		$1.18 \lambda/D$	$2.03 \lambda/D$	-23.7

3.12 สายอากาศแบบโมโนโพล

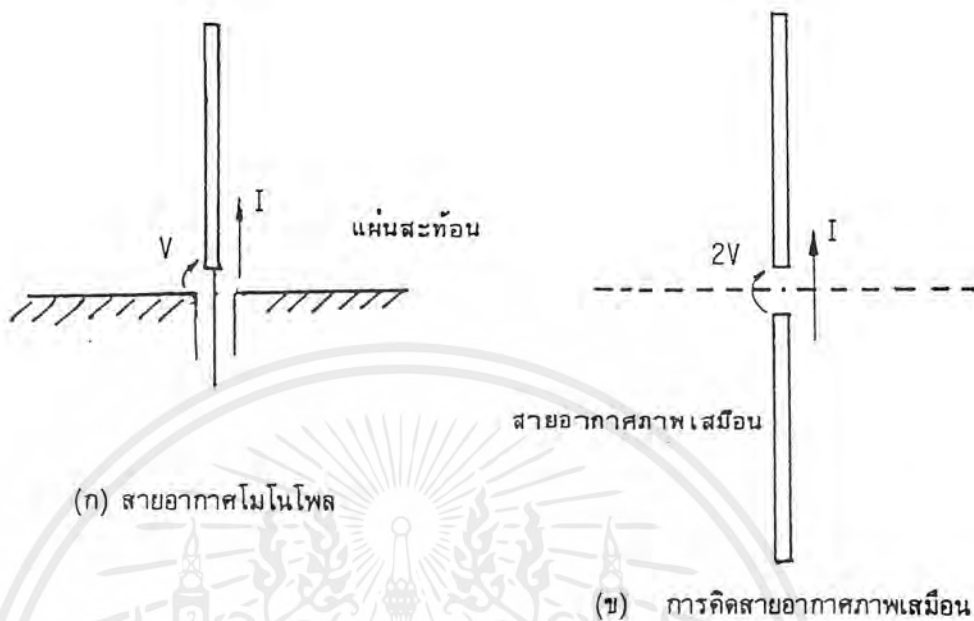
สายอากาศแบบ โมโนโพลมีโครงสร้างดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.13 (ก) คือจะมีการป้อนกำลังจากทางส่วนล่างที่ติดกับแผ่นสะท้อน ถ้าแรงดันที่ขั้วเป็น V จากทฤษฎีภาพเสมือนเราจะได้เหมือนกับว่ามีสายอากาศภาพเสมือนอยู่ทางด้านล่างอีกหนึ่งส่วน ซึ่งมีทิศทางของกระแสเหมือนกับสายอากาศจริง ในสภาพดังกล่าวนี้ สนามไฟฟ้าบนผิวสัมผัสของแผ่นสะท้อนจะเป็นศูนย์ จากรูปที่ 3.13 (ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อนำสายอากาศภาพเสมือนมาคิดรวมด้วยจะได้เป็นสายอากาศไดโพลที่ถูกป้อนด้วยแรงดัน $2V$ [V] ดังนั้นเมื่อทำการคิดค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนี้จะได้เป็นดังนี้คือ

$$Z_{in} = \frac{V}{I} = \frac{1}{2} * \frac{2V}{I} \quad \Omega \tag{3.63}$$

และเนื่องจากตามรูปที่ 3.13(ข) ค่า $2V/I$ คือค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของงานอากาศไดโพล ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบ โมโนโพลจะเป็น $1/2$ ของสายอากาศแบบไดโพลซึ่งมีความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านหนึ่งเท่านั้น ในกรณีที่ความยาวของสายอากาศโมโนโพลเป็น $\lambda/4$ อินพุทอิมพีแดนซ์ที่ได้ก็จะ เป็น $(74 + j42)/2 = 37 + j2 \text{ } [\Omega]$



(ก) สายอากาศโมโนโพล

(ข) การคิดสายอากาศภาพเสมือน

รูปที่ 3.13 สายอากาศแบบ โมโน โพล และสายอากาศภาพเสมือน

สำหรับแพทเทิร์นของการกระจายคลื่นและอัตราขยายจะหาได้ โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.13 (ข) ดังนี้คือ เนื่องจากสายอากาศโมโนโพลที่มีแผ่นสะท้อนทำหน้าที่เหมือนสายอากาศไดโพล ดังนั้น แพทเทิร์นของการกระจายคลื่นก็จะเหมือนกับสายอากาศไดโพล โดยที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้ จะเหมือนกับที่ออกจากสายอากาศไดโพลที่ป้อนด้วยแรงดัน 2V [V] ดังนั้น เราจะสามารถคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพล โดยใช้สูตรต่อไปนี้คือ

$$G = \frac{|E(r, 90^\circ, \phi) / Z_0|}{\text{Re}[V \cdot I^*] / 4\pi r^2} \tag{3.64}$$

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพล ซึ่งต้องป้อนแรงดัน 2V [V] จึงจะได้สนามไฟฟ้าขนาดเท่ากัน แล้วอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลก็จะสูงขึ้น 2 เท่าตัว หรือสูงขึ้น 3dB อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ นั้นเนื่องจากแผ่นสะท้อนที่ขนาดจำกัด จึงมักจะได้แพทเทิร์นต่างไปจากที่กล่าวมาบ้าง และอัตราขยายก็จะลดลงตามส่วนด้วย

3.13 การออกแบบและการสร้างสายอากาศเอ็กซ์โพเนนเชียลฮอร์น

3.13.1 การคำนวณและออกแบบ

(ย่านความถี่ที่ใช้ 1700-1900 MHz ความถี่กลาง 1800 MHz)

$$\text{จาก } \lambda = \frac{3 \times 10^8}{f} \tag{3.65}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1.8 \times 10^9} = 16.667 \text{ cm.}$$

$$\therefore \text{ความยาวของโพรบ} = \frac{\lambda}{4} = 4.167 \text{ cm. (จากหลักการของสายอากาศโมโนโพล)}$$

จากสมการ (3.1) เรืองท่อนำคลื่นแบบกลม

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{u_{nm}} \quad (3.66)$$

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{1.8412} a = 3.412a$$

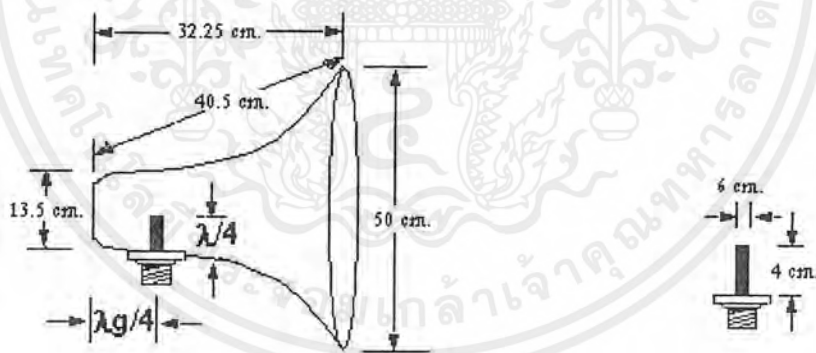
เมื่อ $a =$ รัศมีของกั้นฮอร์น = 7 cm.

$$\lambda_c = 3.412 \times 7 = 23.884 \text{ cm.}$$

$$\therefore f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8}{0.238} = 1.256 \text{ GHz}$$

3.13.2 ขั้นตอนการสร้าง

1. ออกแบบสายอากาศเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น โดยใช้ลำโพงฮอร์นมาทำสายอากาศ
2. วัดขนาดของฮอร์น ซึ่งมีขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.14 จากรูปจะเห็นฮอร์นมีขนาดที่สามารถใช้กับคลื่นความถี่ 1700 - 1900 MHz ได้



(a) แสดงตำแหน่งของคอนเนคเตอร์ (Connector)

และความยาวของโพรบ (Probe)

รูปที่ 3.14 แสดง โครงสร้างของสายอากาศเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น และ โพรบ

(b) แสดงขนาดของโพรบ

ที่ทำด้วยทองเหลือง

3. หา λ_g เพื่อเจาะรูติดตั้ง N-Type คอนเนคเตอร์ ซึ่งมีระยะห่างของคอนเนคเตอร์ กับกั้นของฮอร์น $\lambda_g / 4$ หาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{3.412a}\right)^2}} = 23.277 \text{ cm}$$

$$\therefore \text{ตำแหน่งของคอนเนคเตอร์วัดจากกันฮอร์น} = \frac{\lambda g}{4} = \frac{23.277}{4} = 5.82 \text{ cm.} \cong 6 \text{ cm.}$$

4. หาความยาวของโพรบซึ่งเท่ากับ $\lambda / 4$ ซึ่งป็นสายอากาศโมโนโพลบนกราวด์เพลน
5. ปิดกันฮอร์น ด้วยโลหะ ซึ่งในโครงการนี้ใช้ลวดมึนนิยมน เพื่อป้องกันคลื่นออกทางกันฮอร์น
6. ติดตั้งโพรบกับคอนเนคเตอร์ แล้วนำไปติดตั้งที่ตัวฮอร์น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทดลองวัดหาค่า VSWR และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยใช้เครื่องเนทเวิร์ค-อะนาไลเซอร์ (Network Analyzer)
2. ปรับแต่งระยะห่างของโพรบกับกั้นฮอร์น และความยาวของโพรบ เพื่อให้ได้ค่า VSWR ที่ใกล้เคียง 1:1 มากที่สุด และค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50 โอห์มมากที่สุด เนื่องจากสายอากาศนี้ใช้สายนำสัญญาณ ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ประจำสาย (Z_0) เท่ากับ 50 โอห์ม
3. วัดค่ารีเทิร์นลอส (Return Loss) ด้วยเครื่องเนทเวิร์คอะนาไลเซอร์
4. ทำสายอากาศฮอร์นเพิ่มอีก 1 ตัว โดยใช้สายอากาศตัวแรกเป็นต้นแบบ
5. ปรับแต่งระยะห่างของคอนเนคเตอร์กับกั้นฮอร์น และความยาวของโพรบ ทำการวัดเหมือนในข้อ 2 และ ข้อ 3
6. วัดค่ากำลังของสนามที่ตำแหน่งองศาต่าง ๆ ในระนาบของ E - Plane กับ H - Plane เพื่อนำมาพล็อตกราฟหาแพทเทิร์นของสายอากาศ โดยนำสายอากาศตัวส่งต่อเข้ากับเครื่องซิกแนลเจเนอเรเตอร์ (Signal Generator) และนำเอาสายอากาศตัวรับต่อเข้ากับเครื่องสเปกตรัม (Spectrum Analyzer) โดยให้ระยะห่างระหว่าง Horn ทั้งสองมีค่ามากกว่าระยะ far field โดยใช้สูตรคำนวณระยะทาง far Field ดังสมการข้างล่าง

$$\text{Far Field Distance} = \frac{2D^2}{\lambda}$$

$$\text{เมื่อ } D = 50 \text{ cm}$$

$$\text{Far Field Distance} = \frac{2(0.50)^2}{0.16666} = 3 \text{ m.}$$

ในการทดลองนี้ใช้ระยะ far field ที่ 6 m. ต่อไปทำการวัดค่ากำลังสนามในระนาบ H - Plane โดยติดตั้งสายอากาศ ทั้งรับและส่งให้โพรบตั้งฉากกับพื้นระนาบ สายอากาศตัวรับนำไปติดตั้งที่แทนหมุนด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งหมุนไปที่ละ 1 องศา แล้ววัดค่ากำลังสนามที่องศาต่างจนครบ 360 องศา ส่วนการวัดค่ากำลังสนามในระนาบ E - Plane นั้น ต้องติดตั้งสายอากาศให้โพรบขนานกับพื้นระนาบ

7. หาค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์จากแพทเทิร์นที่ได้ในข้อ 7 ทั้งแพทเทิร์นในระนาบ E - Plane และ H - Plane
8. หาค่าไดเรคทิวิตีได้จากสมการที่ 2.24 โดยใช้ค่าบีมวิดท์ที่จากข้อ 7
9. หาค่าเกนของสายอากาศได้จากสมการ

$$G_r = P_r - P_t - G_t + L_{fs} + L_l + L_r$$

P_r คือ กำลังของเครื่องส่งที่ส่งคลื่นออกมา

P_t คือ กำลังของสนามวัดได้จากสายอากาศรับ

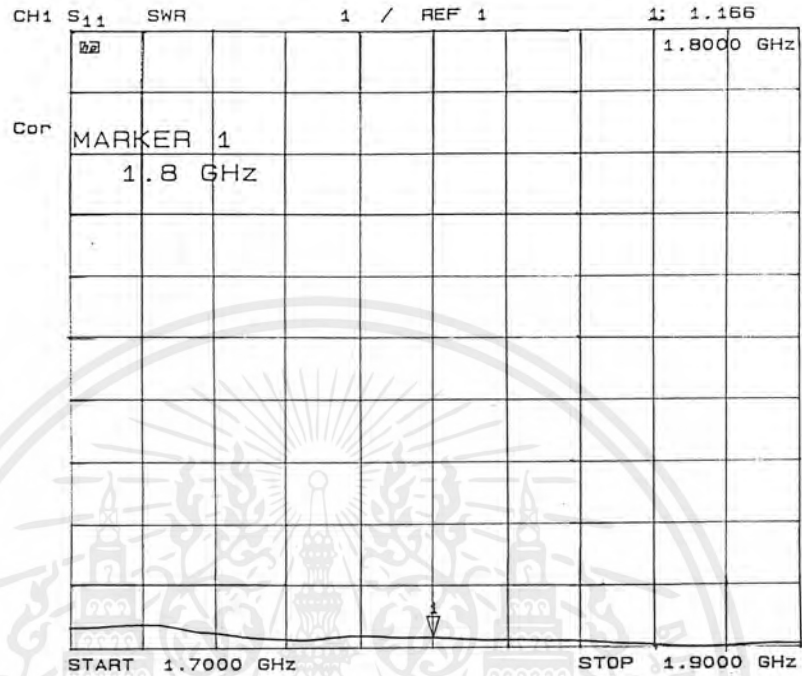
G_t คือ เกนของสายอากาศส่ง

G_r คือ เกนของสายอากาศรับ

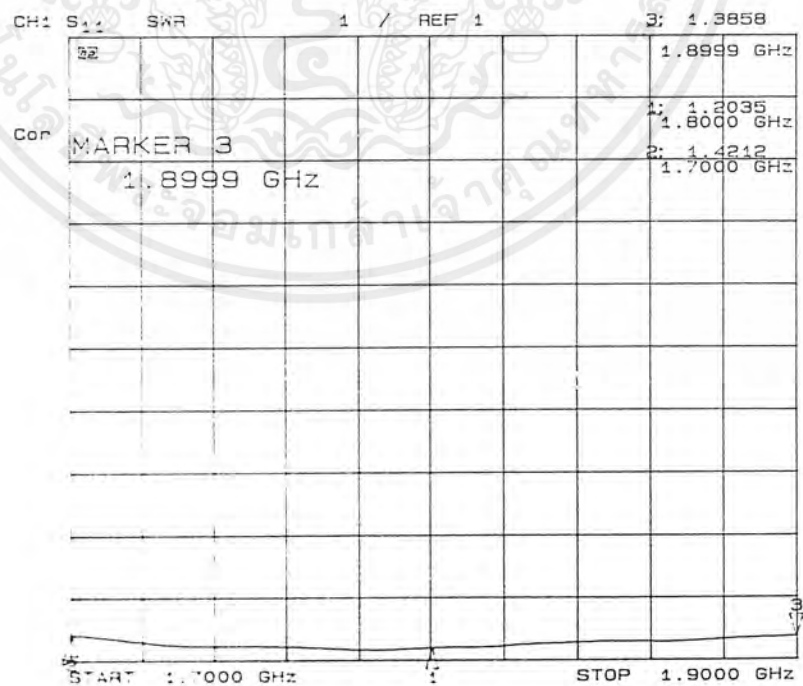
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลอง

1. ค่า VSWR ที่วัดได้แสดงในรูปที่ 4.2 - 4.3



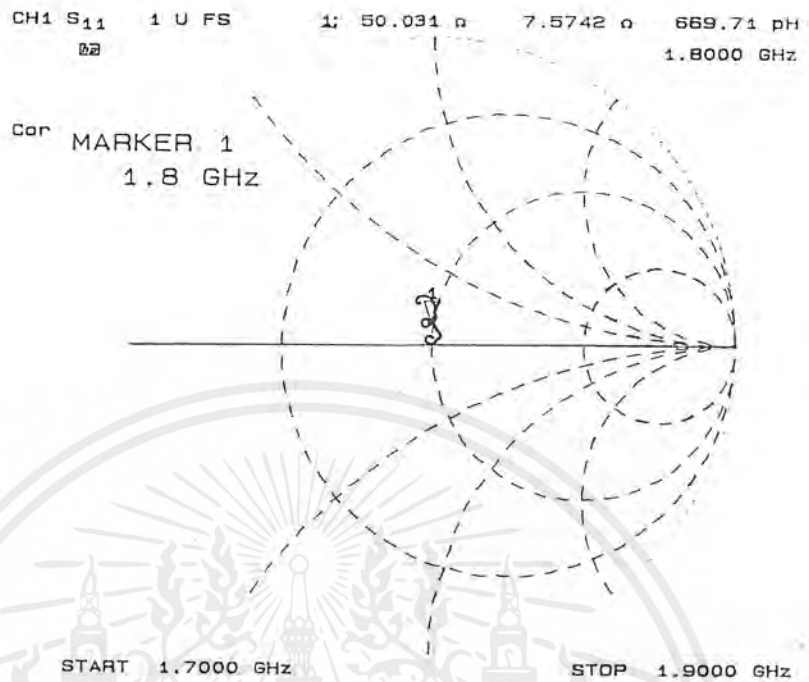
รูปที่ 4.2 แสดงค่า VSWR ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 1



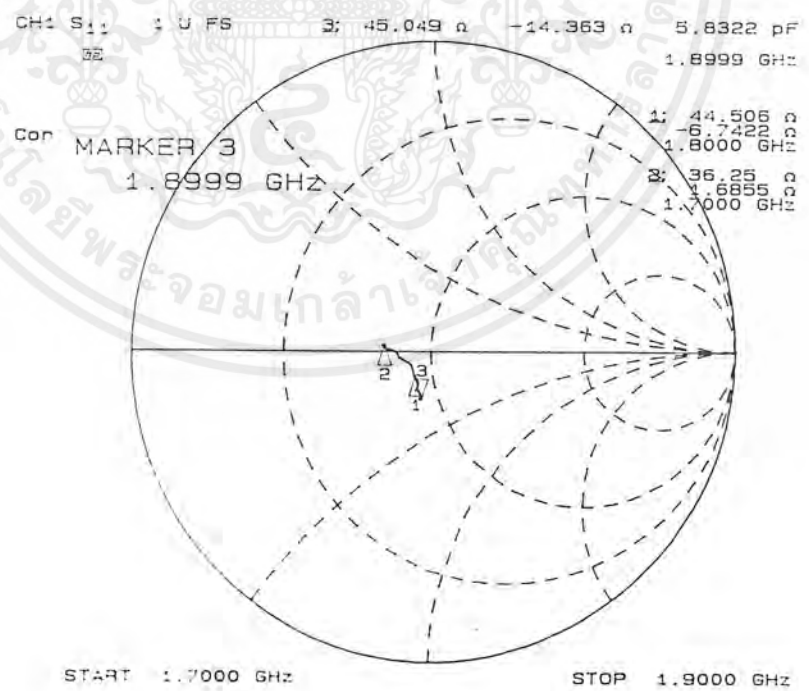
รูปที่ 4.3 แสดงค่า VSWR ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4 - 4.5



รูปที่ 4.4 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 1



รูปที่ 4.5 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นควอเตอร์ 1 ในระนาบ H - Plane

Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)
1	-38.0800	31	-48.2800	61	-65.9800	91	-71.2800
2	-38.0800	32	-48.2800	62	-64.8800	92	-71.9800
3	-38.1800	33	-49.5800	63	-65.0800	93	-71.1800
4	-38.0800	34	-50.0800	64	-65.5800	94	-71.2800
5	-38.1800	35	-50.1800	65	-65.9800	95	-70.0800
6	-38.2800	36	-51.2800	66	-66.5800	96	-69.6800
7	-38.3800	37	-51.9800	67	-68.0800	97	-70.4800
8	-38.4800	38	-52.3800	68	-68.2800	98	-70.3800
9	-38.5800	39	-53.0800	69	-70.3800	99	-70.8800
10	-38.8800	40	-53.9800	70	-71.3800	100	-69.8800
11	-39.0800	41	-53.8800	71	-70.8800	101	-69.4800
12	-39.3800	42	-54.6800	72	-71.3800	102	-70.3800
13	-39.4800	43	-55.3800	73	-71.4800	103	-72.0800
14	-39.6800	44	-55.9800	74	-71.1800	104	-71.1800
15	-39.9800	45	-56.5800	75	-71.4800	105	-71.5800
16	-40.3800	46	-56.9800	76	-70.3800	106	-72.2800
17	-40.7800	47	-57.6800	77	-70.0800	107	-72.3800
18	-41.2800	48	-58.6800	78	-69.4800	108	-72.2800
19	-41.6800	49	-59.4800	79	-69.0800	109	-72.6800
20	-42.1800	50	-59.3800	80	-69.1800	110	-71.8800
21	-42.5800	51	-60.8800	81	-69.7800	111	-71.5800
22	-43.2800	52	-62.0800	82	-70.1800	112	-70.1800
23	-43.5800	53	-62.3800	83	-71.3800	113	-69.8800
24	-44.2800	54	-63.9800	84	-69.9800	114	-69.0800
25	-44.9800	55	-64.3800	85	-70.4800	115	-68.3800
26	-45.3800	56	-66.0800	86	-70.9800	116	-67.6800
27	-45.9800	57	-66.7800	87	-71.1800	117	-66.9800
28	-46.3800	58	-66.4800	88	-71.1800	118	-67.3800
29	-47.2800	59	-66.6800	89	-70.5800	119	-67.3800
30	-47.4800	60	-66.6800	90	-71.5800	120	-68.3800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 1 ในระนาบ H - Plane (ต่อ)

Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)
121	-69.7800	151	-68.8800	181	-59.7800	211	-70.2800
122	-68.5800	152	-68.4800	182	-59.7800	212	-68.0800
123	-71.0800	153	-68.4800	183	-59.2800	213	-67.6800
124	-70.9800	154	-68.4800	184	-60.1800	214	-67.3800
125	-71.7800	155	-68.1800	185	-60.0800	215	-66.9800
126	-71.4800	156	-68.8800	186	-60.5800	216	-65.7800
127	-71.6800	157	-68.4800	187	-60.7800	217	-65.4800
128	-72.3800	158	-68.5800	188	-60.8800	218	-65.6800
129	-71.8800	159	-69.1800	189	-60.9800	219	-66.1800
130	-70.7800	160	-68.9800	190	-62.4800	220	-66.1800
131	-71.6800	161	-69.2800	191	-62.8800	221	-67.2800
132	-71.1800	162	-68.9800	192	-62.8800	222	-67.6800
133	-71.5800	163	-66.7800	193	-63.3800	223	-69.3800
134	-70.8800	164	-67.2800	194	-63.2800	224	-69.4800
135	-71.7800	165	-66.7800	195	-64.7800	225	-69.0800
136	-71.3800	166	-65.5800	196	-64.9800	226	-67.7800
137	-71.7800	167	-65.8800	197	-66.0800	227	-68.2800
138	-71.7800	168	-63.3800	198	-67.0800	228	-67.6800
139	-72.0800	169	-62.1800	199	-67.1800	229	-69.4800
140	-71.3800	170	-61.6800	200	-66.1800	230	-68.9800
141	-71.8800	171	-61.6800	201	-66.7800	231	-69.0800
142	-70.8800	172	-60.6800	202	-69.0800	232	-70.2800
143	-70.9800	173	-60.9800	203	-69.7800	233	-70.8800
144	-70.7800	174	-60.0800	204	-69.9800	234	-71.1800
145	-68.9800	175	-60.0800	205	-70.9800	235	-72.1800
146	-69.0800	176	-60.1800	206	-71.7800	236	-72.2800
147	-69.4800	177	-59.9800	207	-73.0800	237	-71.9800
148	-68.6800	178	-59.6800	208	-71.8800	238	-72.1800
149	-68.3800	179	-59.4800	209	-70.9800	239	-71.6800
150	-68.2800	180	-59.2800	210	-71.6800	240	-72.7800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 1 ในระนาบ H - Plane (ต่อ)

Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)
241	-71.9800	271	-72.3800	301	-65.2800	331	-47.5800
242	-71.5800	272	-72.5800	302	-64.0800	332	-47.0800
243	-69.1800	273	-70.2800	303	-67.3800	333	-46.6800
244	-69.2800	274	-68.1800	304	-69.1800	334	-46.1800
245	-67.7800	275	-68.7800	305	-68.6800	335	-45.8800
246	-67.5800	276	-66.9800	306	-71.8800	336	-45.4800
247	-66.4800	277	-65.6800	307	-70.8800	337	-45.0800
248	-66.1800	278	-64.4800	308	-69.0800	338	-44.7800
249	-66.1800	279	-65.0800	309	-67.4800	339	-44.1800
250	-67.4800	280	-65.0800	310	-64.5800	340	-43.7800
251	-67.6800	281	-65.1800	311	-64.5800	341	-43.3800
252	-67.8800	282	-65.2800	312	-60.8800	342	-42.7800
253	-68.3800	283	-66.8800	313	-59.4800	343	-42.2800
254	-69.4800	284	-67.5800	314	-58.8800	344	-41.7800
255	-68.7800	285	-69.4800	315	-57.5800	345	-41.4800
256	-71.0800	286	-70.9800	316	-56.4800	346	-40.8800
257	-70.4800	287	-71.6800	317	-55.6800	347	-40.9800
258	-69.7800	288	-70.9800	318	-55.7800	348	-40.1800
259	-70.7800	289	-68.9800	319	-54.3800	349	-39.8800
260	-68.3800	290	-69.4800	320	-53.7800	350	-39.7800
261	-68.0800	291	-69.8800	321	-52.3800	351	-39.2800
262	-66.8800	292	-66.1800	322	-51.8800	352	-39.0800
263	-67.4800	293	-67.0800	323	-51.9800	353	-38.8800
264	-66.7800	294	-64.1800	324	-50.6800	354	-38.6800
265	-67.3800	295	-64.4800	325	-50.1800	355	-38.4800
266	-67.4800	296	-64.0800	326	-49.5800	356	-38.5800
267	-67.6800	297	-63.3800	327	-49.0800	357	-38.1800
268	-69.6800	298	-62.9800	328	-48.6800	358	-38.1800
269	-71.7800	299	-63.9800	329	-48.6800	359	-38.1800
270	-72.3800	300	-64.1800	330	-47.7800	360	-38.0800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 1 ในระนาบ E - Plane

Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)
1	-34.0000	31	-49.2500	61	-63.9000	91	-67.2000
2	-34.0000	32	-49.2500	62	-62.8000	92	-67.9000
3	-34.1000	33	-50.5500	63	-63.0000	93	-67.1000
4	-34.0000	34	-51.0500	64	-63.5000	94	-67.2000
5	-36.1000	35	-51.1500	65	-63.9000	95	-66.0000
6	-36.2000	36	-52.2500	66	-62.5000	96	-65.6000
7	-36.3000	37	-52.9500	67	-64.0000	97	-66.4000
8	-36.4000	38	-53.3500	68	-64.2000	98	-66.3000
9	-36.5000	39	-54.0500	69	-66.3000	99	-66.8000
10	-38.5500	40	-54.9500	70	-67.3000	100	-65.8000
11	-38.7500	41	-54.8500	71	-66.8000	101	-65.4000
12	-39.0500	42	-55.6500	72	-67.3000	102	-66.3000
13	-39.1500	43	-56.3500	73	-67.4000	103	-68.0000
14	-39.3500	44	-56.9500	74	-67.1000	104	-67.1000
15	-39.6500	45	-57.5500	75	-67.4000	105	-67.5000
16	-40.0500	46	-57.9500	76	-66.3000	106	-68.2000
17	-40.4500	47	-58.6500	77	-66.0000	107	-68.3000
18	-40.9500	48	-59.6500	78	-65.4000	108	-68.2000
19	-41.3500	49	-60.4500	79	-65.0000	109	-68.6000
20	-43.1500	50	-60.3500	80	-65.1000	110	-67.8000
21	-43.5500	51	-61.8500	81	-65.7000	111	-67.5000
22	-44.2500	52	-63.0500	82	-66.1000	112	-66.1000
23	-44.5500	53	-63.3500	83	-67.3000	113	-65.8000
24	-45.2500	54	-63.6500	84	-65.9000	114	-65.0000
25	-45.9500	55	-64.0500	85	-66.4000	115	-64.3000
26	-46.3500	56	-64.0000	86	-66.9000	116	-63.6000
27	-46.9500	57	-64.7000	87	-67.1000	117	-62.9000
28	-47.3500	58	-64.4000	88	-67.1000	118	-63.3000
29	-48.2500	59	-64.6000	89	-66.5000	119	-63.3000
30	-48.4500	60	-64.6000	90	-67.5000	120	-64.3000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 1 ในระนาบ E - Plane (ต่อ)

Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)
121	-65.7000	151	-69.8000	181	-62.7000	211	-67.9500
122	-64.5000	152	-69.4000	182	-62.7000	212	-65.7500
123	-67.0000	153	-69.4000	183	-62.2000	213	-65.3500
124	-66.9000	154	-69.4000	184	-63.1000	214	-65.0500
125	-67.7000	155	-69.1000	185	-63.0000	215	-64.6500
126	-67.4000	156	-69.8000	186	-63.5000	216	-63.4500
127	-67.6000	157	-69.4000	187	-63.7000	217	-63.1500
128	-68.3000	158	-69.5000	188	-63.8000	218	-63.3500
129	-67.8000	159	-70.1000	189	-63.9000	219	-63.8500
130	-66.7000	160	-69.9000	190	-65.4000	220	-65.6000
131	-67.6000	161	-70.2000	191	-63.8000	221	-66.7000
132	-67.1000	162	-69.9000	192	-63.8000	222	-67.1000
133	-67.5000	163	-67.7000	193	-64.3000	223	-68.8000
134	-66.8000	164	-68.2000	194	-64.2000	224	-68.9000
135	-67.7000	165	-67.7000	195	-65.7000	225	-68.5000
136	-67.3000	166	-66.5000	196	-65.9000	226	-67.2000
137	-67.7000	167	-66.8000	197	-67.0000	227	-67.7000
138	-67.7000	168	-64.3000	198	-68.0000	228	-67.1000
139	-68.0000	169	-63.1000	199	-68.1000	229	-68.9000
140	-67.3000	170	-64.6000	200	-67.1000	230	-68.4000
141	-67.8000	171	-64.6000	201	-67.7000	231	-68.5000
142	-66.8000	172	-63.6000	202	-68.0000	232	-69.7000
143	-66.9000	173	-63.9000	203	-68.7000	233	-70.3000
144	-66.7000	174	-63.0000	204	-68.9000	234	-70.6000
145	-64.9000	175	-63.0000	205	-67.9000	235	-71.6000
146	-65.0000	176	-63.1000	206	-68.7000	236	-71.7000
147	-65.4000	177	-62.9000	207	-70.0000	237	-71.4000
148	-64.6000	178	-62.6000	208	-68.8000	238	-71.6000
149	-64.3000	179	-62.4000	209	-67.9000	239	-71.1000
150	-69.2000	180	-62.2000	210	-70.3500	240	-72.2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 1 ในระนาบ E - Plane (ต่อ)

Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)
241	-71.4000	271	-71.8000	301	-64.7000	331	-47.0000
242	-71.0000	272	-72.0000	302	-63.5000	332	-46.5000
243	-68.6000	273	-69.7000	303	-66.8000	333	-46.1000
244	-68.7000	274	-67.6000	304	-68.6000	334	-45.6000
245	-67.2000	275	-68.2000	305	-68.1000	335	-45.3000
246	-67.0000	276	-66.4000	306	-71.3000	336	-44.9000
247	-65.9000	277	-65.1000	307	-70.3000	337	-44.5000
248	-65.6000	278	-63.9000	308	-68.5000	338	-44.2000
249	-65.6000	279	-64.5000	309	-66.9000	339	-43.6000
250	-66.9000	280	-64.5000	310	-65.0000	340	-43.2000
251	-67.1000	281	-64.6000	311	-65.0000	341	-42.8000
252	-67.3000	282	-64.7000	312	-61.3000	342	-42.2000
253	-67.8000	283	-66.3000	313	-59.9000	343	-41.7000
254	-68.9000	284	-67.0000	314	-59.3000	344	-41.2000
255	-68.2000	285	-68.9000	315	-58.0000	345	-40.9000
256	-70.5000	286	-70.4000	316	-56.9000	346	-38.5500
257	-69.9000	287	-71.1000	317	-56.1000	347	-38.6500
258	-69.2000	288	-70.4000	318	-56.2000	348	-37.8500
259	-70.2000	289	-68.4000	319	-54.8000	349	-37.5500
260	-67.8000	290	-68.9000	320	-54.2000	350	-37.4500
261	-67.5000	291	-69.3000	321	-52.8000	351	-36.9500
262	-66.3000	292	-65.6000	322	-52.3000	352	-36.7500
263	-66.9000	293	-66.5000	323	-52.4000	353	-36.5500
264	-66.2000	294	-63.6000	324	-51.1000	354	-36.3500
265	-66.8000	295	-63.9000	325	-50.6000	355	-36.1500
266	-66.9000	296	-63.5000	326	-50.0000	356	-34.5000
267	-67.1000	297	-62.8000	327	-49.5000	357	-34.1000
268	-69.1000	298	-62.4000	328	-49.1000	358	-34.1000
269	-71.2000	299	-63.4000	329	-49.1000	359	-34.0000
270	-71.8000	300	-63.6000	330	-48.2000	360	-34.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ H - Plane

Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)
1	-40.3000	31	-48.7000	61	-68.7000	91	-71.8000
2	-40.4000	32	-49.4000	62	-67.5000	92	-69.7000
3	-40.4000	33	-49.7000	63	-69.2000	93	-69.8000
4	-40.6000	34	-50.1000	64	-69.7000	94	-70.6000
5	-40.6000	35	-50.8000	65	-69.4000	95	-69.7000
6	-40.7000	36	-51.1000	66	-70.3000	96	-68.2000
7	-40.8000	37	-51.7000	67	-70.4000	97	-67.8000
8	-41.1000	38	-52.0000	68	-70.7000	98	-67.6000
9	-40.9000	39	-52.1000	69	-70.7000	99	-67.9000
10	-41.1000	40	-52.7000	70	-70.0000	100	-66.7000
11	-41.3000	41	-53.1000	71	-71.3000	101	-66.7000
12	-41.6000	42	-53.7000	72	-71.6000	102	-66.5000
13	-41.7000	43	-53.7000	73	-71.0000	103	-65.6000
14	-41.8000	44	-54.5000	74	-70.8000	104	-65.9000
15	-42.2000	45	-54.7000	75	-72.2000	105	-67.2000
16	-42.5000	46	-56.1000	76	-72.0000	106	-67.2000
17	-42.7000	47	-56.3000	77	-72.4000	107	-69.1000
18	-42.9000	48	-57.6000	78	-71.8000	108	-67.6000
19	-43.2000	49	-57.9000	79	-71.8000	109	-69.6000
20	-43.5000	50	-59.9000	80	-72.3000	110	-70.0000
21	-44.0000	51	-60.3000	81	-72.1000	111	-71.6000
22	-44.0000	52	-61.2000	82	-72.8000	112	-72.2000
23	-44.7000	53	-67.9000	83	-72.1000	113	-70.8000
24	-45.3000	54	-68.4000	84	-75.9000	114	-72.3000
25	-45.5000	55	-70.4000	85	-73.0000	115	-72.2000
26	-46.1000	56	-71.9000	86	-72.9000	116	-72.4000
27	-46.5000	57	-70.0000	87	-72.7000	117	-72.4000
28	-47.6000	58	-71.8000	88	-72.7000	118	-72.3000
29	-47.7000	59	-69.5000	89	-72.1000	119	-72.3000
30	-48.5000	60	-67.8000	90	-72.5000	120	-71.4000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ H - Plane (ต่อ)

Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)
121	-71.7000	151	-67.4000	181	-58.1000	211	-70.28
122	-70.4000	152	-67.6000	182	-58.4000	212	-68.08
123	-70.2000	153	-67.4000	183	-58.8000	213	-67.68
124	-68.5000	154	-67.2000	184	-59.1000	214	-67.38
125	-68.3000	155	-67.1000	185	-59.6000	215	-66.98
126	-67.7000	156	-68.1000	186	-59.6000	216	-65.78
127	-66.3000	157	-67.9000	187	-60.4000	217	-65.48
128	-66.3000	158	-67.7000	188	-60.9000	218	-65.68
129	-65.0000	159	-67.5000	189	-60.6000	219	-66.18
130	-65.8000	160	-68.2000	190	-62.1000	220	-66.18
131	-65.4000	161	-65.9000	191	-62.2000	221	-67.28
132	-65.0000	162	-66.0000	192	-63.0000	222	-67.68
133	-65.4000	163	-64.0000	193	-63.0000	223	-69.38
134	-65.0000	164	-64.4000	194	-63.3000	224	-69.48
135	-65.7000	165	-63.3000	195	-63.5000	225	-69.08
136	-66.0000	166	-62.8000	196	-63.9000	226	-67.78
137	-65.7000	167	-61.5000	197	-63.5000	227	-68.28
138	-67.5000	168	-60.4000	198	-64.4000	228	-67.68
139	-67.3000	169	-60.5000	199	-63.5000	229	-69.48
140	-67.7000	170	-59.1000	200	-64.0000	230	-68.98
141	-70.3000	171	-59.6000	201	-65.0000	231	-69.08
142	-69.4000	172	-58.2000	202	-64.0000	232	-70.28
143	-72.4000	173	-58.7000	203	-64.2000	233	-70.88
144	-71.9000	174	-58.2000	204	-64.6000	234	-71.18
145	-71.3000	175	-58.4000	205	-64.6000	235	-72.18
146	-71.0000	176	-58.1000	206	-65.5000	236	-72.28
147	-67.9000	177	-57.9000	207	-66.1000	237	-71.98
148	-69.3000	178	-58.0000	208	-66.8000	238	-72.18
149	-67.5000	179	-57.9000	209	-66.0000	239	-71.68
150	-67.3000	180	-58.0000	210	-66.5000	240	-72.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ H - Plane (ต่อ)

Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)
241	-66.4000	271	-70.2000	301	-63.9000	331	-45.2000
242	-65.9000	272	-70.7000	302	-63.1000	332	-44.3000
243	-66.2000	273	-66.7000	303	-61.3000	333	-44.6000
244	-64.7000	274	-67.8000	304	-63.1000	334	-43.9000
245	-64.8000	275	-66.7000	305	-67.2000	335	-43.8000
246	-64.7000	276	-65.8000	306	-60.5000	336	-43.6000
247	-64.9000	277	-65.0000	307	-67.8000	337	-43.4000
248	-64.3000	278	-64.5000	308	-64.9000	338	-42.9000
249	-65.0000	279	-65.7000	309	-62.0000	339	-42.7000
250	-65.9000	280	-66.0000	310	-61.2000	340	-42.6000
251	-67.5000	281	-66.4000	311	-58.8000	341	-42.2000
252	-67.6000	282	-67.0000	312	-53.3000	342	-42.2000
253	-68.2000	283	-66.8000	313	-55.9000	343	-41.5000
254	-69.2000	284	-68.6000	314	-54.7000	344	-41.6000
255	-69.0000	285	-68.4000	315	-53.9000	345	-41.0000
256	-69.0000	286	-68.9000	316	-51.7000	346	-40.9000
257	-69.5000	287	-70.6000	317	-52.5000	347	-40.4000
258	-69.3000	288	-71.1000	318	-51.0000	348	-40.2000
259	-68.4000	289	-71.4000	319	-50.9000	349	-40.1000
260	-69.9000	290	-72.0000	320	-49.4000	350	-39.9000
261	-69.7000	291	-69.8000	321	-49.1000	351	-39.8000
262	-69.7000	292	-70.5000	322	-48.5000	352	-39.4000
263	-70.9000	293	-67.9000	323	-47.5000	353	-39.4000
264	-71.6000	294	-64.6000	324	-47.7000	354	-39.2000
265	-70.2000	295	-66.7000	325	-46.9000	355	-39.2000
266	-71.0000	296	-65.0000	326	-46.6000	356	-39.3000
267	-71.8000	297	-64.7000	327	-46.0000	357	-39.1000
268	-71.6000	298	-63.1000	328	-45.9000	358	-39.3000
269	-71.3000	299	-65.1000	329	-45.2000	359	-39.3000
270	-72.5000	300	-62.9000	330	-45.0000	360	-39.4000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ E - Plane

Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)
1	-37.3000	31	-50.7000	61	-67.7000	91	-68.8000
2	-37.4000	32	-51.4000	62	-66.5000	92	-66.7000
3	-37.4000	33	-51.7000	63	-68.2000	93	-66.8000
4	-37.6000	34	-52.1000	64	-68.7000	94	-67.6000
5	-39.6000	35	-53.8000	65	-68.4000	95	-66.7500
6	-39.7000	36	-53.1000	66	-67.3000	96	-65.2500
7	-39.8000	37	-54.7000	67	-67.4000	97	-64.8500
8	-40.1000	38	-55.0000	68	-67.7000	98	-64.6500
9	-39.9000	39	-54.1000	69	-67.7000	99	-64.9500
10	-41.1000	40	-54.7000	70	-67.0000	100	-63.7500
11	-41.3000	41	-55.1000	71	-68.3000	101	-63.7000
12	-41.6000	42	-55.7000	72	-68.6000	102	-63.5000
13	-41.7000	43	-55.7000	73	-68.0000	103	-62.6000
14	-41.8000	44	-55.5000	74	-67.8000	104	-62.9000
15	-43.2000	45	-55.7000	75	-69.2000	105	-64.2000
16	-43.5000	46	-56.1000	76	-69.0000	106	-64.2000
17	-43.7000	47	-56.3000	77	-69.4000	107	-66.1000
18	-43.9000	48	-56.6000	78	-68.8000	108	-64.6000
19	-44.2000	49	-56.9000	79	-68.8000	109	-66.6000
20	-44.5000	50	-58.9000	80	-69.3000	110	-67.0000
21	-45.0000	51	-59.3000	81	-69.1000	111	-68.6000
22	-45.0000	52	-60.2000	82	-69.8000	112	-69.2000
23	-45.7000	53	-66.9000	83	-69.1000	113	-67.8000
24	-46.3000	54	-67.4000	84	-72.9000	114	-69.3000
25	-46.5000	55	-69.4000	85	-70.0000	115	-68.2000
26	-47.1000	56	-70.9000	86	-69.9000	116	-68.4000
27	-47.5000	57	-69.0000	87	-69.7000	117	-68.4000
28	-48.6000	58	-70.8000	88	-69.7000	118	-68.3000
29	-48.7000	59	-68.5000	89	-69.1000	119	-68.3000
30	-50.5000	60	-66.8000	90	-69.5000	120	-67.4000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ E - Plane (ต่อ)

Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)
121	-68.7000	151	-68.4000	181	-59.1000	211	-66.6000
122	-67.4000	152	-68.6000	182	-59.4000	212	-66.1000
123	-67.2000	153	-68.4000	183	-59.8000	213	-69.4000
124	-65.5000	154	-68.2000	184	-60.1000	214	-67.9000
125	-68.3000	155	-68.1000	185	-60.6000	215	-68.0000
126	-67.7000	156	-69.1000	186	-60.6000	216	-67.7000
127	-66.3000	157	-68.9000	187	-61.4000	217	-67.9000
128	-66.3000	158	-68.7000	188	-61.9000	218	-67.3000
129	-65.0000	159	-68.5000	189	-61.6000	219	-65.0000
130	-65.8000	160	-69.2000	190	-63.1000	220	-65.9000
131	-62.4000	161	-66.9000	191	-63.2000	221	-67.5000
132	-65.0000	162	-67.0000	192	-64.0000	222	-67.6000
133	-65.4000	163	-65.0000	193	-64.0000	223	-65.2000
134	-65.0000	164	-65.4000	194	-64.3000	224	-66.2000
135	-65.7000	165	-64.3000	195	-64.5000	225	-66.0000
136	-66.0000	166	-63.8000	196	-64.9000	226	-66.0000
137	-65.7000	167	-62.5000	197	-64.5000	227	-66.5000
138	-67.5000	168	-61.4000	198	-65.4000	228	-66.3000
139	-64.3000	169	-61.5000	199	-64.5000	229	-65.4000
140	-64.7000	170	-61.1000	200	-65.0000	230	-66.9000
141	-67.3000	171	-61.6000	201	-66.0000	231	-66.7000
142	-66.4000	172	-60.9500	202	-65.0000	232	-66.7000
143	-69.4000	173	-61.4500	203	-65.2000	233	-67.9000
144	-68.9000	174	-60.9500	204	-65.6000	234	-68.6000
145	-68.3000	175	-61.9000	205	-65.6000	235	-67.2000
146	-68.0000	176	-61.6000	206	-66.5000	236	-68.0000
147	-64.9000	177	-61.4000	207	-67.1000	237	-68.8000
148	-66.3000	178	-61.5000	208	-67.8000	238	-68.6000
149	-64.5000	179	-60.4000	209	-67.0000	239	-68.3000
150	-68.3000	180	-60.5000	210	-70.7000	240	-69.5000

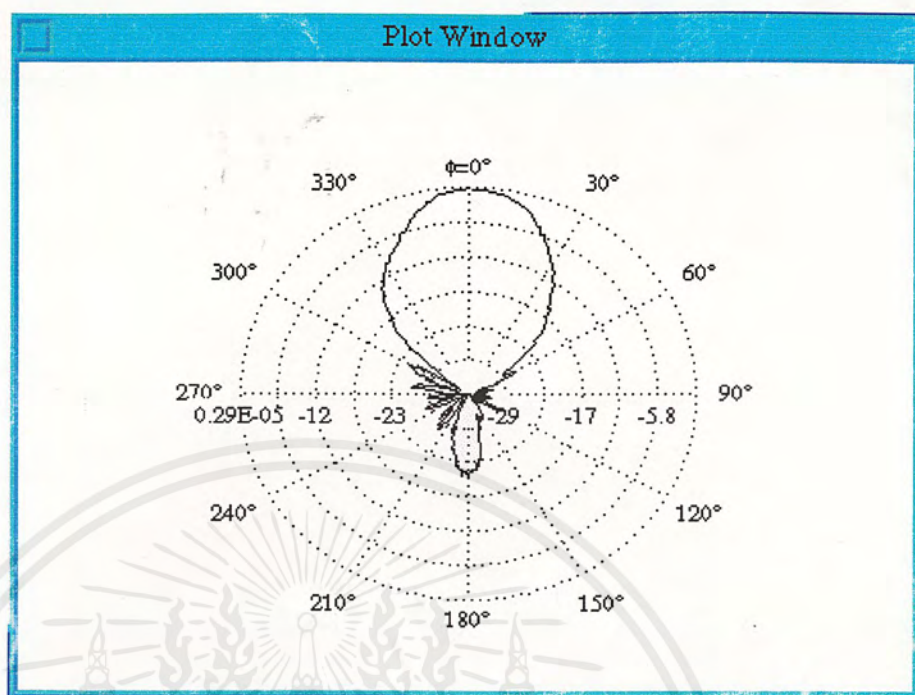
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่ากำลังของสนามที่รับได้ของฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ E - Plane (ต่อ)

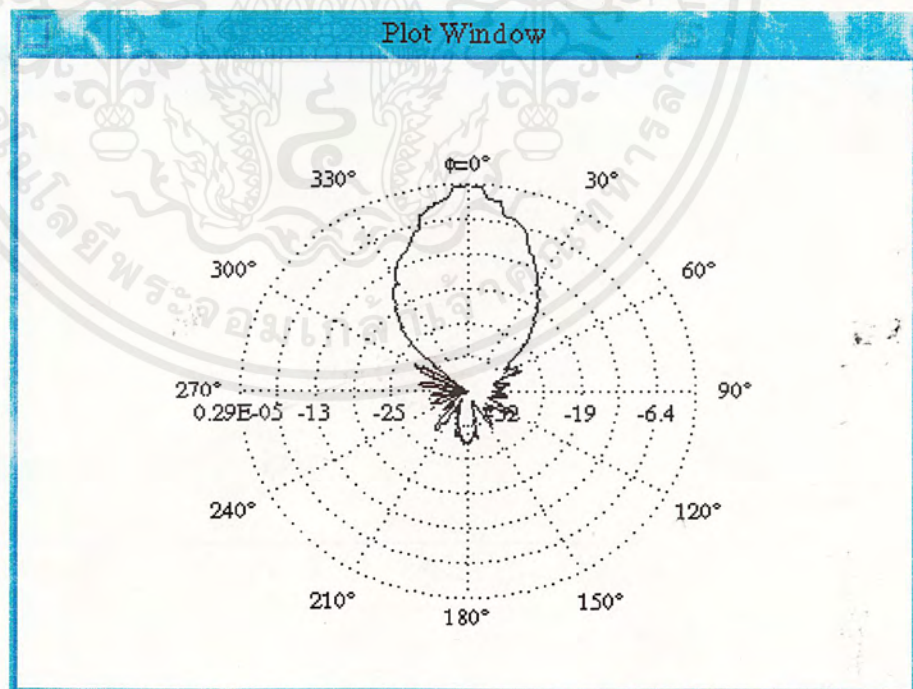
Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)	Degree	Power (dBm)
241	-69.1000	271	-67.2000	301	-60.9000	331	-47.2000
242	-68.7000	272	-67.7000	302	-60.1000	332	-46.3000
243	-69.6000	273	-63.7000	303	-58.3000	333	-46.6000
244	-66.6000	274	-64.8000	304	-60.1000	334	-45.9000
245	-67.3000	275	-63.7000	305	-64.2000	335	-45.8000
246	-64.6000	276	-62.8000	306	-57.5000	336	-44.6000
247	-66.1000	277	-62.0000	307	-64.8000	337	-44.4000
248	-64.6000	278	-61.5000	308	-63.9000	338	-43.9000
249	-64.6000	279	-62.7000	309	-61.0000	339	-43.7000
250	-64.5000	280	-63.0000	310	-60.2000	340	-43.6000
251	-64.6000	281	-63.4000	311	-59.8000	341	-41.2000
252	-64.6000	282	-64.0000	312	-54.3000	342	-41.2000
253	-65.3000	283	-63.8000	313	-56.9000	343	-40.5000
254	-65.5000	284	-65.6000	314	-55.7000	344	-40.6000
255	-67.0000	285	-65.4000	315	-58.4000	345	-40.0000
256	-67.3000	286	-65.9000	316	-54.2000	346	-39.9000
257	-67.5000	287	-67.6000	317	-55.9500	347	-39.4000
258	-66.0000	288	-68.1000	318	-53.9500	348	-39.2000
259	-66.5000	289	-68.4000	319	-53.8500	349	-39.1000
260	-63.5000	290	-69.0000	320	-58.4500	350	-38.9000
261	-64.4000	291	-66.8000	321	-54.6500	351	-38.8000
262	-63.6000	292	-67.5000	322	-54.0500	352	-38.4000
263	-63.8000	293	-64.9000	323	-53.0500	353	-38.4000
264	-63.9000	294	-61.6000	324	-53.2500	354	-38.2000
265	-64.7000	295	-63.7000	325	-52.4500	355	-38.6500
266	-66.2000	296	-62.0000	326	-49.4500	356	-37.7500
267	-68.4000	297	-61.7000	327	-48.8500	357	-36.5500
268	-68.3000	298	-60.1000	328	-46.8500	358	-36.7500
269	-69.8000	299	-62.1000	329	-46.1500	359	-36.7500
270	-69.4000	300	-59.9000	330	-47.9500	360	-36.8500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าที่วัดได้จากตารางที่ 4.1 - 4.4 มาพล็อตกราฟโพลาไร์ได้แสดงในรูปที่ 4.8 - 4.12



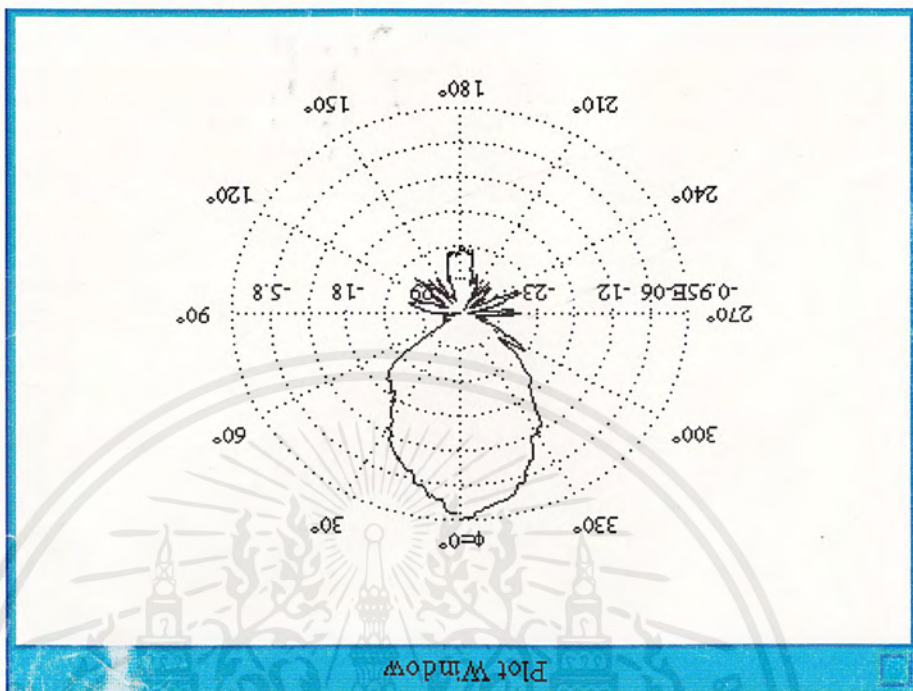
รูปที่ 4.8 แสดงค่าเรดิเอชันแพทเทอรัล ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 1 ในระนาบ H - plane



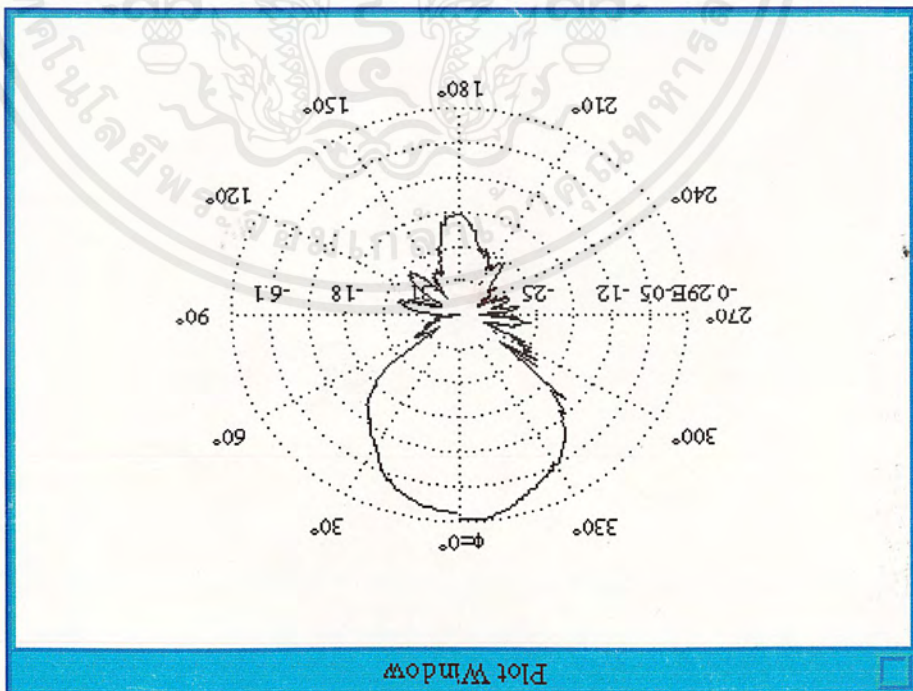
รูปที่ 4.9 แสดงค่าเรดิเอชันแพทเทอรัล ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 1 ในระนาบ E - plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

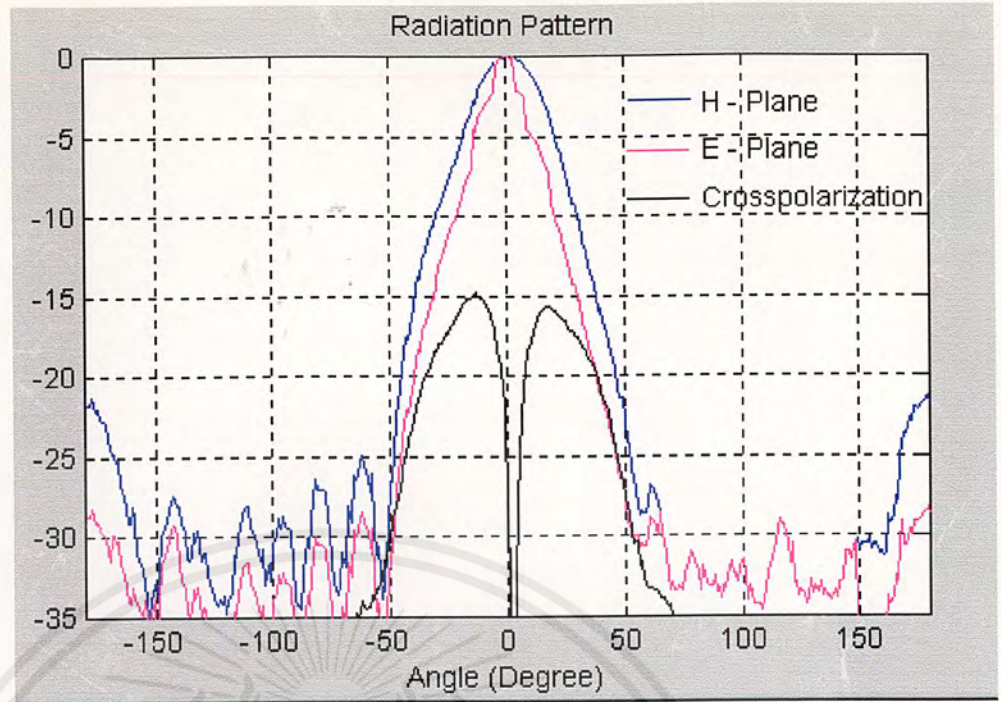
รูปที่ 4.11 แสดงค่าการกระจายของแอมพลิจูดของสัญญาณในระนาบ E - plane



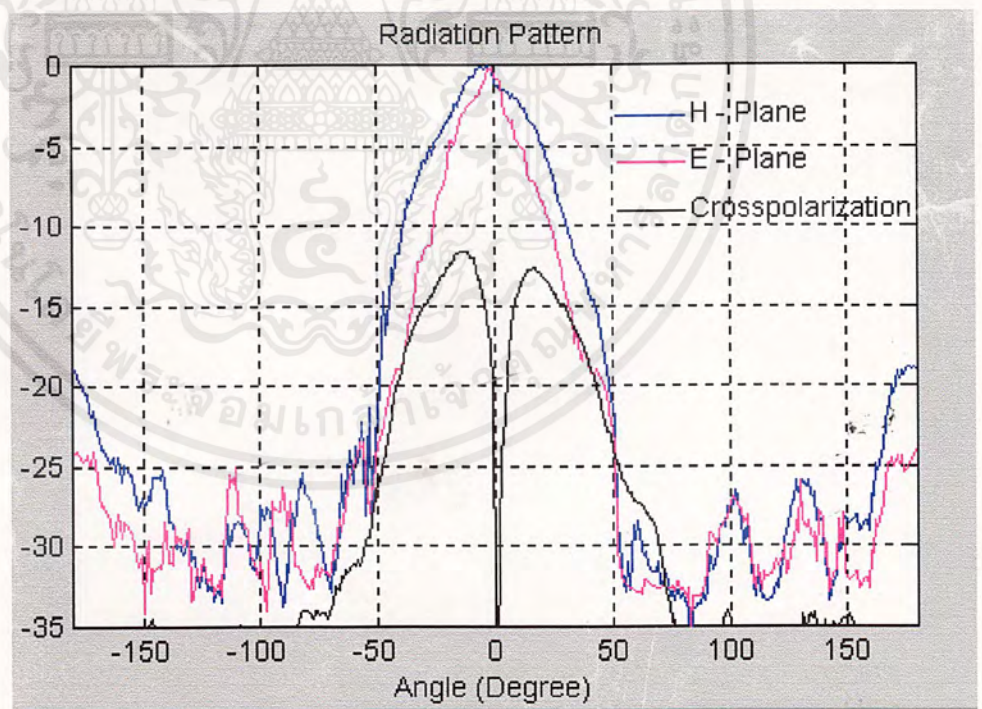
รูปที่ 4.10 แสดงค่าการกระจายของแอมพลิจูดของสัญญาณในระนาบ H - plane



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 61
 ไม่สามารถแก้ไขได้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงค่าเรดิเอชันแพทเทิร์น ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 1 ในระนาบ E - plane H - Plane และ Crosspolarization



รูปที่ 4.13 แสดงค่าเรดิเอชันแพทเทิร์น ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 2 ในระนาบ E - plane H - Plane และ Crosspolarization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เมื่อได้ค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมที่วัดได้จากแพทเทิร์นที่วัดได้แล้ว นำมาหาค่าไดเรกทิวิตีจากสมการที่ 2.24

$$D_0 \approx \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} = \frac{41253}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}}$$

ไดเรกทิวิตีของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 1

เมื่อ Θ_{1d} = HPBW ฮอร์นตัวที่ 1 ในระนาบ H - Plane = 31.94 องศา

Θ_{2d} = HPBW ฮอร์นตัวที่ 1 ในระนาบ E - Plane = 18.34 องศา

$$D_0 = \frac{41253}{31.94 \times 18.34} = 70.41$$

$$D_0(\text{dB}) = 10\log_{10} 70.41 = 18.47 \text{ dB}$$

ไดเรกทิวิตีของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 2

Θ_{1d} = HPBW ฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ H - Plane = 32.61 องศา

Θ_{2d} = HPBW ฮอร์นตัวที่ 2 ในระนาบ E - Plane = 18.27 องศา

$$D_0 = \frac{41253}{32.61 \times 18.27} = 69.22$$

$$D_0(\text{dB}) = 10\log_{10} 69.22 = 18.40 \text{ dB}$$

5. คำนวณหาค่าเกนของสายอากาศได้จากสมการ

$$G_r = P_r - P_t - G_t + L_{fs} + L_t + L_r + PLF$$

เกนของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 1

เมื่อ G_r คือ เกนของสายอากาศรับ

P_t คือ กำลังของเครื่องส่ง ที่ส่งคลื่นออกมา = 10 dBm

P_r คือ กำลังของสนามวัดได้จากสายอากาศรับ = -34 dBm

G_t คือ เกนของสายอากาศส่ง = 6.9 dBi

L_{Tt} คือ ค่าการสูญเสียในสายส่ง = 3.6 dBm

L_{Tr} คือ ค่าการสูญเสียในสายรับ = 3.7 dBm

L_{fs} คือ ค่าการสูญเสียเนื่องจากอากาศ (Free Space Loss)

$$L_{fs} = 20\log\left[\frac{4\pi R}{\lambda}\right]$$

R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งกับสายอากาศตัวรับ = 6.0 m

λ คือ ความยาวคลื่น = 0.1666 m

$$L_{fs} = 20\log\left[\frac{4\pi \times 6.0}{0.1666}\right] = 53.11 \text{ dB}$$

$$G_r = -34 \text{ dBm} - 10 \text{ dBm} - 6.9 \text{ dBi} + 53.11 \text{ dB} + 3.6 \text{ dBm} + 3.7 \text{ dBm}$$

$$= 9.51 \text{ dBi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกณฑ์ของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 2

เมื่อ G_r คือ เกณฑ์ของสายอากาศรับ

$$P_t = 10 \text{ dBm}$$

$$P_r = -36.85 \text{ dBm}$$

$$G_t = 6.9 \text{ dBi}$$

$$L_{Tt} = 3.6 \text{ dBm}$$

$$L_{Tr} = 3.7 \text{ dBm}$$

$$L_{fs} = 53.11 \text{ dB}$$

$$\begin{aligned} G_r &= -36.85 \text{ dBm} - 10 \text{ dBm} - 6.9 \text{ dBi} + 53.11 \text{ dB} + 3.6 \text{ dBm} + 3.7 \text{ dBm} \\ &= 6.66 \text{ dBi} \end{aligned}$$

6. คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ จากสมการ 2.33

$$\begin{aligned} G_o &= G_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} = e_t D_g(\theta, \phi) \Big|_{\max} \\ &= e_t D_o \end{aligned}$$

$$10 \log_{10} e_t = G_o(\text{dB}) - D_o(\text{dB})$$

ประสิทธิภาพของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 1

$$10 \log_{10} e_t = 9.51 - 18.47$$

$$= -8.96 \text{ dB}$$

$$e_t = 10^{\frac{-8.96}{10}} = 0.127$$

เพราะฉะนั้น ประสิทธิภาพของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 1 เท่ากับ 12.7 เปอร์เซ็นต์

ประสิทธิภาพของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 2

$$10 \log_{10} e_t = 6.66 - 18.40$$

$$= -11.74 \text{ dB}$$

$$e_t = 10^{\frac{-11.74}{10}} = 0.067$$

เพราะฉะนั้น ประสิทธิภาพของเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ตัวที่ 2 เท่ากับ 6.7 เปอร์เซ็นต์

7. เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลทางทฤษฎีที่คำนวณได้ดังนี้

หาค่าเกณฑ์จากสมการที่ (3.25)

$$Gain(\text{dB}) = \log\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right) - L_s$$

$$L_s = 0.8 - 1.7s + 26.25s^2 - 17.79s^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ L_s เป็นค่าการสูญเสียเนื่องจาก spherical wave phase error

จากสมการในหัวข้อ 3.5

$$s = \frac{d^2}{8\lambda}$$

จากรูปที่ 3.14 ได้ $d = 50 \text{ cm}$, $L = 44.25 \text{ cm}$

$$l = \sqrt{a^2 + L^2} = 50.82 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1.8 \times 10^9} = 0.166667 \text{ m} = 16.6667 \text{ cm}$$

หาค่า s ได้

$$s = \frac{0.5^2}{8 \times 0.166 \times 0.582} = 0.322$$

และหาค่า L_s ได้

$$L_s = 0.8 - 1.71 \times 0.322 + 26.25 \times 0.322^2 - 17.79 \times 0.322^3 = 2.376$$

ดังนั้นจึงหาค่าเกณฑ์ได้

$$\text{Gain(dB)} = 20 \log \left(\frac{\pi \times 0.5}{0.166667} \right) - 2.376 = 17.10 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สายอากาศเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น ที่ย่านความถี่ 1700-1900 MHz จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่า VSWR ของสายอากาศนี้ ได้น้อยกว่า 1.5:1 และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม จึงสามารถนำลำโพงฮอร์นมาสร้างเป็นสายอากาศได้ ในโครงการนี้ในส่วนของ การปรับแต่ง ตำแหน่งของโพรบ และความยาวของ โพรบ เป็นสิ่งที่สำคัญเพราะมันจะมีผลกับค่าอิมพีแดนซ์,ค่า VSWR และ คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศด้วย เมื่อวัดค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศและนำค่าที่ได้ไป คำนวณจะได้ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ	ฮอร์นตัวที่ 1	ฮอร์นตัวที่ 2
ค่า VSWR	1:1.166	1:1.203
ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)	50 + j 7.574	44.5 - j6.742
ค่ารีเทิร์นลอส (dB)	-20.35	-20.99
ค่าบีมิววิตช์ในระนาบ H - Plane (องศา)	31.94	32.61
ค่าบีมิววิตช์ในระนาบ E - Plane (องศา)	18.34	18.27
ค่าโคเรคทีวิตี (dB)	18.47	18.40
ค่าเกน (dBi)	9.51	6.66
ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ (%)	12.7	6.7

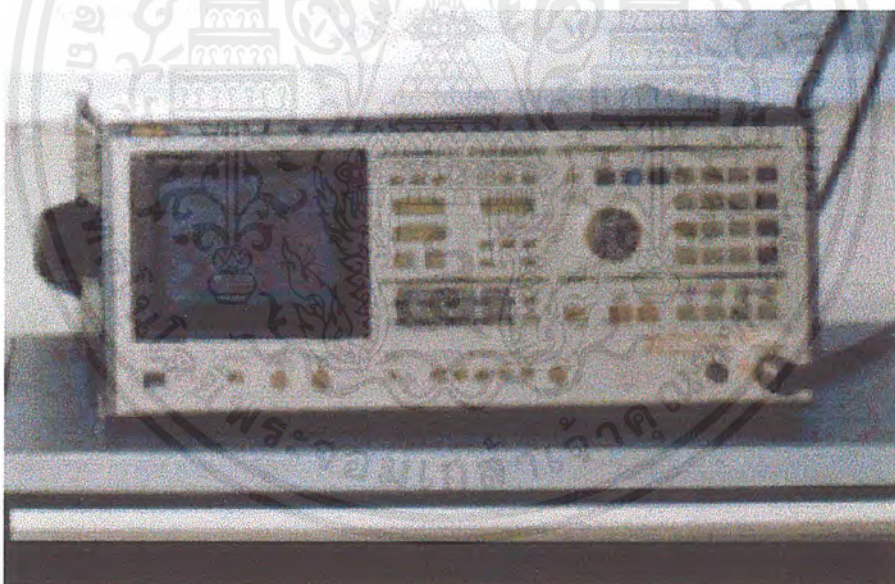
จากการคำนวณหาค่าเกนของสายอากาศในทางทฤษฎีเท่ากับ 17.10 dBi ซึ่งมากกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอาจเนื่องมาจากตัวลำโพงและ โพรบที่ทำมาจากโลหะที่เป็นตัวนำไม่ดีเท่าที่ควร และขนาดของฮอร์นที่ไม่เหมาะสม ในการทดลองนี้ค่าบีมิววิตช์ของแพทเทอร์นในระนาบของ H - Plane มีบีมิววิตช์ที่กว้างทำให้ ค่าโคเรคทีวิตี และประสิทธิภาพที่ได้ต่ำ ดังนั้นในการปรับปรุงสายอากาศนี้ควรทำให้ค่าบีมิววิตช์แคบลง

ประโยชน์ที่จากโครงการนี้ ทำให้สามารถใช้เครื่องมือวัดสายอากาศได้ ทราบถึงวิธีการวัดสายอากาศ และการคำนวณหาคุณสมบัติต่างของสายอากาศในทางทฤษฎี มีประสบการณ์ในการทำงานร่วมกัน

ภาคผนวก ก.

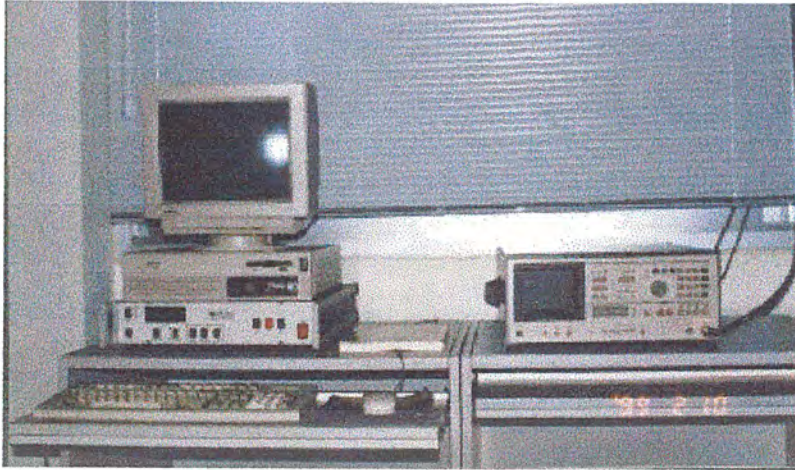


รูปที่ 1 แสดงเครื่องซิกแนลเจเนอเรเตอร์ (Signal Generator)

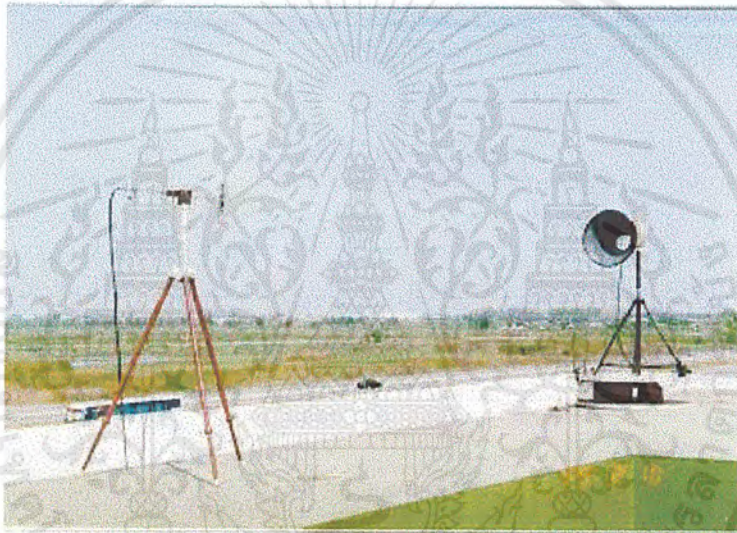


รูปที่ 2 แสดงเครื่องสเปกตรัมอะนาไลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 แสดงเครื่องควบคุมตำแหน่งและบันทึกค่าอัตโนมัติ



รูปที่แสดงการวัดแพทเทอรันในระนาบ H - Plane



รูปที่แสดงการวัดแพทเทอรันในระนาบ E - Plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิติกรรมประกาศ

โครงการสายอากาศเอ็กซ์โปเนนเชียลฮอร์น สามารถดำเนินงานเป็นโครงการที่สำเร็จได้ ต้องขอขอบคุณ อาจารย์ โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ให้ใช้เครื่องมือวัดสายอากาศและให้ความรู้เกี่ยวกับเรื่องสายอากาศเป็นอย่างดี โดยเฉพาะท่านอาจารย์ สมผล โกศลวิตรที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ขอขอบคุณผู้แต่งหนังสือที่ใช้อ้างอิงในโครงการนี้ และทุก ๆ ท่านที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. โมโนย ไกรฤกษ์, ทฤษฎีสายอากาศ, สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์
2. บัณฑิต ไรจน์อรยานนท์, วิศวกรรมสายอากาศ, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. พิชัย ภัคดีพานิชเจริญ, “ทฤษฎีและการใช้งานความถี่ย่านไมโครเวฟ”, สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์
4. Robert E. Collin, “Antenna and Radiowave Propagation”, McGraw-Hill Book Company, New York, 1985.
5. Edward A. Wolf, “Antenna Analysis”, John Wiley and Sons Inc, 1966
6. Constatine A. Balanis, “Antenna Theory”, ArizonaState University, John Wielely and Sons Inc, 1997



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้