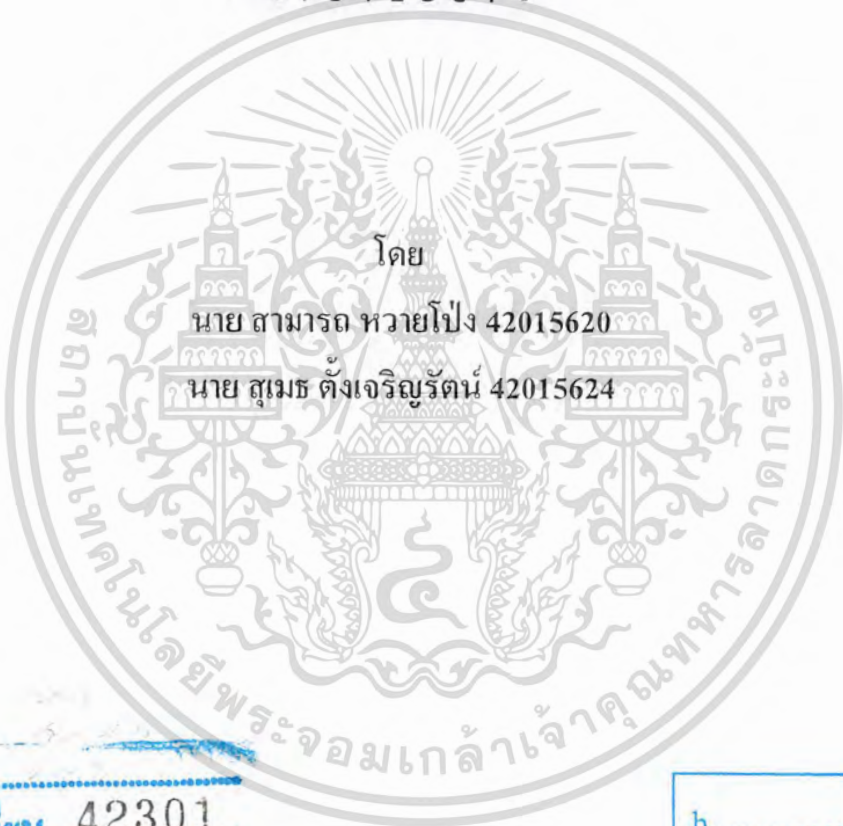


การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศปากแตร

Analysis and Design of Horn Antenna



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 42301
วัน, เดือน, ปี 6 พ.ศ. 2545

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศปากแตร
Analysis and Design of Horn Antenna

โดย นาย สามารถ หวายโป่ง 42015620

นาย สุเมธ ตั้งเจริญรัตน์ 42015624

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ มนต์ชัย แซ่มซ้อย

อาจารย์ พิชญ์ สุพรรณกุล

ภาควิชา เทคนิคอุตสาหกรรม

สาขาวิชา เทคโนโลยีโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2543

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

.....กรรมการ

.....กรรมการ

.....กรรมการ

.....กรรมการ

.....กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศปากแตร
Analysis and Design of Horn Antenna

ชื่อนักศึกษา นาย สามารถ หววยโป่ง 42015620
 นาย สุเมธ ตั้งเจริญรัตน์ 42015624

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ มนต์ชัย แซ่มซ้อย
 อาจารย์ พิชญ์ สุพรรณกุล

ปริญญา อดสาหกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชา เทคโนโลยีโทรคมนาคม
 ภาควิชา เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
 ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศปากแตรในโครงสร้าง 3 โครงสร้าง ได้แก่ สายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า สายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก และสายอากาศปากแตรรูปพีระมิด ซึ่งสายอากาศปากแตรทั้ง 3 โครงสร้างนี้ได้ถูกออกแบบให้ใช้งานในย่านความถี่ 8-12 GHz

จากผลการทดลองที่ได้ออกมาสรุปได้ว่า สายอากาศปากแตรเป็นสายอากาศที่ให้อัตราขยายสูง และมีบีมวิธแคบตามที่ต้องการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ดีในทั้ง 2 ระนาบหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นเป็นผลสำเร็จ ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือตลอดมา ขอขอบพระคุณท่านบูรพาจารย์ทั้งหลาย ท่านผู้เขียนเอกสารและตำราอ้างอิงต่างๆ ทุกท่าน ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ภาคเทคนิคอุตสาหกรรมทุกท่าน โดยเฉพาะท่านอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์มนต์ชัย แซ่มะซ้อย อาจารย์พิชญ์ สุพรรณภู และอาจารย์ พนาวัฒน์ ระวีวรรณ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือทางด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ยิ่ง ไม่ว่าจะเป็น ทางด้านเอกสาร ทฤษฎี และปฏิบัติ ขอขอบพระคุณภาคเทคนิคอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสคณะผู้จัดทำ ได้เข้ามาศึกษา ณ สถาบันแห่งนี้

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ กลุ่มผู้จัดทำจนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

นาย สามารถ หววยโป่ง
นาย สุเมธ ตั้งเจริญรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 ขอบเขตโครงงาน	2
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	3
บทที่ 2 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ	4
2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	4
2.1.1 แบบรูปแบบไอโซโทรปิก ไดเร็กชันแนล และอสมิไดเร็กชันแนล	4
2.1.2 แบบรูปหลัก	5
2.1.3 โลกของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	6
2.1.4 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ	8
2.1.5 เวกเตอร์และสเกลาร์เวกเตอร์	9
2.2 ฮาโลฟพาวเวอร์บีมวิทซ์	9
2.3 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย	9
2.4 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	12
2.5 ไดเรกตีวีตี	13
2.6 อัตราขยาย	17
2.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ	19
2.8 อินพุทอิมพีแดนซ์	20
2.9 แบนด์วิทซ์	21
บทที่ 3 สายอากาศปากแตร	23
3.1 กล่าวนำ	23
3.2 สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบ สนามไฟฟ้า	30
3.4 สายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก	32
3.5 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบ สนามแม่เหล็ก	37
3.6 สายอากาศปากแตรรูปพีระมิด	39
3.7 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศปากแตรรูปพีระมิด	42
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	45
4.1 กล่าวนำ	45
4.2 การวัดความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ	45
4.3 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	54
บทที่ 5 บทสรุป	58
เอกสารอ้างอิง	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบหลักของระบบการสื่อสารโดยใช้คลื่นแม่เหล็ก	1
รูปที่ 2.1 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	4
รูปที่ 2.2 แบบรูปของสายอากาศชี้ทิศทาง	5
รูปที่ 2.3 แบบรูประนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร	6
รูปที่ 2.4 a) โลบต่างๆ ของบีมวิทช์ของแบบรูปสายอากาศ b) แบบรูปแบบลิเนียร์	7
รูปที่ 2.5 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	8
รูปที่ 2.6 คำจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน	10
รูปที่ 2.7 มุมตันของ Ω ซึ่งมีแบบรูปของการแพร่กระจายที่ไม่สมมาตร และสมมาตรกัน	15
รูปที่ 2.8 ขั้วอ้างอิงและการสูญเสียของสายอากาศ	18
รูปที่ 2.9 สายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์	21
รูปที่ 3.1 รูปร่างของสายอากาศปากแตรชนิดต่างๆ	23
รูปที่ 3.2 a) สายอากาศปากแตรในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อมองแบบ 3 มิติ b) เมื่อมองลงบนระนาบสนามไฟฟ้า	24
รูปที่ 3.3 อัตราขยายของสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบ สนามไฟฟ้า	29
รูปที่ 3.4 สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้ จากการวิเคราะห์และออกแบบ	31
รูปที่ 3.5 สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก	32
รูปที่ 3.6 อัตราขยายของสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบ สนามแม่เหล็ก	37
รูปที่ 3.7 สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้ จากการวิเคราะห์และออกแบบ	38
รูปที่ 3.8 สายอากาศปากแตรรูปพีระมิด	39
รูปที่ 3.9 สายอากาศปากแตรรูปพีระมิดที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 สายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ	46
รูปที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ $S(S_{11})$ ของสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออก ในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์	46
รูปที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ $S(S_{11})$ ของสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออก ในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง	47
รูปที่ 4.4 ค่า SWR ของสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบ สนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง	47
รูปที่ 4.5 สายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ	48
รูปที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ $S(S_{11})$ ของสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออก ในระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์	48
รูปที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ $S(S_{11})$ ของสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออก ในระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดลอง	49
รูปที่ 4.8 ค่า SWR ของสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบ สนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดลอง	49
รูปที่ 4.9 สายอากาศปากแตรรูปพีระมิดที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ	50
รูปที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ $S(S_{11})$ ของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดที่ได้จาก การจำลองแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์	50
รูปที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ $S(S_{11})$ ของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดที่ได้จาก การทดลอง	51
รูปที่ 4.12 ค่า SWR ของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดที่ได้จากการทดลอง	51
รูปที่ 4.13 สายอากาศปากแตรรูปพีระมิดของชุดทดลองไมโครเวฟ	52
รูปที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ $S(S_{11})$ ของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดของ ชุดทดลองไมโครเวฟที่ได้จากการทดลอง	52
รูปที่ 4.15 ค่า SWR ของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดของชุดทดลอง ไมโครเวฟที่ได้จากการทดลอง	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ $S(S_{11})$ ของสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ที่ได้จากการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน	53
รูปที่ 4.17 ค่า SWR ของสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ที่ได้จากการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน	54
รูปที่ 4.18 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร	55
รูปที่ 4.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า	55
รูปที่ 4.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก	56
รูปที่ 4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิด	56
รูปที่ 4.22 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลองของสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ กับสายอากาศปากแตรของชุดทดลองไมโครเวฟ ในจุดที่ผลการทดลองให้ค่าดีที่สุด	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในระบบสื่อสารแบบที่ใช้การกระจายคลื่นนั้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ เครื่องส่ง สายนำสัญญาณ สายอากาศ และเครื่องรับดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1.1 สายนำสัญญาณจะทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศ หรือสายอากาศมายังเครื่องรับ สายอากาศนั้นอาจกล่าวได้ว่า เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงกำลังงานไฟฟ้า จากเครื่องส่งให้เป็นกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่เดียวกันสายอากาศรับก็จะทำหน้าที่รับกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วส่งเข้าสายนำสัญญาณในรูปของกำลังไฟฟ้า เพื่อส่งผ่านไปยังเครื่องรับต่อไป อันที่จริงแล้ว กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านไปตามสายนำสัญญาณนั้น ถ้าพิจารณากันอย่างลึกซึ้งแล้วจะเป็นการส่งผ่านกำลังในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกัน เพียงแต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นถูกบังคับให้ส่งผ่านไปตามโครงสร้างของสายนำสัญญาณเท่านั้น ตัวอย่างของสายนำสัญญาณที่เห็นได้ชัดว่าส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือ ท่อนำคลื่นซึ่งทำด้วยโลหะตัวนำไฟฟ้าเพียงชั้นเดียว



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบหลักของระบบการสื่อสาร โดยใช้คลื่นแม่เหล็ก

สายอากาศจัดว่าเป็นอุปกรณ์สำคัญที่สุดอันหนึ่งในระบบการสื่อสารที่ใช้คลื่น เพราะสายอากาศที่ดีและมีประสิทธิภาพสูงจะทำให้สามารถประหยัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องส่ง และทำให้สามารถติดต่อกันได้ในระยะที่ไกลขึ้น สายอากาศจึงได้รับการคิดค้นและพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะต่างๆ ดังจะเห็นได้ว่าสายอากาศที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายแบบด้วยกัน เมื่อพิจารณากันอย่างกว้างๆ แล้วสายอากาศอาจจะมีโครงสร้างได้มากมายหลายรูปแบบเพราะเนื่องจากถ้าเรากำหนดให้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลบนโลหะอย่างเหมาะสมแล้วก็จะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ซึ่งสามารถส่งออกไปยังที่อื่นได้โดยไม่ต้องใช้สายนำสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กส่งผ่านออกไปได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้น สายอากาศที่ถูกนำมาใช้งานนั้นนอกจากจะต้องมีประสิทธิภาพสูง มีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นตามต้องการแล้วยังต้องมีรูปร่างที่สะดวกต่อการสร้าง มีความแข็งแรง และมีราคาถูกด้วย ด้วยเหตุนี้สายอากาศที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันจึงมีจำนวนรูปแบบที่จำกัด และในจำนวนนี้จะมีสายอากาศที่เป็นพื้นฐานที่มีโครงสร้างง่ายๆ และมีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นอยู่ในเกณฑ์ดี เช่น สายอากาศไดโพล เป็นต้น สายอากาศที่เป็นพื้นฐานเหล่านี้มักจะได้รับการพิจารณาในการใช้งานเสมอ

ถึงแม้สายอากาศจะได้รับการคิดค้น และพัฒนากันมาหลาย 10 ปีแล้วก็ตาม ในปัจจุบันนี้ก็ยังมีกรวิจัยและพัฒนาสายอากาศรูปแบบใหม่ๆ ขึ้นเสมอ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า ความต้องการของการสื่อสารที่ใช้คลื่นนั้นได้แผ่กว้างออกไป และได้มีความต้องการในลักษณะเฉพาะต่างๆ เกิดขึ้นเสมอ ยกตัวอย่างเช่นในระบบสื่อสารดาวเทียมภายในประเทศ (Domestic Satellite Communication System) สายอากาศบนดาวเทียมจะต้องส่งคลื่นลงมาตรงบริเวณที่ต้องการเท่านั้น โดยไม่ล้ำเข้าเขตของประเทศที่ไม่ต้องการคลื่นนั้น ในลักษณะเช่นนี้ สายอากาศบนดาวเทียมก็จำเป็นต้องได้รับการออกแบบพิเศษให้มีคุณสมบัติในการกระจายคลื่นตามต้องการนั้น

สายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ (Aperture) เป็นสายอากาศที่มีใช้กันอย่างกว้างขวาง ในย่านความถี่ไมโครเวฟ ทั้งนี้เพราะในย่านความถี่นี้การส่งผ่านสัญญาณโดยใช้สายนำสัญญาณจะมีการสูญเสีย และความผิดเพี้ยนของสัญญาณสูง แต่การส่งผ่านสัญญาณโดยการกระจายคลื่น การสูญเสียกำลังคลื่นน้อย และมีราคาถูกกว่า สายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ที่พบบ่อยๆ ได้แก่ สายอากาศสะท้อนคลื่นรูปทรงพาราโบลอยด์ (Paraboloidal Reflector Antenna) และสายอากาศปากแตร (Horn Antenna) สายอากาศอะเพอร์เจอร์นี้ จะต้องมีความกว้างและความยาวของอะเพอร์เจอร์อย่างน้อยหลายๆ เท่าของความยาวคลื่นเพื่อให้มีอัตราขยายสูง

โครงการนี้ทำการออกแบบสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ที่ใช้งานในย่านความถี่ 8 - 12 GHz และทดลองวัดผลตอบสนองต่อความถี่ วัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบบรูปการแพร่กระจายกำลัง ค่าอัตราขยาย และไดเรกทิวิตี เพื่อนำสายอากาศที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบเป็นสายอากาศของชุดทดลองไมโครเวฟเพื่อการศึกษาการสื่อสารย่านไมโครเวฟ

1.2 ขอบเขตของโครงการ

1. ทำการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane Sectoral) ที่ใช้ในย่านความถี่ 8-12 GHz และทำการทดลองเพื่อนำผลที่ได้ไปเทียบกับผลทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane Sectoral) ที่ใช้ในย่านความถี่ 8- 12 GHz และทำการทดลองเพื่อนำผลที่ได้ไปเทียบกับผลทางทฤษฎี

3. ทำการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศปากแตรรูปพีระมิด (Pyramidal) ที่ใช้ในย่านความถี่ 8- 12 GHz และทำการทดลองเพื่อนำผลที่ได้ไปเทียบกับผลทางทฤษฎี

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. สามารถวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม
2. สามารถสร้างสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ
3. เข้าใจหลักการในการวัดและทดสอบสายอากาศ
4. สามารถใช้เครื่องมือวัดต่างๆ เช่น เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย, เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม และเครื่องกำเนิดความถี่ไมโครเวฟได้อย่างถูกต้อง

บทที่ 2

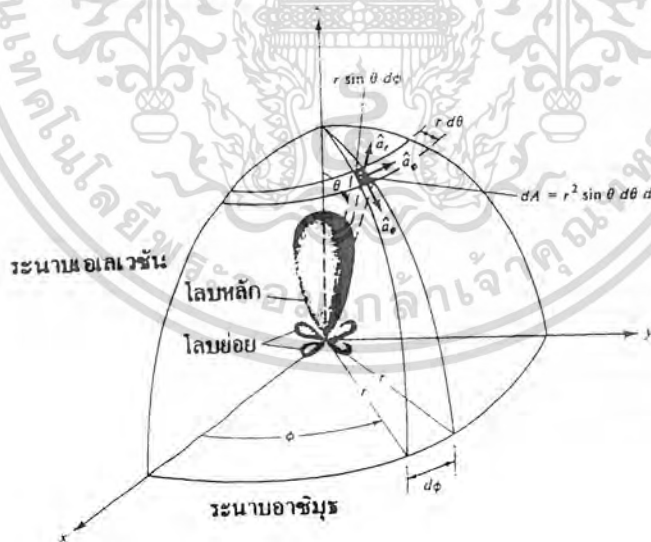
พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (radiation pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นคือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นซึ่งเป็นฟังก์ชันสเปสโคออดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้จะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นจะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ความเข้มสนาม (Field strength) เฟส (Phase) หรือโพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงของพลังงานเป็นฟังก์ชันของ ตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.1 แสดงระบบ โคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น เพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศด้านรับ ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่เรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่าแบบรูปสนาม (Field pattern) ของสายอากาศนั้น



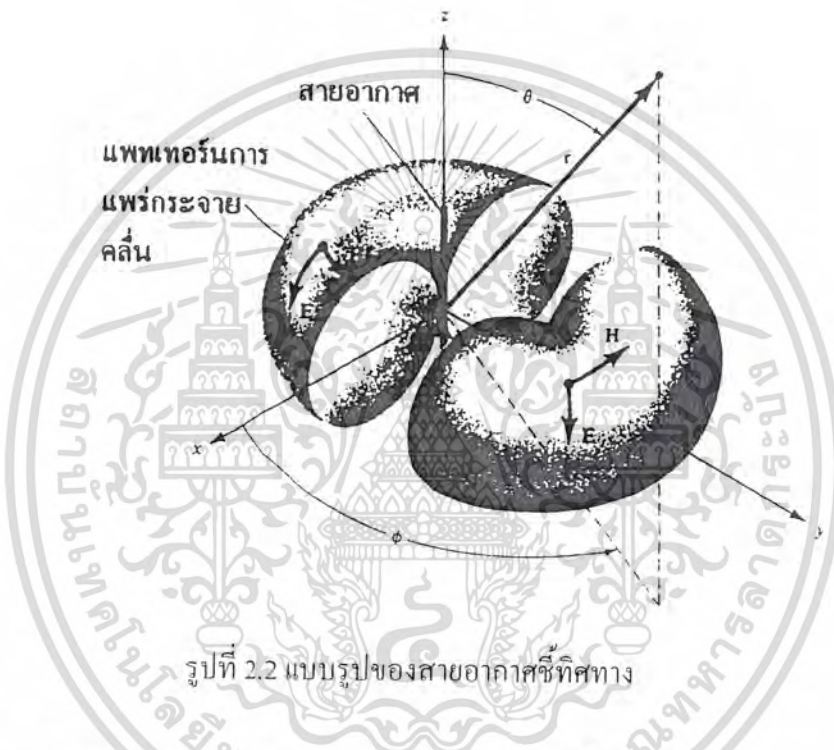
รูปที่ 2.1 ระบบ โคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

2.1.1 แบบรูปแบบไอโซโทรปิก ไดเรกชันแนลและออมนิไดเรกชันแนล

ตัวแพร่คลื่นไอโซโทรปิก (Isotropic radiator) คือสายอากาศที่ถูกสมมติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่นแหล่งกำเนิดแบบจุด (Point source) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติและแสดงทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบออมนิไดเรกชันแนล (Omnidirectional antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้มีแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบรูปของสายอากาศชี้ทิศทาง

ตามรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าแบบรูปของสายอากาศแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุท (Azimuth plane) โดย $f(\theta)$, ϕ เป็นค่าคงที่ แต่เป็นแบบระนาบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชัน (Elevation plane) $g(\theta)$, ϕ เป็นค่าคงที่ แบบรูปของสายอากาศแบบออมนิไดเรกชันแนลนี้เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปของสายอากาศแบบชี้ทิศทาง

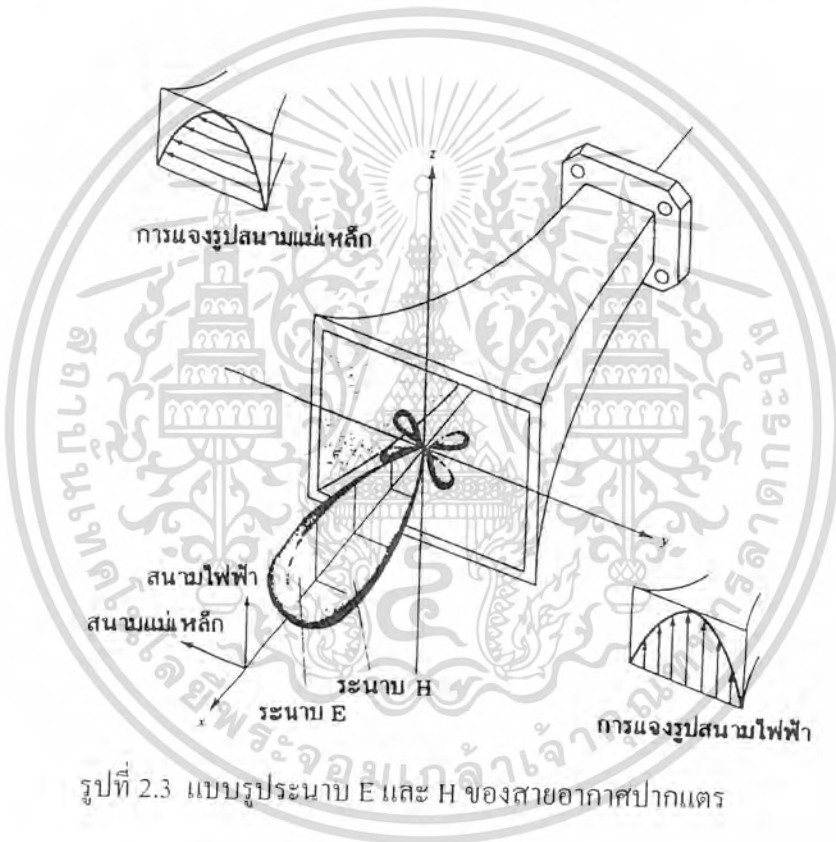
2.1.2 แบบรูปหลัก (Principle pattern)

เรามักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแบบรูปในระนาบหลัก (Principle pattern) ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสำหรับสายอากาศแบบลิเนียร์โพลาไรเซชัน (Linearly Polarization) แบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้า จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ส่วนแบบรูปในระนาบสนามแม่เหล็ก จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปหลัก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ของการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงในรูปที่ 2.3 โดยระนาบ XZ (ระนาบเอเลเวชัน : $\phi = 0$) เป็นระนาบสนามไฟฟ้าหลัก และมีระนาบ XY (ระนาบอาซิมุท : $\phi = \pi/2$) เป็นระนาบสนามแม่เหล็กหลัก

2.1.3 โลบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

โอบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูปที่ 2.4 แสดง แบบรูปแบบโพลาร์ (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นโอบแบบต่างๆ ดังนี้



โอบหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นโอบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 2.4 มีโอบหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีโอบหลักมากกว่า 1 โอบ เช่นสายอากาศแยกบีม (Split Beam Antenna)

โอบย่อย (Minor lobe) ได้แก่โอบอื่นๆ นอกเหนือไปจากโอบหลัก

โอบข้างหรือไซด์โอบ (Side Lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ติดกับโอบหลักและอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโอบหลัก

โอบหลัง (Back Lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโอบหลัก ปกติแล้วโอบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำจัดโลบเหล่านี้ให้น้อยที่สุด ระดับโลบย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในโลบที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโลบหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของไซด์โลบ (Side Lobe Ratio) หรือระดับของไซด์โลบ (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โลบน้อยกว่า -20 dB



รูปที่ 2.4 a) โลบต่างๆ ของบีมิวริชของแบบรูปสายอากาศ
b) แบบรูปแบบลิเนียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

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

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



บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ นั้น แปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นและสนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง

$$0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R \leq \frac{2D^2}{\lambda}$$

บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งการแพร่กระจายสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางจากสายอากาศถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง $R > \frac{2D^2}{\lambda}$ จากสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบริเวณนี้สนามมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า $R = \frac{2D^2}{\lambda}$ และขอบนอกเป็นอนันต์

2.1.5 เรเดียนและสเตอเรเดียน

การวัดมุมบนระนาบจะมีหน่วยเป็นเรเดียน 1 เรเดียนเป็นมุมบนระนาบซึ่งยอดของมันอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมที่มีรัศมี r และถูกปิดด้วยส่วนของเส้นรอบวงกลม ซึ่งยาว r ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (a) เนื่องจากเส้นรอบวงรัศมีที่มีรัศมี r มีความยาว $c = 2\pi r$ ดังนั้นบนหนึ่งรอบวงกลมจะมี 2π เรเดียน ($\frac{2\pi}{r}$)

การวัดมุมมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน (sr) 1 สเตอเรเดียนเป็นมุมตันที่มียอดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมที่มีรัศมี r ดังแสดงในรูปที่ 2.6a เนื่องจากพื้นที่ของทรงกลมที่มีรัศมี r มีค่าเท่ากับ $4\pi r^2$ ตามรูปที่ 2.1 พื้นที่ขนาดเล็กมากๆ dA บนผิวของทรงกลมรัศมี r จะคำนวณได้เป็น

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

ดังนั้นโอเลเมนต์ (Element) ของมุมตันของทรงกลมเขียนได้เป็น

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

2.2 ฮาล์ฟเพาเวอร์บีมวิธ (Half-Power Beamwidth :HPBW)

ฮาล์ฟเพาเวอร์บีมวิธเป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในโลบหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด 2 จุด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เพื่อความสะดวกต่อไปจะใช้คำย่อ HPBW ในการกล่าวแทน

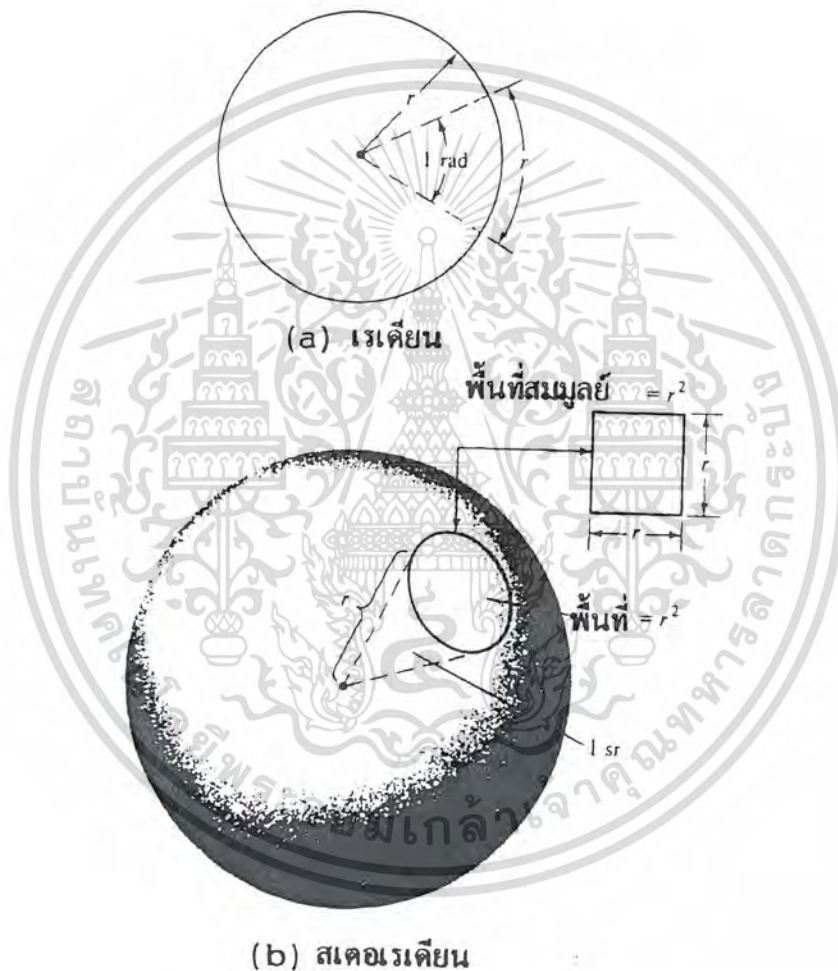
2.3 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลางถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับกำลังงานและพลังงานไฟฟ้า โดยใช้ตัวความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่ พอยท์ติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (Instantaneous Pointing Vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ W คือ พอยต์ติ้งเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น
 E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าชั่วขณะนั้น
 H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กชั่วขณะนั้น



รูปที่ 2.6 คำจำกัดความของเรเคียนและสเตอเรเคียน

เนื่องจากพอยต์ติ้งเวกเตอร์มีความหมายแสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดตัดผ่านพื้นผิวปิดจะสามารถหาได้โดยอินทิเกรตส่วนของพอยต์ติ้งเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวหอดซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ P คือ กำลังงานทั้งหมด ณ ขณะเวลานั้น (w)
 da คือ พื้นที่ขนาดเล็กละเอียดบนพื้นที่ปิด (m^2)

ในกรณีของสนามที่แปรผันกับเวลา มักจะหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของกำลังงานได้โดยการอินทิเกรตค่าพอยท์ติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น ตลอด 1 คาบ แล้วหารด้วยคาบเวลานั้น สำหรับสนามที่แปรผันกับเวลาซึ่งกระจายเป็นฮาร์โมนิกในรูป $e^{i\omega t}$ เมื่อกำหนดสนาม \vec{E} และ \vec{H} เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชิงซ้อน แล้วจะหาความสัมพันธ์กับค่า E และ H ชั่วขณะเวลาใด ๆ ได้จาก

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

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

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

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

เทอมแรกของสมการ (2.7) ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลา และเทอมที่สองมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพอยท์ติงเวกเตอร์จึงสามารถที่จะหาได้เป็น

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

ตัวประกอบในสมการ (2.7) และสมการ (2.8) เกิดขึ้นเพราะสนาม \vec{E} และ \vec{H} เป็น ค่าสูงสุด ไม่ใช่ค่า rms จากสมการ (2.5) กำลังงานเฉลี่ยที่กระจายจากสายอากาศ จะเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 P_{rad} &= P_{in} = \oiint \vec{W}_{rad} \cdot d\vec{s} \\
 &= \oiint \vec{W}_{rad} \cdot d\vec{s} \\
 &= \frac{1}{2} \oiint \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] \cdot d\vec{s} \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

2.4 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น

คำจำกัดความของคำว่าความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น และผลจากการกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.10)$$

เมื่อ U คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (w/หน่วยมุมตัน)
 W_{rad} คือ ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

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

เมื่อ \vec{E} คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

E_θ, E_ϕ คือ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศระยะไกล

η คือ อินทรินซิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแบบรูปของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึง ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้เช่นกัน กำลังทั้งหมดนี้หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นตามสมการ (2.10) ตลอดมุมตัน 4π ทั้งหมดซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \iiint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.11)$$

2.5 ไคเรคติวิตี (Directivity)

เพื่อที่จะเข้าใจถึงคำว่าไคเรคติวิตี เราจำเป็นต้องรู้จักไคเรคติฟเกนก่อน (Directive gain) ไคเรคติฟในทิศทางที่กำหนด คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศ สำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic point source) ไคเรคติวิตีคือค่าของไคเรคติฟเกน ในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด คือกล่าวง่าย ๆ ว่าไคเรคติวิตีของต้นกำเนิด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_{\theta} = \frac{U}{U_{\parallel}} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.12)$$

$$D_{\theta} = \frac{U_{max}}{U_{\parallel}} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.13)$$

D_{θ} คือไคเรคติฟเกน (ไม่มีหน่วย)

D_{\parallel} คือ ไคเรคติวิตี (ไม่มีหน่วย)

U คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

U_{max} คือ ความเข้มสูงสุดของการแพร่กระจายคลื่น

U_{\parallel} คือ ความเข้มการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (W/หน่วยมุมตัน)

P_{rad} คือ กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (w)

จากสมการ (2.12) และสมการ (2.13) เราทราบว่า ไคเรคติฟเกนและไคเรคติวิตีของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส มีค่าเป็นหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า $U \cdot U_{max}$ และ U_{\parallel} ต่างมีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อสรุปอีกข้อหนึ่งในที่นี้ก็คือค่าไดเรกทีฟเกินจะมากกว่า หรือเท่ากับศูนย์และน้อยกว่า หรือเท่ากับไดเรกทีฟตี

โดยทั่วไปสูตรของไดเรกทีฟเกินและไดเรกทีฟตีอาจเป็นฟังก์ชันของทั้งมุม θ, ϕ (ที่แล้่วมา แสดงเฉพาะฟังก์ชันของมุม θ เท่านั้น)

ต่อมาลองสมมติให้ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นอยู่ในลักษณะดังนี้คือ

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

เมื่อ B_0 เป็นค่าคงที่ E_θ และ E_ϕ เป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่ระยะไกล ค่าสูงสุดของสมการ (2.14) หาได้คือ

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

กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมดหาได้จาก

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

ดังนั้นจะได้สูตรทั่วไปของไดเรกทีฟเกินและไดเรกทีฟตีเป็นดังนี้คือ

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

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

หรือ เขียนสมการ (2.18) ใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$= \frac{4\pi}{\Omega_A} \tag{2.19}$$

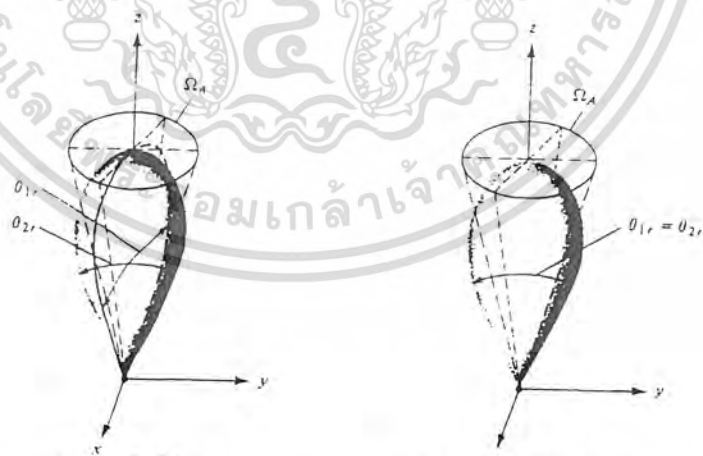
เมื่อ Ω_A เป็นมุมตันของบีม (beam) ซึ่งหาได้จาก

$$\Omega_A = \frac{1}{F(\theta, \phi)|_{\max}} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F_n(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \tag{2.20}$$

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

$F(\theta, \phi)|_{\max}$ นำมาหารในสมการ (2.10) เพื่อ نرمอดไลซ์ (Normalize) ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น $F(\theta, \phi)$ ให้มีค่าสูงสุดเป็นหนึ่ง



(a) แพนทอร์นไม่สมมาตร (b) แพนทอร์นสมมาตร

รูปที่ 2.7 มุมตันของ Ω_A ซึ่งมีแบบรูปของการแพร่กระจายที่ไม่สมมาตรและสมมาตรกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมตันของ Ω_1 มีค่าจำกัดความว่คือมุมตันซึ่งกำลังงานทั้งหมดของสายอากาศจะไหลผ่าน เมื่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นมีค่าคงที่ (และมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของ U) ที่ทุกมุมภายใน Ω_1

สายอากาศซึ่งมีโอบหลักแคบๆ เพียงโอบเดียว และมีโอบย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้มุมตันของบีมจะมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณของ HPBW ในสองระนาบซึ่งตั้งฉากกันดังแสดง ในรูปที่ 2.7 สำหรับแบบรูปของสายอากาศที่หมุนแล้วสมมาตรกันโดยรอบ HPBW ในระนาบใดๆ จะเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.7 (b)

โดยอาศัยการประมาณนี้สมการ (2.19) จะเขียนได้ใหม่เป็นดังต่อไปนี้

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_1} \approx \frac{4\pi}{\Theta_{1r} \Theta_{2r}} \quad (2.22)$$

มุมตันของบีม ประมาณได้จาก

$$\Omega_1 = \Theta_{1r} \Theta_{2r} \quad (2.23)$$

เมื่อ Θ_{1r} คือ HPBW ในระนาบใดๆ (องศา)

Θ_{2r} คือ HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

เมื่อรู้บีมวิธเป็นองศาสมการ (2.22) จะดัดแปลงให้เหมาะสมที่จะแทนค่าบีมวิธนั้นโดยตรง
ได้เป็น

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

เมื่อ Θ_{1rl} คือ HPBW ในระนาบใดๆ (องศา)

Θ_{2rl} คือ HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

สำหรับพลาแนร์อาร์เรย์ (Planar Array) จะประมาณสมการ (2.24) ได้เป็นดังนี้คือ

$$D_0 \approx \frac{32400}{\Omega_1^2} = \frac{32400}{\Theta_{1rl} \Theta_{2rl}} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2.22) และสมการ (2.25) จะใช้ได้ผลดีเมื่อแบบรูปมีเพียงโอบหลักโอบเดียวและโอบย่อยจะต้องมีขนาดเล็กมากๆ เท่านั้น สำหรับแบบรูปซึ่งมี 2 โอบหลักที่เหมือนค่าของไดเรคตีวิตีที่หาได้จาก สมการ (2.22) หรือ สมการ (2.25) จะเป็น 2 เท่า ของค่าจริง ส่วนแบบรูปที่มีโอบย่อยระดับสูง การหาค่าไดเรคตีวิตีโดยใช้ สมการ (2.22) หรือ สมการ (2.25) ซึ่งตัดโอบย่อยทิ้งจะมีค่าสูงเกินจริง

โดยปกติเรามักจะแสดงไดเรคทิฟเกนและไดเรคตีวิตีเป็นเดซิเบล(dB)

$$D_{dB} = 10 \log[D_{\nu}] \tag{2.26}$$

$$D_{dB} = 10 \log[D_{\theta}] \tag{2.27}$$

2.6 อัตราขยาย (gain)

สิ่งที่แสดงคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งก็คืออัตราขยาย อัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากไดเรคตีวิตี โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ไดเรคตีวิตี อธิบายคุณในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

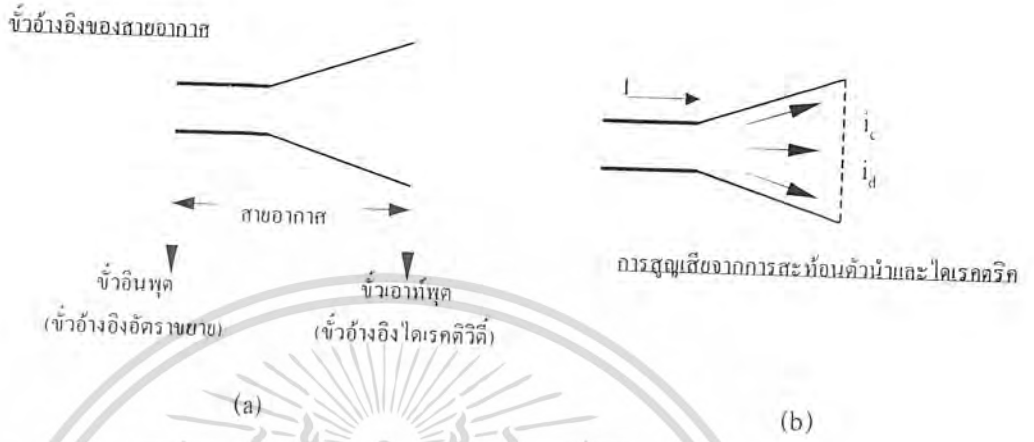
อัตราขยายกำลัง (Power gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้นั้นมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิ ที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วเราจะคิดอัตราขยายกำลังในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดดังนี้

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

โดยความหมายทั่วไปแล้วเรามักจะพูดถึงอัตราขยายสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่อกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้ง 2 นั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร หรือสายอากาศอื่นๆ ซึ่งคำนวณอัตราขยายง่าย หรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซทรอปิกคอยล์เซอร์สที่ไม่มี การสูญเสีย ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Gain = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \text{ (ไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย)} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.8 ขั้วอ้างอิงและการสูญเสียของสายอากาศ

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

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

เมื่อ e_r เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ใช้ สมการ (2.3) จะทำให้ สมการ (2.32) มีความสัมพันธ์ง่ายเข้าเป็น

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

ซึ่งสัมพันธ์กับไดเรกทิฟเทนในสมการ (2.17) คือ

$$G_{\nu}(\theta, \phi) = e_r D_{\nu}(\theta, \phi) \quad (2.32)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตีโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_0 = G_{\epsilon}(\theta, \phi)|_{\max} = e_{\epsilon} D_{\epsilon}(\theta, \phi)|_{\max} = e_{\epsilon} D_0 \quad (2.33)$$

ดังนั้นค่าประมาณของอัตราขยายจะมีค่าเป็น

$$G_0 \approx \frac{30.000}{\Theta_{1/2} \Theta_{2/2}} \quad (2.34)$$

ในทางปฏิบัติเมื่อกำลังอัตราขยายมักจะหมายถึงกำลังงานที่มีค่าสูงสุด ดังแสดงในสมการ (2.33)

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

2.7 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ จะใช้เมื่อเรากำลังพิจารณาการสูญเสียต่างๆ ที่ขั้วและภายในโครงสร้างของสายอากาศด้วย การสูญเสียต่างๆ เมื่ออ้างอิงตามรูปที่ 2.8 (b) อาจเนื่องมาจาก

1. การสะท้อนกลับเนื่องจากความไม่แมตซ์ (Mismatch) กันระหว่างสายส่ง (Transmission line) กับสายอากาศ
2. การสูญเสียทั้งตัวนำและฉนวน (I^2R)

โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพทั้งหมดคำนวณได้จาก

$$e_{\epsilon} = e_r e_{\Gamma} e_{\Gamma} \quad (2.36)$$

เมื่อ e_{ϵ} คือ ประสิทธิภาพทั้งหมด

e_r คือ ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ

e_{Γ} คือ ประสิทธิภาพของตัวนำ

e_{Γ} คือ ประสิทธิภาพของฉนวน

Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของศักดาไฟฟ้าที่ขั้วสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Gamma = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \quad (2.37)$$

เมื่อ Z_m คือ อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Characteristic Impedance) ของสายส่ง

ปกติ e_r และ e_{ref} คำนวณหาได้ลำบากส่วนมากมักหาได้จากการทดลองแต่ถึงกระนั้นก็ไม่สามารถแยก e_r และ e_{ref} ออกจากกันได้ ดังนั้นเพื่อความสะดวกมักจะเขียน สมการ (2.36) ใหม่เป็น

$$e_r = e_r, e_{ref} = e_{ref} (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.38)$$

เมื่อ $e_{ref} = e_r, e_{ref}$ คือ ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

2.8 อินพุตอิมพีแดนซ์

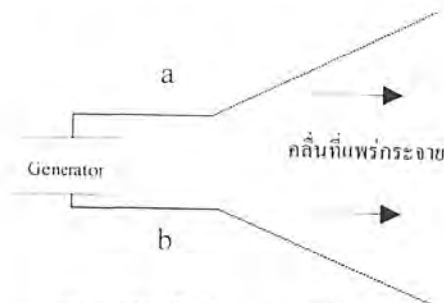
อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) ของสายอากาศใดๆ จะเป็นอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้นๆ หรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ในรูปที่ 2.9 a - b เป็นขั้วของสายอากาศอัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนี้ เมื่อไม่ได้ต่อโหลด (Load) จะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศซึ่งมีค่า

$$Z_i = R_i + jX_i \quad (2.39)$$

Z_i คือ อิมพีแดนซ์ที่ขั้ว a - b ของสายอากาศ (โอห์ม)

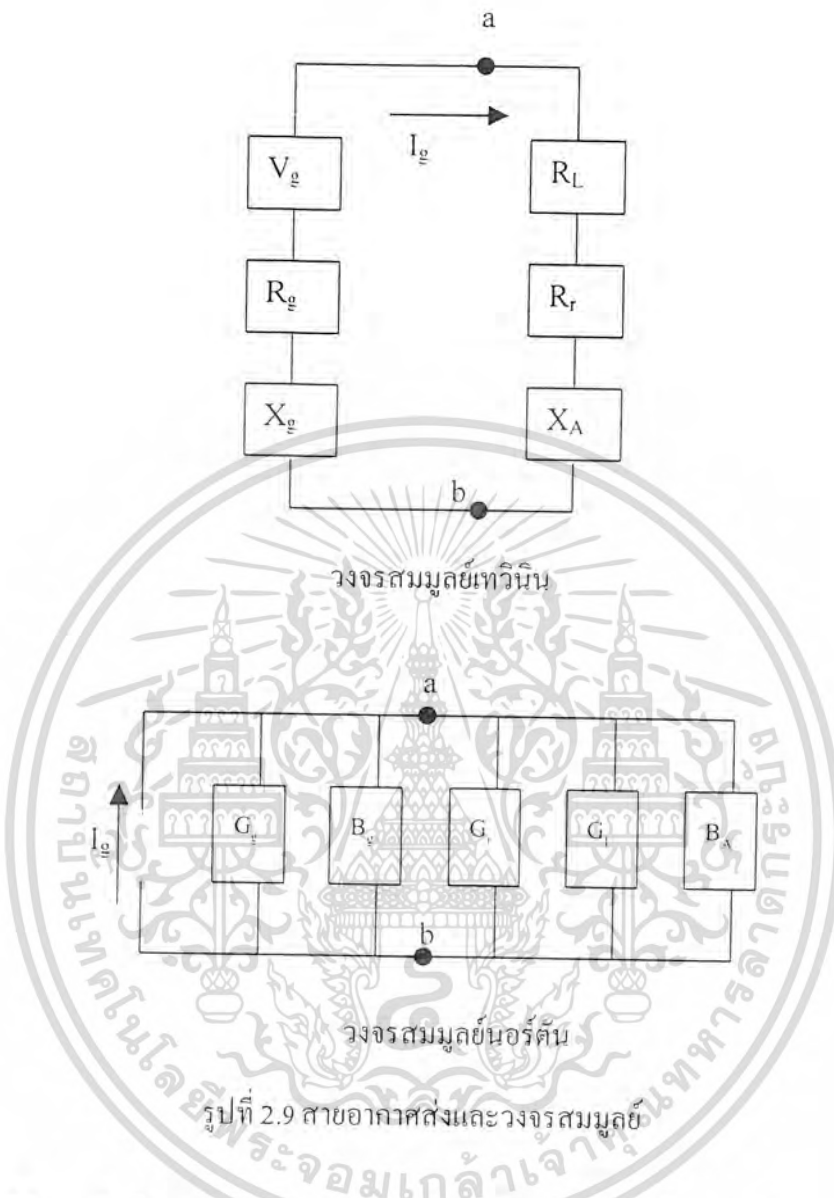
R_i คือ ความต้านทานที่ขั้ว a - b ของสายอากาศ (โอห์ม)

X_i คือ รีแอกแตนซ์ที่ขั้ว a - b ของสายอากาศ (โอห์ม)



สายอากาศในโหมดการส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปกติอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และจะมีความสัมพันธ์กับสายส่ง เฉพาะในช่วงความถี่ช่วงหนึ่งๆเท่านั้น นอกจากนี้อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่างๆ อีกได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียงเนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะพบว่า ส่วนใหญ่จะหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลอง

2.9 แบนด์วิธ (Bandwidth)

แบนด์วิธของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ อินพุตอิมพีแดนซ์ แบบรูป แบนด์วิธ โพลาริเซชัน ระดับของไซคลออป อัตราขยาย ประสิทธิภาพการแผ่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้ได้ คือ ไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบ จนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนดหรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์วิธกว้างจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำ ยกตัวอย่าง เช่น แบนด์วิธ 10:1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูงมีค่ามากกว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำอยู่ 10 เท่า สำหรับสายอากาศแบนด์วิธแคบแบนด์วิธจะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ) ทหารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิธนั้น เช่น แบนด์วิธ 5 % แสดงว่าผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศเป็น 5 % ของความถี่กลางของแบนด์วิธนั้น

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศไม่เปลี่ยนแปลงความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิธตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียวได้ จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์การใช้งานแต่ละอย่างไป ปกติแล้วคุณสมบัติของแบบรูป กับอิมพีแดนซ์แบนด์วิธ จึงมักถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิธของสายอากาศ นอกจากนี้แบนด์วิธของอัตราขยาย ระดับของไอซ์โลบ บีมวิธ โพลาริเซชัน จะมีแบนด์วิธค่าเดียวกับแบบรูปแบนด์วิธ ในขณะที่แบนด์วิธของอินพุตอิมพีแดนซ์และประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น และเป็นค่าเดียวกับอิมพีแดนซ์แบนด์วิธ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

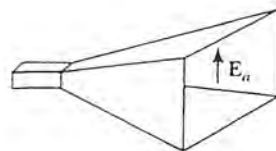
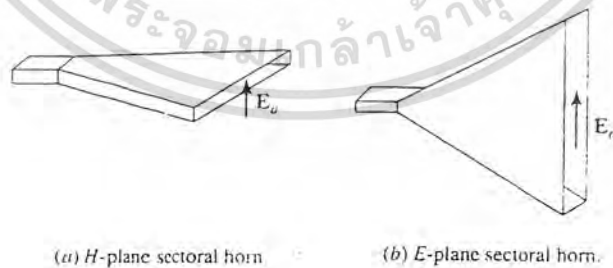
บทที่ 3

สายอากาศปากแตร

3.1 กล่าวนำ

สายอากาศปากแตร (Horn Antenna) จัดเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างพื้นฐานที่สุดและค่อนข้างจะได้รับความนิยมในการนำไปใช้เป็นสายอากาศในย่านไมโครเวฟ ซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ได้มีการคิดค้นและเริ่มต้นใช้ในช่วงปลายของยุค ค.ศ. 1800 และได้ถูกมองข้ามไปในช่วงต้นของยุค ค.ศ. 1900 และจนกระทั่งตอนปลายของ ค.ศ. 1930 กลับมาได้รับความสนใจอีกครั้ง จากการสนใจในการสื่อสารไมโครเวฟ และสายส่งแบบท่อนำคลื่น ในช่วงระหว่างสงครามครั้งที่ 2 เป็นต้นมา บทความบรรยายเกี่ยวกับการแพร่กระจาย การออกแบบที่เหมาะสม และการประยุกต์ใช้งาน หลายบทความได้ถูกตีพิมพ์ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1939 ได้มีการตีพิมพ์ทฤษฎีเบื้องต้น หลักการทำงาน และการออกแบบสายอากาศปากแตร

สายอากาศปากแตรได้ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในการสื่อสารความถี่วิทยุ งานดาวเทียมเป็นตัวป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแบบตัวสะท้อนสัญญาณ (Reflector Antenna) และสายอากาศแบบเลนส์ (Lens Antenna) เป็นส่วนร่วมกับสายอากาศอาร์เรย์ และจัดเป็นมาตรฐานสากลสำหรับการเปรียบเทียบและการวัดค่าอัตราขยาย (gain) ของสายอากาศต่างๆ ที่มีอัตราขยายสูง (High-gain) และเนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้าง การกระตุ้นที่ง่าย มีความสามารถรอบตัว มีอัตราขยายสูง มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดี ทำให้เกิดการใช้อย่างกว้างขวาง



(c) Pyramidal horn.

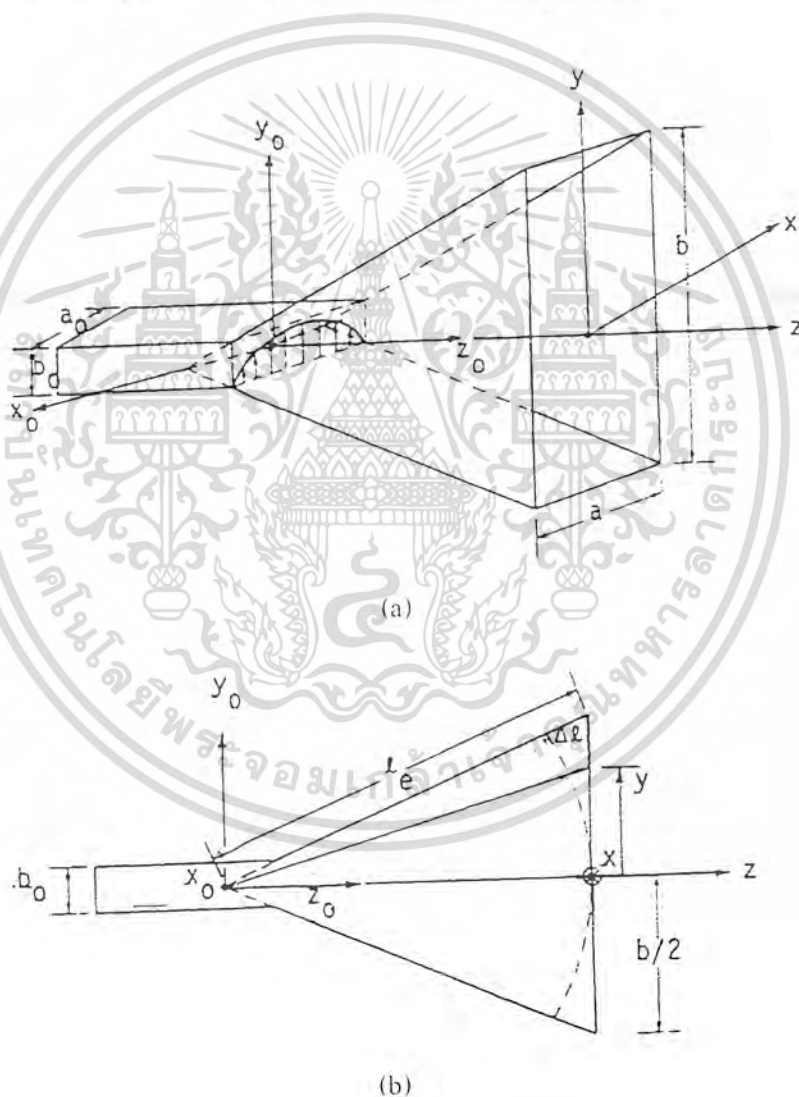
รูปที่ 3.1 รูปร่างของสายอากาศปากแตรชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศปากแตรมีหลายแบบซึ่ง 4 แบบจะแสดงในรูปที่ 4.1 สายอากาศปากแตรมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่มีอะไรมากไปกว่าท่อกลวงแล้วมีปลายเปิดเป็นขนาดใหญ่ ชนิด ทิศทาง และขนาดของปากแตรจะมีผลกระทบอย่างมากต่อประสิทธิภาพต่อส่วนที่เป็นตัวกระจายคลื่น (radiator)

3.2 สายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า

สายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า จะมีลักษณะบานออกทิศทางของสนามไฟฟ้าซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2 (a) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.2 (b)



รูปที่ 3.2 a) สายอากาศปากแตรในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อมองแบบ 3 มิติ

b) เมื่อมองลงบนระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคิดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในรูปที่ 3.2 (a) นี้จะสามารถใช้หลักการของ ทฤษฎีบทการเหนี่ยวนำ การลู่ออกของสายอากาศเป็นรูปปากแตรจะทำให้เฟส (phase) ของสนาม ไฟฟ้าที่จุดต่างๆบนปากแตรไม่เท่ากันซึ่งจะต้องนำมาคิดด้วยการหาความต่างเฟสที่กล่าวมานี้จะทำ ได้โดยใช้รูปที่ 3.2 (b) เมื่อโยงเส้นตรงตามแนวปากแตรมาตัดกันแล้วใช้จุดตัดนี้เป็นศูนย์กลางในการคิดเฟส จากรูปจะได้ระยะทางจากจุดศูนย์กลางถึงตำแหน่ง y คือ l_1 เป็นดังนี้คือ

$$l_1 = \sqrt{\left(l_0 - \frac{h^2}{4}\right) + y^2} \quad (3.1)$$

ในกรณีที่ $l_0 > b$ จะสามารถประมาณค่าได้คือ

$$l_1 = l_0 \left\{ 1 - \frac{h^2}{8l_0^2} + \frac{y^2}{2l_0^2} \right\} \quad (3.2)$$

เมื่อคำนวณความแตกต่างระหว่าง l_1 กับ l_0 จะได้เป็นดังนี้

$$\Delta l_1 = l_1 - l_0 = \frac{h^2}{8l_0} - \frac{y^2}{2l_0} \quad (3.3)$$

ทำให้เฟสของสนามที่ตำแหน่ง y เร็วกว่าที่ขอบช่องเปิดเป็น

$$\Delta k l_1 = k \left(\frac{h^2}{8l_0} - \frac{y^2}{2l_0} \right) \quad (3.4)$$

เมื่อพิจารณาถึงกระแสไฟฟ้าสมมูลและกระแสแม่เหล็กสมมูลที่เกิดขึ้นบนปากแตร การกระจายของขนาดนั้นจะเหมือนกับกรณีท่อนำคลื่น (wave guide) ปลายตัดคือ

$$\begin{aligned} \vec{J} &= \vec{n} \times \vec{H}_0 \\ \vec{J}_1 &= -\frac{E_0}{Z_0} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \hat{i}_1 \end{aligned} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\bar{M} &= \bar{E}_v \times \bar{n} \\ \bar{M}_x &= E_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \bar{i}_v = -Z_0 J_v \bar{i}_v\end{aligned}\quad (3.6)$$

แต่เนื่องจากเราเลื่อนจุดอ้างอิง ไปอยู่ที่กึ่งกลางปากแตรเพราะฉะนั้นกระแสไฟฟ้าสมมูล และกระแสแม่เหล็กสมมูลจะเขียนได้ดังนี้

$$J_v = -\frac{E_0}{Z_0} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{jk\Delta y}, \quad (3.7)$$

$$M_v = E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{jk\Delta y} = -Z_0 J_v, \quad (3.8)$$

โดยที่ $-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}$ และ $-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}$

โดยในที่นี้ได้ใช้ Z_0 แทน Z ในสมการ (3.5) และ (3.6) เพราะพิจารณาว่าถ้า a ใหญ่กว่า λ มากเพียงพอ Z จะประมาณเท่ากับ Z_0 ได้ ดังนั้นเวกเตอร์โพเทนเชียล (Potential Vector) สำหรับกระแสทั้งสองนี้จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$A_v = -\frac{e^{-jk r}}{4\pi r} \cdot \frac{\mu E_0}{Z_0} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cdot e^{jk\left(\frac{\mu}{8} - \frac{1}{2}\right) y} \cdot e^{jk(y \sin\theta \cos\phi - r \sin\theta \sin\phi)} \cdot dx dy \quad (3.9)$$

$$F_v = -\frac{A_v}{Z_0} \quad (3.10)$$

จากเวกเตอร์โพเทนเชียลนี้สามารถหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุดห่างไกลได้ (farfield) โดยใช้สมการ

$$\begin{aligned}E_\theta &= -j\omega[\bar{A}]_\theta - j\omega Z_0[\bar{F}]_\theta \\ H_\phi &= \frac{E_\theta}{Z_0}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\phi = -j\omega \left[\vec{A} \right]_\phi + j\omega Z_0 \left[\vec{F} \right]_\phi$$

$$H_\theta = -\frac{E_\phi}{Z_0} \quad (3.11)$$

และสมการ

$$A_r = A_1 \cos \phi \sin \theta + A_1 \sin \phi \sin \theta + A_2 \cos \theta$$

$$A_\theta = A_1 \cos \phi \cos \theta + A_1 \sin \phi \cos \theta + A_2 \sin \theta$$

$$A_\phi = -A_1 \sin \phi + A_2 \cos \phi \quad (3.12)$$

ซึ่งจะได้ผลดังนี้คือ

$$E_\theta = -j\omega \sin \phi \cos \theta A_1 - j\omega Z_0 \sin \phi \left(\frac{A_1}{Z_0} \right)$$

$$= -j\omega \sin \phi (\cos \theta + 1) A_1 \quad (3.13)$$

และ E_ϕ จะได้เป็นดังนี้

$$E_\phi = -j\omega \cos \phi (\cos \theta + 1) A_1 \quad (3.14)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตค่า A_1 ในสมการ (3.9) ก็จะหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ การอินทิเกรตสมการ (3.9) การคำนวณค่านี้อาจจะใช้คอมพิวเตอร์คำนวณโดยตรงหรืออินทิเกรตออกมาให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันอย่างอื่นก่อนแล้วจึงคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งเห็นได้ว่าการคำนวณค่อนข้างยุ่งยากดังนั้น ในที่นี้จะแสดงการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศด้านหน้าคือ $\theta = 0^\circ$ เท่านั้น ซึ่งผลการคำนวณนี้จะสามารถนำไปหาอัตราขยายของสายอากาศต่อไปได้ในมุม $\theta = 0^\circ$ นี้ A_1 จะลดรูปลงและสามารถอินทิเกรตได้ดังนี้คือ

$$I = -\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda} z} \cdot \frac{\mu E_0}{Z_0} \int_{-a}^a \int_{-a}^a \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{j\frac{2\pi}{\lambda} z} dx dy$$

$$= -\frac{e^{-jkr}}{r} \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda} z} \cdot \frac{\mu E_0}{Z_0} \cdot \frac{a}{\pi^2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{2}} \left[C\left(\frac{h}{\sqrt{2\lambda l}}\right) - jS\left(\frac{h}{\sqrt{2\lambda l}}\right) \right] \quad (3.15)$$

โดยที่ $C(z)$ และ $S(z)$ เป็น Fresnel Integral ซึ่งจะเขียนได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 C(z) &= \int_0^z \cos\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt \\
 S(z) &= \int_0^z \sin\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

แทนค่าสมการ (3.15) และ $\phi = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$ ลงในสมการ (3.13) และ สมการ (3.14) จะได้สนามไฟฟ้าในรูปต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 E_\theta &= -j 2\omega A, \\
 &= j \frac{e^{-jkz}}{r} \cdot e^{j\frac{kh^2}{8z}} \cdot 2E_0 \cdot \frac{a}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2l_c}{\lambda}} \left[C\left(\frac{b}{\sqrt{2\lambda l_c}}\right) - jS\left(\frac{b}{\sqrt{2\lambda l_c}}\right) \right] \\
 E_\phi &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

การที่ E_ϕ เป็น 0 นั้นเป็นเพราะในกรณีนี้แสดงสนามไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ในระนาบ y-z ระนาบ y-z ($\phi = 90^\circ$) นี้จึงเป็นระนาบสนามไฟฟ้าและไม่มี E_ϕ ในทำนองเดียวกันระนาบ x-z ($\phi = 0^\circ$) ก็จะเป็นระนาบสนามแม่เหล็กและไม่มี E_θ

สำหรับค่า $C(z)$ และ $S(z)$ นั้นแสดงในตารางภาคผนวก การคำนวณอัตราขยายของสายอากาศนี้จะทำเช่นเดียวกับกรณีที่กล่าวไว้ข้างต้นในรูปต่อไปนี้คือ

$$G_r = \frac{|E_\theta|_{\theta=0^\circ}^2}{4\pi^2 P}
 \tag{3.18}$$

ขณะที่ P คือ กำลังงานที่ออกจากปากแตรซึ่งคำนวณได้ดังต่อไปนี้

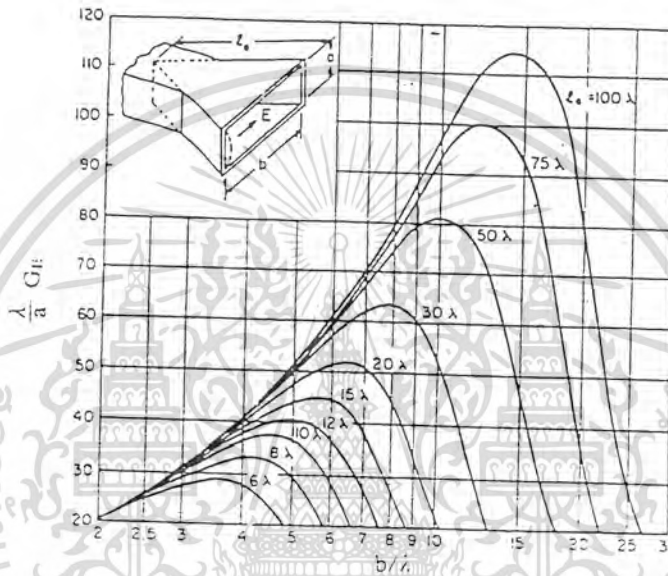
$$\begin{aligned}
 P &= \int_{-a}^a \int_{-b}^b E_x \cdot H_x \cdot dx dy \\
 &= \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{E_0^2}{Z_0} \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) dx dy \\
 &= \frac{1}{2} (ab) \cdot \frac{E_0^2}{Z_0}
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี่คือ

แทนค่าสมการ (3.17) และ สมการ(3.19) ลงในสมการ (3.18) จะได้อัตราขยายในรูปต่อไป

$$G_I = \frac{64al_c}{\pi b\lambda} \left[C^2 \left(\frac{b}{\sqrt{2\lambda l_c}} \right) + S^2 \left(\frac{b}{\sqrt{2\lambda l_c}} \right) \right] \tag{3.20}$$



รูปที่ 3.3 อัตราขยายของสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 3.3 แสดงผลการคำนวณค่า $(\frac{\lambda}{a})G_{II}$ โดยให้ b เป็นตัวแปรและ l_c เป็นพารามิเตอร์ จากรูปจะเห็นได้ว่า l_c สำหรับค่า ค่าหนึ่งจะมีค่า b ที่ทำให้อัตราได้อัตราขยายสูงสุดเกิดขึ้น ซึ่งในการออกแบบใช้งานจริงนั้นจะเลือกใช้ค่า b ที่ทำให้อัตราขยายสูงสุดนี้ จากรูปที่ 3.3 ถ้าหาความสัมพันธ์ระหว่าง b กับ l_c ที่ตำแหน่งที่มีอัตราขยายสูงสุด จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$b = \sqrt{2\lambda l_c} \tag{3.21}$$

สำหรับพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศนี้จะคำนวณได้ดังนี้

$$A_{et} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_I = \frac{16\lambda al_c}{\pi^2 \lambda} \left[C^2 \left(\frac{b}{\sqrt{2\lambda l_c}} \right) + S^2 \left(\frac{b}{\sqrt{2\lambda l_c}} \right) \right] \tag{3.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณสมการข้างบนหรืออ่านค่า $G_{\nu} . a . b$ ที่ตำแหน่งอัตราขยายสูงสุดจะพบว่าพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศนี้เป็นประมาณ 63 % ของพื้นที่จริง

3.3 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า

การออกแบบสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้าให้อยู่ที่ค่าสูงสุด โดยความถี่ใช้งานอยู่ที่ 10 GHz และท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular waveguide) มีความยาวดังนี้คือ

ความยาวภายในท่อนำคลื่นด้าน $a_n = 23$ มิลลิเมตร

ความยาวภายในท่อนำคลื่นด้าน $b_n = 10.3$ มิลลิเมตร

การออกแบบสายอากาศที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า โดยอ้างอิงจากกราฟในรูปที่ 3.3 เพื่อเปรียบเทียบกับขนาดความยาวด้าน z เพื่อให้ได้ค่าโคเรคทีวิตีที่มีค่าดีที่สุด โดยโครงงานนี้เลือกค่าเท่ากับ $6z$.

$$z = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8}{10 \times 10^9} = 0.03 = 30 \text{ mm}$$

$$a_n = 23 \text{ mm} = 0.766 \lambda$$

$$b_n = 10.3 \text{ mm} = 0.343 \lambda$$

หาค่า G_{ν} จากสมการ (3.20)

$$G_{\nu} = \frac{64(0.343 \lambda)(6 \lambda)}{\pi(\sqrt{6} \lambda) \lambda} \left[C^2 \left(\frac{\sqrt{6} \lambda}{\sqrt{2} \lambda (6 \lambda)} \right) + S^2 \left(\frac{\sqrt{6} \lambda}{\sqrt{2} \lambda (6 \lambda)} \right) \right]$$

$$= 19.15$$

เมื่อคิดในหน่วยเดซิเบล (dB) จะได้

$$G_{\nu} = 10 \log 19.15 = 12.821 \text{ dB}$$

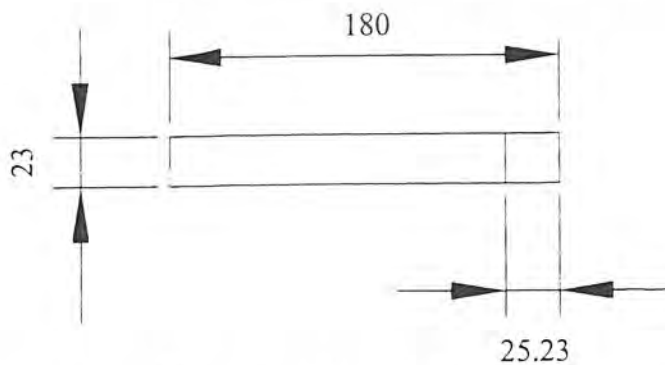
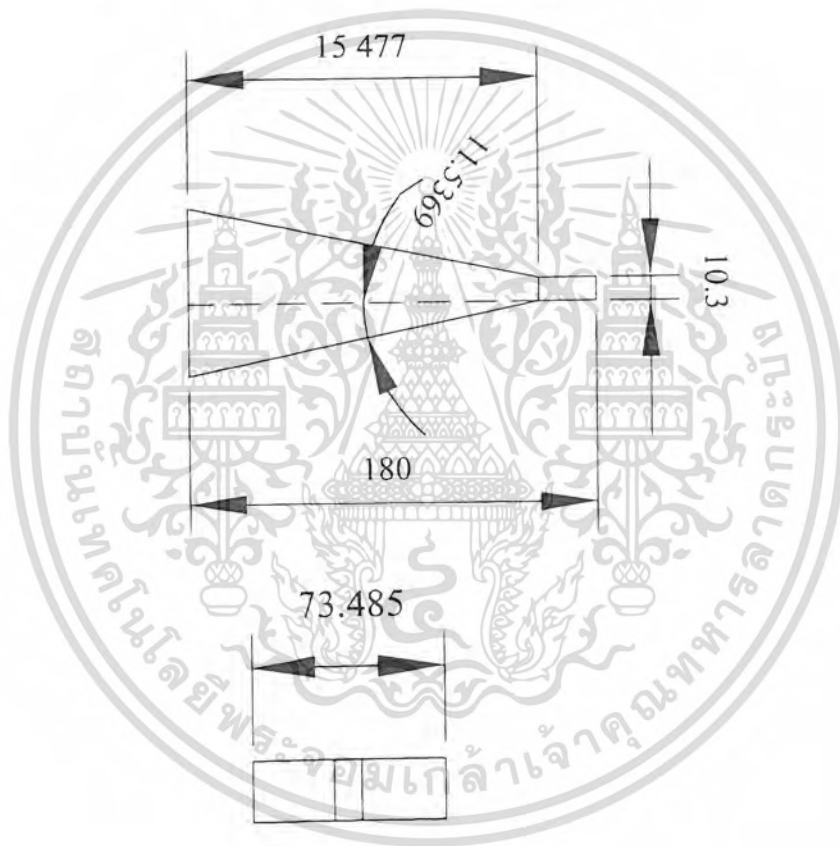
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะได้อ่าค่าต่างๆที่จำเป็นในการออกแบบในการสร้างสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้าดังนี้

$$a_0 = 23\text{mm} = 0.766 \lambda$$

$$b_0 = 10.3\text{mm} = 0.343 \lambda$$

$$g = \frac{b_0 / 2}{\tan \psi_h} = \frac{10.3 / 2}{\tan 11.536} = 25.23$$



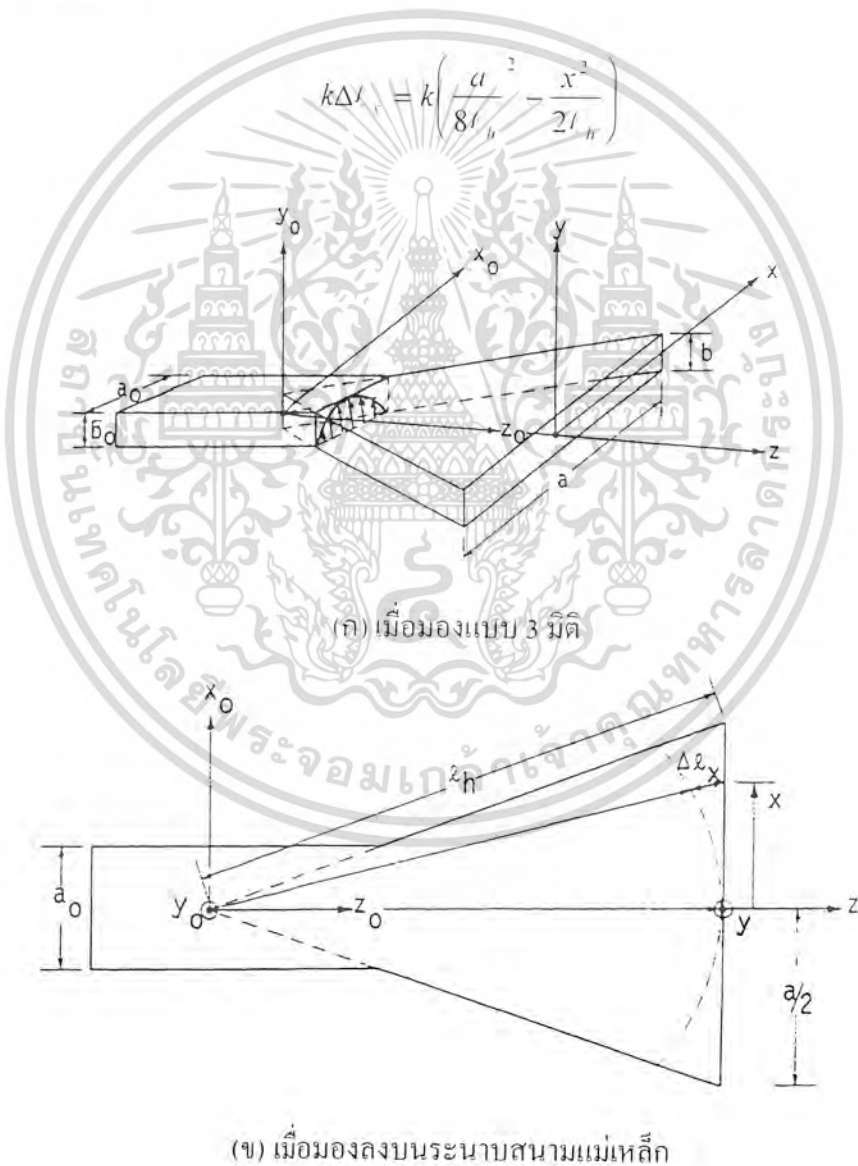
รูปที่ 3.4 สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก

สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็กนั้น มีโครงสร้างที่แสดงดังรูปที่ 3.5 กล่าวคือมีการคู่ออกในระนาบ $x-z$ ซึ่งเป็นระนาบสนามแม่เหล็กในการหาการกระจายคลื่นจากสายอากาศนี้จะทำได้เช่นเดียวกับของกรณีที่สายอากาศมีปลายคู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า

การคิดความแตกต่างของเฟสบนปากแตรของสายอากาศนั้นทำได้โดยการใช้รูปที่ 3.5 (ข) ประกอบ หลักการคิดเช่นเดียวกับกรณีสนามไฟฟ้าจะได้เฟสของสนามที่ตำแหน่ง x เร็วกว่าที่ขอบของช่องเปิดเป็นดังนี้

$$k\Delta l = k \left(\frac{a^2}{8l} - \frac{x^2}{2l} \right) \quad (3.23)$$



รูปที่ 3.5 สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกระแสไฟฟ้าสมมูลและกระแสแม่เหล็กสมมูลบนปากเตตราจะเขียนได้ดังนี้

$$J_x = -\frac{E_0}{Z_0} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{jkx} \quad (3.24)$$

$$M_x = E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{jkx} = -Z_0 J_x \quad (3.25)$$

โดยที่ $-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}$ และ $-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}$

และเวกเตอร์โพเทนเชียล A_x จะเขียนได้ดังนี้

$$A_x = -\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \cdot \frac{\mu E_0}{Z_0} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cdot e^{jkx \left(\frac{a}{2} - \frac{x}{2}\right)} \cdot e^{jk(x \sin\theta / \cos\theta + y \sin\theta / \sin\theta)} \cdot dx dy \quad (3.26)$$

จาก A_x จะสามารถหาสนามไฟฟ้า E_θ และ E_ϕ ได้ในรูปต่อไปนี้

$$E_\theta = -j\omega \sin\phi (\cos\theta + 1) A_x \quad (3.27)$$

$$E_\phi = -j\omega \cos\phi (\cos\theta + 1) A_x \quad (3.28)$$

การอินทิเกรตหาค่า A_x ในสมการที่ (3.24) และสมการที่ (3.25) นั้นยุ่งยากมาก ดังนั้นจึงทำการพิจารณาเฉพาะในทิศทาง $\theta = 0^\circ$ ซึ่งจะลดรูปลงและสามารถอินทิเกรตได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} A_x &= -\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \cdot \frac{\mu E_0}{Z_0} \cdot e^{j\frac{ka^2}{8r}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{\frac{-jkx}{2r}} \cdot dx dy \\ &= -\frac{e^{-jkr}}{r} \cdot e^{j\frac{ka^2}{8r}} \cdot \frac{\mu E_0}{4\pi Z_0} \cdot b \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \left(\frac{e^{j\frac{\pi x}{2r}} + e^{-j\frac{\pi x}{2r}}}{2} \right) e^{\frac{-jkx}{2r}} \cdot dx \\ &= -\frac{e^{-jkr}}{r} \cdot e^{j\frac{ka^2}{8r}} \cdot \frac{\mu E_0}{4\pi Z_0} \cdot \frac{b}{2} (I_1 + I_2) \end{aligned} \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} e^{j\frac{\pi x}{a}} \cdot e^{-\frac{jkx^2}{2l_h}} \cdot dx \\
 &= e^{j\frac{\pi^2 l_h}{2ka^2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} e^{-\frac{j(kx - \frac{\pi l_h}{a})^2}{2kl_h}} \cdot dx
 \end{aligned} \quad (3.30)$$

เมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรในสมการ (3.30) ตามรายละเอียดข้างล่างนี้จะได้สมการ (3.30) ออกมาในรูป Fresnel Integral ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{\sqrt{2kl_h}} \left(kx - \frac{\pi l_h}{a} \right) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} t \quad (3.31)$$

$$dx = \sqrt{\frac{\lambda l_h}{2}} dt \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= e^{j\frac{\pi^2 l_h}{2ka^2}} \sqrt{\frac{\lambda l_h}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} e^{-j\frac{\pi}{2} t^2} \cdot dt \\
 &= e^{j\frac{\pi^2 l_h}{2ka^2}} \sqrt{\frac{\lambda l_h}{2}} [C(t_2) - C(t_1) - j\{S(t_2) - S(t_1)\}]
 \end{aligned} \quad (3.33)$$

โดยที่

$$t_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{\lambda l_h}}{a} + \frac{a}{\sqrt{\lambda l_h}} \right) \quad (3.34)$$

$$t_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{\lambda l_h}}{a} - \frac{a}{\sqrt{\lambda l_h}} \right) \quad (3.35)$$

ทำนองเดียวกัน I_2 จะเป็นดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \int_{t_3}^{t_4} e^{-j\frac{kv^2}{2t_h} - j\frac{\pi}{a}x} dx \\
 &= e^{\frac{j\pi^2 t_3}{2ka^2}} \sqrt{\frac{\lambda l_h}{2}} [C(t_4) - C(t_3) - j\{S(t_4) - S(t_3)\}] \quad (3.36)
 \end{aligned}$$

โดยที่

$$t_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{\lambda l_h}}{a} - \frac{a}{\sqrt{\lambda l_h}} \right) \quad (3.37)$$

$$t_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{\lambda l_h}}{a} + \frac{a}{\sqrt{\lambda l_h}} \right) \quad (3.38)$$

และเนื่องจาก

$$C(-z) = -C(z) \quad (3.39)$$

$$S(-z) = -S(z) \quad (3.40)$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการ (3.33) ถึงสมการ (3.40) ลงในสมการ (3.29) จะได้ A_1 ในรูปต่อไปนี้เป็น

$$A_1 = -\frac{e^{-jkr}}{r} \cdot e^{\frac{jku^2}{8t_h} - j\frac{\pi^2 t_3}{2ka^2}} \cdot \frac{\mu E_0 b}{4\pi Z_0} \sqrt{\frac{\lambda l_h}{2}} \cdot [C(t_4) - C(t_3) - j\{S(t_4) - S(t_3)\}] \quad (3.41)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (3.41) พร้อมทั้ง $\phi = 90^\circ, \theta = 0^\circ$ ลงในสมการ (3.26) จะได้ $E_\phi = 0$ และ E_θ เป็นดังนี้คือ

$$\begin{aligned}
 E_\theta &= -j2\omega A_1 \\
 &= j\frac{e^{-jkr}}{r} \cdot e^{\frac{jku^2}{8t_h} - j\frac{\pi^2 t_3}{2ka^2}} \cdot \frac{2\omega\mu E_0 b}{4\pi Z_0} \sqrt{\frac{\lambda l_h}{2}} \cdot [C(t_4) - C(t_3) - j\{S(t_4) - S(t_3)\}]
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= j \frac{e^{-jkr}}{r} \cdot e^{\frac{jku^2}{8l_h} + \frac{j\pi^2 l_h}{2ka^2}} \cdot E_0 b \sqrt{\frac{l_h}{2\lambda}} \cdot [C(t_4) - C(t_3) - j\{S(t_4) - S(t_3)\}] \quad (3.42)$$

เมื่อทำการคำนวณอัตราขยายของสายอากาศนี้เช่นเดียวกับสมการ (3.18) โดยใช้สมการ (3.19) และสมการ (3.42) จะได้อัตราขยาย เป็นดังนี้คือ

$$G_H = \frac{4\pi b l_h}{a\lambda} \left[\{C(t_4) - C(t_3)\}^2 + \{S(t_4) - S(t_3)\}^2 \right] \quad (3.43)$$

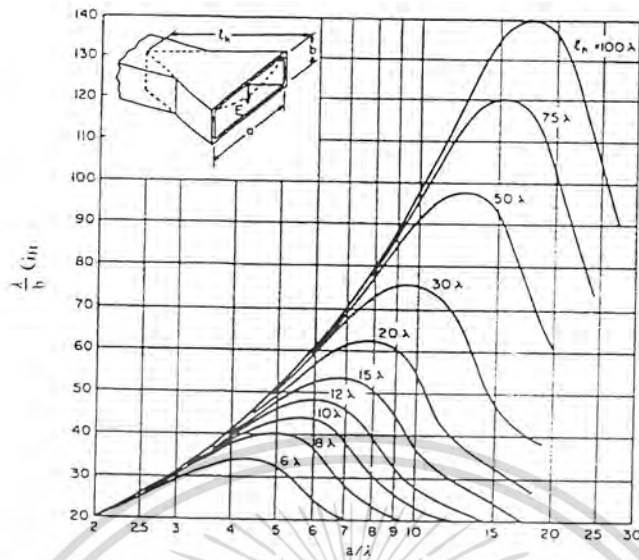
จากรูปที่ 3.6 แสดงผลการคำนวณค่า $\left(\frac{z}{b}\right) G_H$ โดยให้ a เป็นตัวแปรและ l_h เป็นพารามิเตอร์ จากรูปจะเห็นได้ว่าสำหรับค่า l_h ค่าหนึ่งจะมีค่า a ที่ทำให้ได้อัตราขยายสูงสุดเกิดขึ้นซึ่งในการออกแบบสายอากาศจะเลือกใช้ค่า a ดังกล่าวนี้จากรูปที่ 3.6 เมื่ออ่านค่า a ที่ตำแหน่งที่มีอัตราขยายสูงสุด จะพบว่ามีความสัมพันธ์ในรูปต่อไปนี้คือ

$$a = \sqrt{3\lambda l_h} \quad (3.44)$$

สำหรับพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศนี้จะคำนวณได้ดังนี้คือ

$$A_{eH} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_H = \frac{\lambda b l_h}{a} \left[\{C(t_4) - C(t_3)\}^2 + \{S(t_4) - S(t_3)\}^2 \right] \quad (3.45)$$

จากการคำนวณสมการหรืออ่านค่าที่มีอัตราขยายสูงสุดในรูปที่ 3.6 จะพบว่าพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศนี้เป็นประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่จริง



รูปที่ 3.6 อัตราขยายของสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก

3.5 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก

การออกแบบสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็กให้อยู่ที่ค่าสูงสุด โดยความถี่ใช้งานอยู่ที่ 10 GHz และท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular waveguide) มีความยาวดังนี้คือ

ความยาวภายในท่อนำคลื่นด้าน $a_0 = 23$ มิลลิเมตร

ความยาวภายในท่อนำคลื่นด้าน $b_0 = 10.3$ มิลลิเมตร

การออกแบบสายอากาศที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็กนั้นทำการออกแบบเช่นเดียวกับสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า โดยอ้างอิงจากกราฟในรูปที่ 3.6 จากนั้นได้ทำการจำลองแบบและทำการคำนวณโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณ โดยโครงงานนี้เลือกค่า l_n เท่ากับ 8λ

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8}{10 \times 10^9} = 0.03 = 30 \text{ mm}$$

$$a_0 = 23 \text{ mm} = 0.766 \lambda$$

$$b_0 = 10.3 \text{ mm} = 0.343 \lambda$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า G_H จากสมการ

$$\begin{aligned} G_H &= \frac{32}{\pi} \left(\frac{a}{\lambda} \right) \sqrt{\frac{50}{\frac{\rho_H}{\lambda}}} \\ &= \frac{32}{\pi} \left(\frac{6.406 \lambda}{\lambda} \right) \sqrt{\frac{50}{\frac{8.85 \lambda}{\lambda}}} \\ &= 34.785 \end{aligned}$$

เมื่อคิดในหน่วยเดซิเบล (dB) จะได้

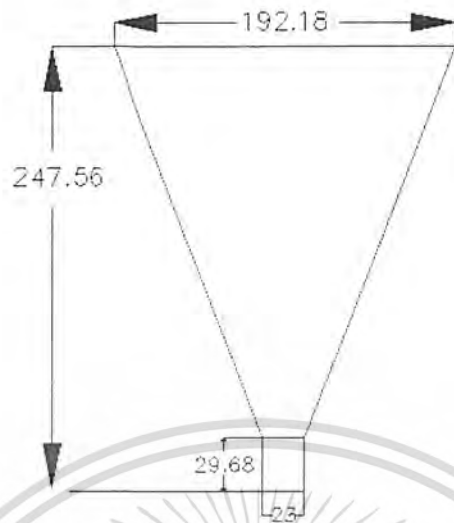
$$G_H = 10 \log 34.785 = 15.414 \text{ dB}$$

เราจะได้ค่าต่างๆที่จำเป็นในการออกแบบในการสร้างสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก ดังนี้



รูปที่ 3.7 สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก
ที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ

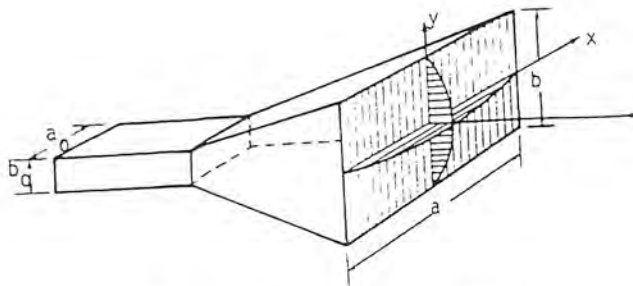
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 (ต่อ) สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวิเคราะห์ห่ออกแบบ

3.6 สายอากาศปากแตรรูปพีระมิด

สายอากาศปากแตรรูปพีระมิดเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างดังที่แสดงไว้ดังรูปที่ 3.8 กล่าวคือมีการคู่ออกทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็ก การคู่ออกในลักษณะนี้ทำให้พื้นที่ในการแพร่กระจายคลื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้อัตราขยายสูงขึ้นด้วยอย่างไรก็ตามการคู่ออกในลักษณะพีระมิดนี้จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณปากแตรมีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง x, y การหาการกระจายคลื่นของสายอากาศนี้ทำได้โดยใช้วิธีการเดียวกับสายอากาศที่กล่าวมาก่อนหน้านี้



รูปที่ 3.8 สายอากาศปากแตรรูปพีระมิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของเฟสของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนปากแตร โดยใช้รูปที่ 3.7 จะได้ว่าที่ตำแหน่ง x, y สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีเฟสเร็วกว่าตรงตำแหน่งมุมปากแตรเป็นดังนี้คือ

$$k\Delta l_x + k\Delta l_y = k\left(\frac{a^2}{8l_u} - \frac{x^2}{2l_u}\right) + k\left(\frac{b^2}{8l_v} - \frac{y^2}{2l_v}\right) \quad (3.46)$$

และกระแสไฟฟ้าสมมูลและกระแสแม่เหล็กสมมูลจะเขียนได้ดังนี้คือ

$$J_x = -\frac{E_0}{Z_0} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{ik(x' - y')} \quad (3.47)$$

$$M_x = E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{ik(x' - y')} \quad (3.48)$$

โดยที่ $-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}$ และ $-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}$

จากสมการ (3.46) ถึงสมการ (3.48) นี้จะสามารถเขียนเวกเตอร์โพเทนเชียลได้ดังนี้คือ

$$A_x = -\frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \cdot \frac{\mu E_0}{Z_0} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cdot e^{ik\left(\frac{a^2}{8l_u} - \frac{x^2}{2l_u} - \frac{y^2}{2l_v} + \frac{b^2}{8l_v} - \frac{y^2}{2l_v}\right)} \cdot e^{ik(x' + y' - L) \cos\theta - L \sin\theta \sin\phi} \cdot dx dy \quad (3.49)$$

จาก A_x จะสามารถหาสนามไฟฟ้า E_u และ E_v ได้โดยใช้สมการ (3.27) และสมการ (3.28) การอินทิเกรตหาค่า A_x ในสมการ (3.49) นั้นค่อนข้างยุ่งยาก ดังนั้นถ้าพิจารณาเฉพาะทิศ $\theta = 0^\circ$ เช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนจะลดรูปและสามารถอินทิเกรตได้ดังนี้คือ

$$A_x = -\frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \cdot \frac{\mu E_0}{Z_0} \cdot e^{ik\left(\frac{a^2}{8l_u} - \frac{b^2}{8l_v} - \frac{y^2}{2l_v}\right)} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-ik\left(\frac{x^2}{2l_u} - \frac{y^2}{2l_v}\right)} \cdot dx dy$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= -\frac{e^{-jkr}}{r} \cdot e^{jk\left(\frac{a^2}{8t_v} + \frac{h^2}{8t_v}\right)} \cdot e^{\frac{j\pi^2 t_h}{2ku^2}} \cdot \frac{\mu E_0}{4\pi Z_0} \sqrt{t_v t_h} \cdot \left[C\left(\frac{b}{\sqrt{2\lambda t_v}}\right) - jS\left(\frac{b}{\sqrt{2\lambda t_v}}\right) \right] \cdot [C(t_4) - C(t_3) - j[S(t_4) - S(t_3)]] \quad (3.50)$$

โดยที่ t_3 และ t_4 เป็นตัวแปรที่นิยามไว้ในสมการ (3.37) และสมการ (3.38) เมื่อทำการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าในทิศทาง $\phi = 90^\circ, \theta = 0^\circ$ โดยแทนค่าสมการ (3.50) ลงในสมการ (3.27) และสมการ (3.28) จะได้ $E_\phi = 0$ และ E_θ เป็นดังนี้คือ

$$E_\theta = e^{-jkr} \cdot e^{jk\left(\frac{a^2}{8t_v} + \frac{h^2}{8t_v}\right)} \cdot e^{\frac{j\pi^2 t_h}{2ku^2}} \cdot E_0 \sqrt{t_v t_h} \cdot \left[C\left(\frac{b}{\sqrt{2\lambda t_v}}\right) - jS\left(\frac{b}{\sqrt{2\lambda t_v}}\right) \right] \cdot [C(t_4) - C(t_3) - j[S(t_4) - S(t_3)]] \quad (3.51)$$

เมื่อทำการคำนวณอัตรายบายโดยใช้วิธีการที่กล่าวไว้ข้างต้นจะได้อัตรายบายของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดในรูปต่อไปนี้

$$G_\theta = \frac{8\pi t_v t_h}{ab} \left[C^2\left(\frac{b}{\sqrt{2\lambda t_v}}\right) + S^2\left(\frac{b}{\sqrt{2\lambda t_v}}\right) \right] \cdot [C(t_4) - C(t_3)]^2 + [S(t_4) - S(t_3)]^2 \quad (3.52)$$

เมื่อเปรียบเทียบ G_θ ในสมการกับ G_ϕ และ G_θ ในสมการ (3.20) และสมการ (3.43) จะเห็นว่าสามารถเขียน G_θ ในรูปของ G_ϕ และ G_θ ได้ดังนี้

$$G_\theta = \frac{\pi\lambda^2}{32ab} \cdot G_\phi \cdot G_\theta \quad (3.53)$$

ดังนั้นอัตรายบายของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดจะสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (3.52) หรือสมการ (3.53) ร่วมกับกราฟของ G_ϕ และ G_θ เนื่องจากมีค่าของ a และ b ชุดหนึ่งที่ทำให้ G_ϕ และ G_θ มีค่าสูงสุดดังนั้นการออกแบบจะเลือกใช้ค่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศนี้จะสามารถเขียนในรูปของพื้นที่ประสิทธิผลของกรณีที่มีการลู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็กในรูปต่อไปนี้

$$A_{ep} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_p = \frac{\pi^2}{8ab} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} G_c \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} G_h = \frac{\pi^2}{8ab} \cdot A_{ec} \cdot A_{eh} \quad (3.54)$$

และเนื่องจากที่ตำแหน่งอัตราขยาย G_c และ G_h สูงสุดนั้น $A_{ec} = 0.63ab$ และ $A_{eh} = 0.65ab$ เมื่อแทนค่า A_{ec} และ A_{eh} ในเงื่อนไขที่ G_c และ G_h มีค่าสูงสุดซึ่งจะทำให้ G_p มีค่าสูงสุดด้วยจะได้พื้นที่ประสิทธิผลเป็นดังนี้คือ

$$A_{ep} = \frac{\pi^2}{8ab} \cdot (0.63ab) \cdot (0.65ab) = 0.505(ab) \quad (3.55)$$

นั่นคือพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดจะเป็นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่จริง ความสัมพันธ์นี้จะสามารถใช้ประโยชน์ในการออกแบบ

3.7 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศปากแตรรูปพีระมิด

การออกแบบสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดให้อยู่ที่ค่าสูงสุด โดยความถี่ใช้งานอยู่ที่ 10 GHz และท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular waveguide) มีความยาวดังนี้คือ

ความยาวภายในท่อนำคลื่นด้าน $a_n = 23$ มิลลิเมตร

ความยาวภายในท่อนำคลื่นด้าน $b_n = 10.3$ มิลลิเมตร

การออกแบบสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดนั้นทำการออกแบบเช่นเดียวกับสายอากาศปากแตรชนิดอื่นๆ ตามที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ได้ทำการจำลองแบบและทำการคำนวณโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณเพื่อหาค่าที่เหมาะสม โดยโครงงานนี้เลือกค่า f_n เท่ากับ 6.8607 λ และ f_n เท่ากับ 6.2157 λ

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8}{10 \times 10^9} = 0.03 = 30 \text{ mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_0 = 23\text{mm} = 0.766\lambda$$

$$b_0 = 10.3\text{mm} = 0.343\lambda$$

หาค่า G_p จากสมการ

$$\begin{aligned} G_p &= 0.51 \frac{4\pi}{\lambda^2} ab \\ &= 0.51 \frac{4\pi}{\lambda^2} (4.5367\lambda)(3.5258\lambda) \\ &= 102.46 \end{aligned}$$

เมื่อคิดในหน่วยเดซิเบล (dB) จะได้

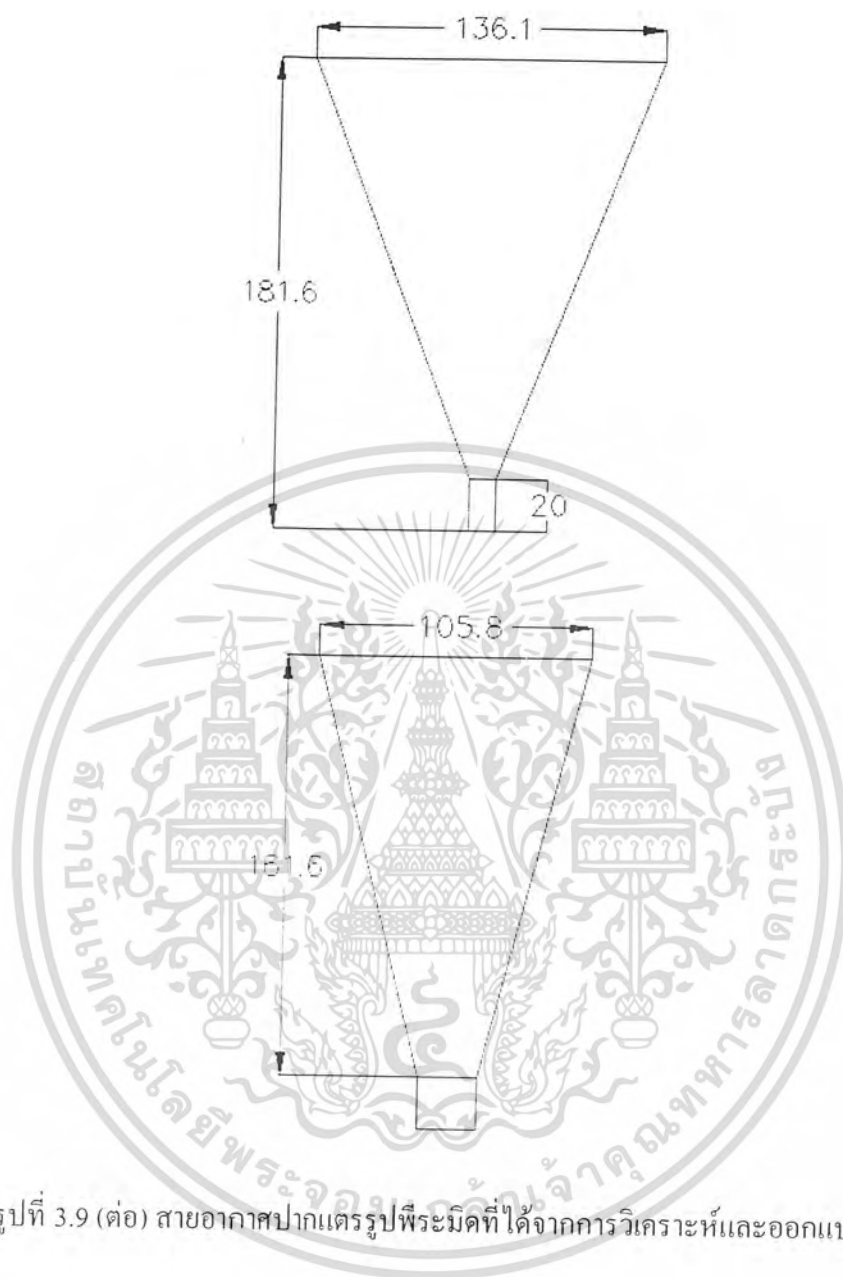
$$G_H = 10 \log 102.46 = 20.105\text{dB}$$

เราจะได้อีกค่าต่างๆที่จำเป็นในการออกแบบในการสร้างสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็กดังนี้



รูปที่ 3.9 สายอากาศปากแตรรูปพีระมิดที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 (ต่อ) สายอากาศปากแตรรูปพีระมิดที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ นั้น หลังจากที่เราได้ทำการออกแบบและทำการสร้างสายอากาศขึ้นมา เรายังไม่สามารถสรุปถึงผลตอบสนองการทำงานที่แท้จริงได้ เพราะในการออกแบบนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบจะถูกกำหนดให้คงที่และเป็นค่าทางอุดมคติ แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้มีได้คงที่เสมอไปเพราะความที่ไม่แน่นอนของวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาใช้สร้างและสภาพแวดล้อมต่างๆ ณ จุดนั้นซึ่งมีผลต่อการทำงานของสายอากาศ ดังนั้นในบทที่ 4 นี้ จะเป็นการนำสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ที่ได้ออกแบบและทำการสร้าง มาทำการทดลองวัดหาผลการทำงานที่แท้จริงของงานและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการออกแบบทางทฤษฎีเพื่อใช้เป็นข้อสรุปต่อไป

การทดลองจะแบ่งเป็น

1.การวัดผลตอบสนองต่อความถี่ของสายอากาศ

2.การวัดแบบรูปการแพร่กระจาย

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

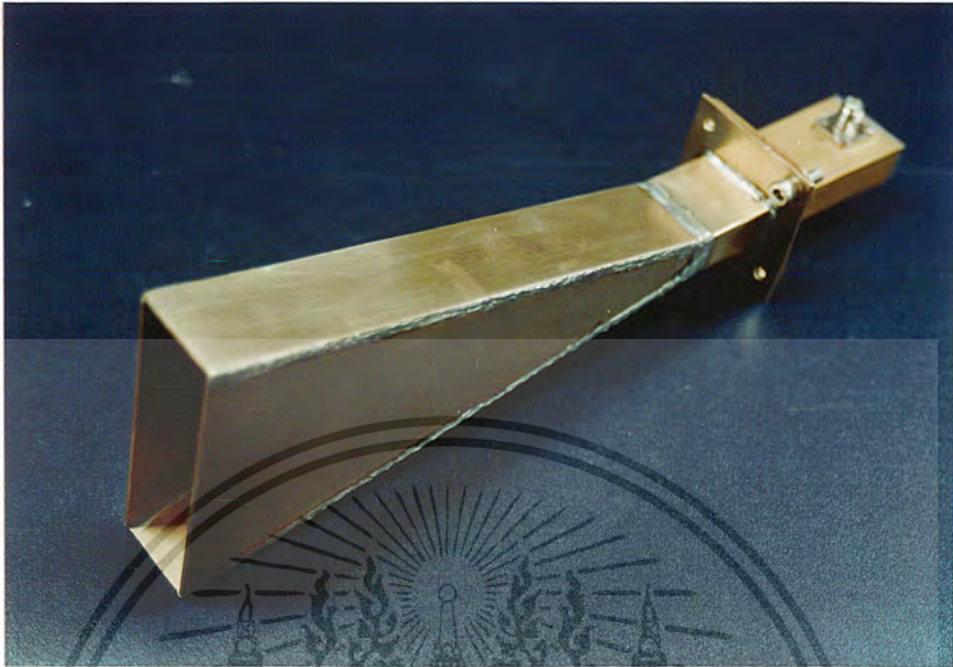
1.เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer)

2.เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer)

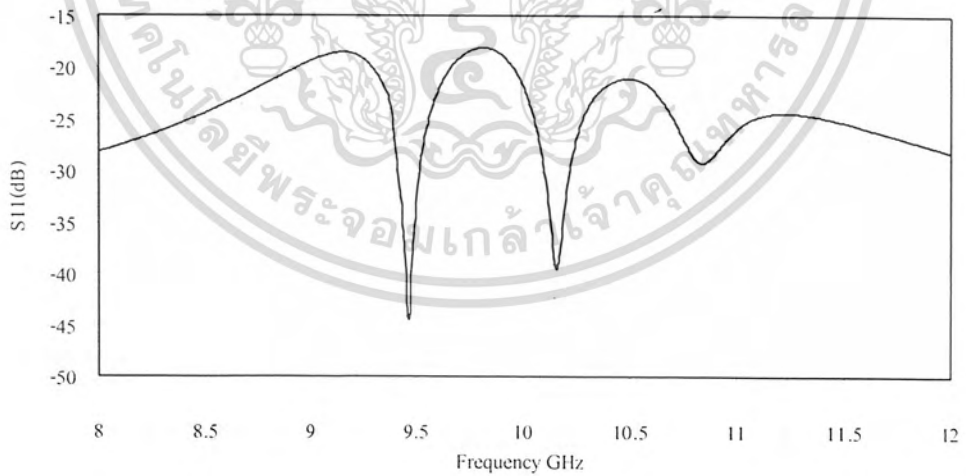
3.Series Synthesized Sweeper

4.2 การวัดผลตอบสนองต่อความถี่ของสายอากาศ

การทดลองในขั้นตอนนี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ทำการวัดหาผลตอบสนองต่อความถี่ของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ต้องการเพื่อดูว่าตรงกับที่ได้ทำการออกแบบไว้หรือไม่ โดยพิจารณาจากค่าที่พารามิเตอร์ S_{11} และได้ทำการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing-wave ratio (SWR))

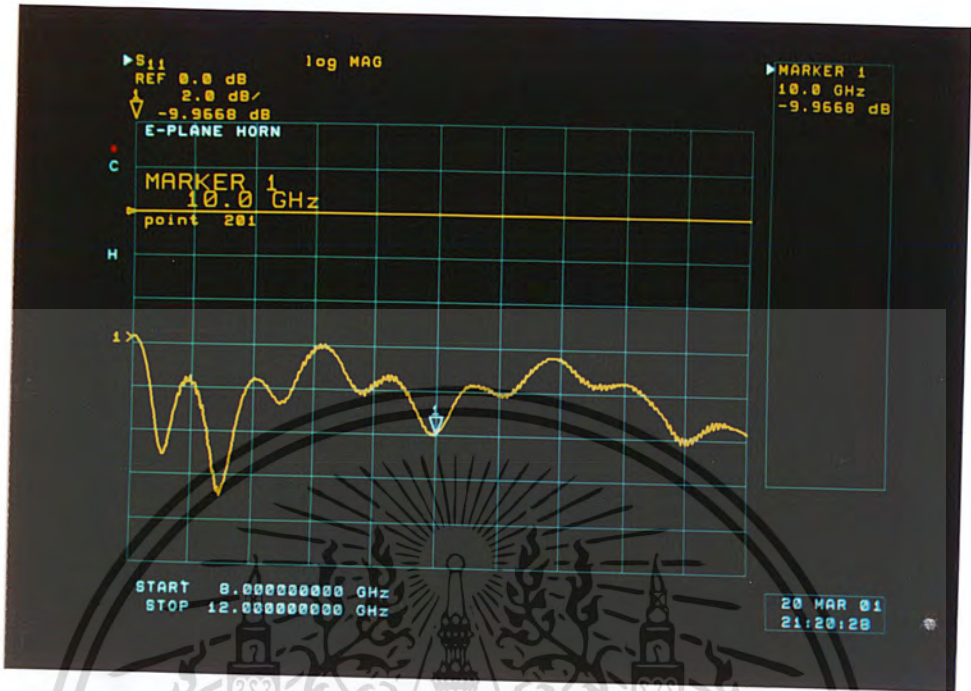


รูปที่ 4.1 สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ

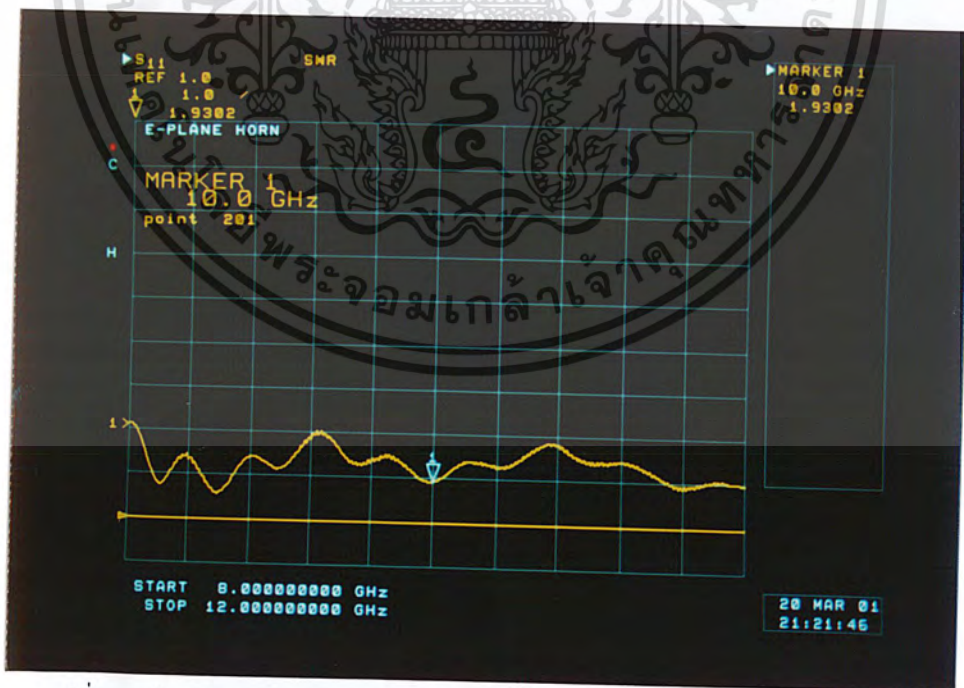


รูปที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ S (S_{11}) ของสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ S (S_{11}) ของสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ได้จากการทดลอง

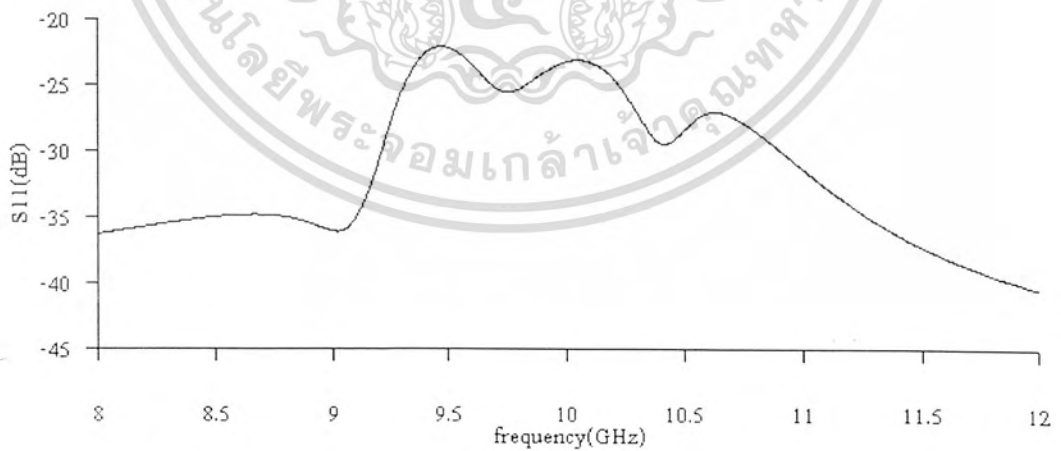


รูปที่ 4.4 ค่า SWR ของสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

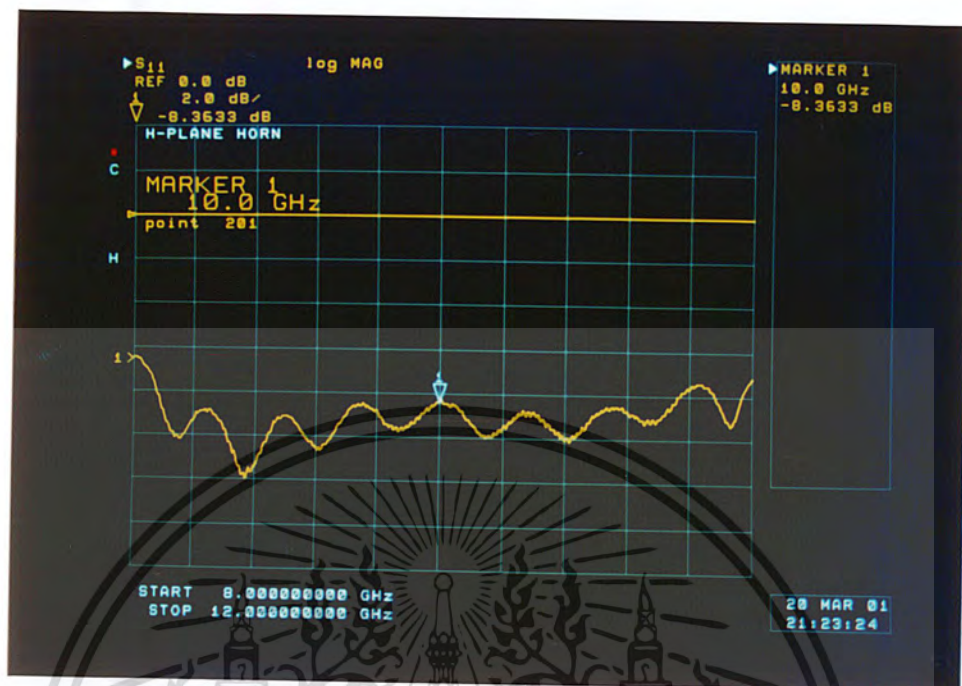


รูปที่ 4.5 สายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ

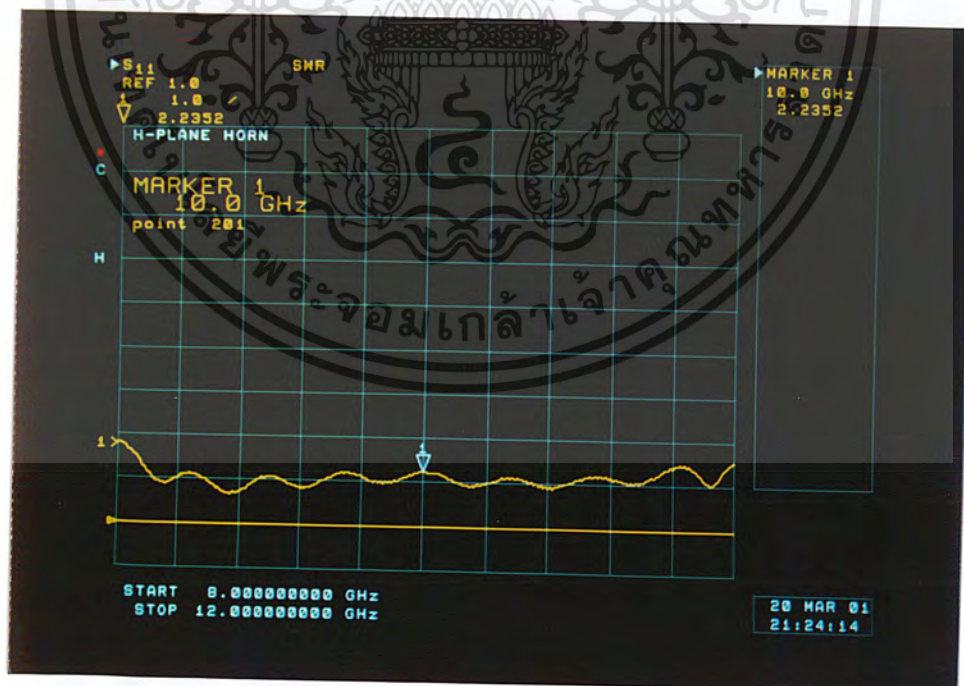


รูปที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ S (S_{11}) ของสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ได้จากการจำลองแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

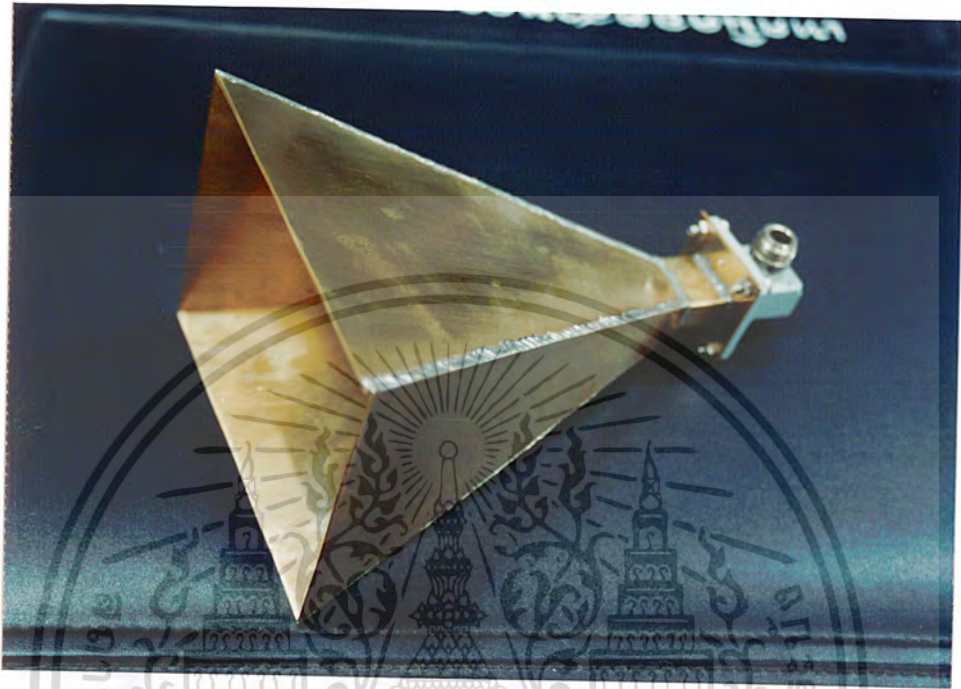


รูปที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ S (S_{11}) ของสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ได้จากการทดลอง

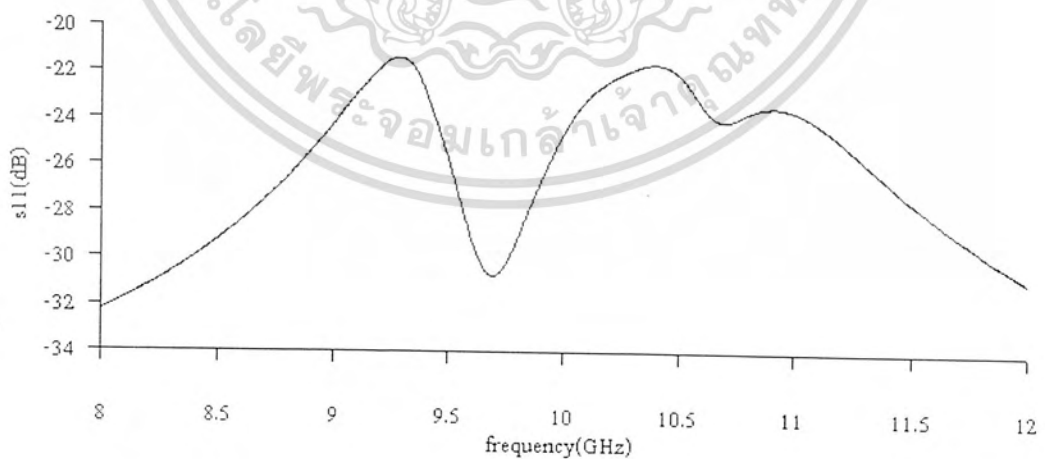


รูปที่ 4.8 ค่า SWR ของสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

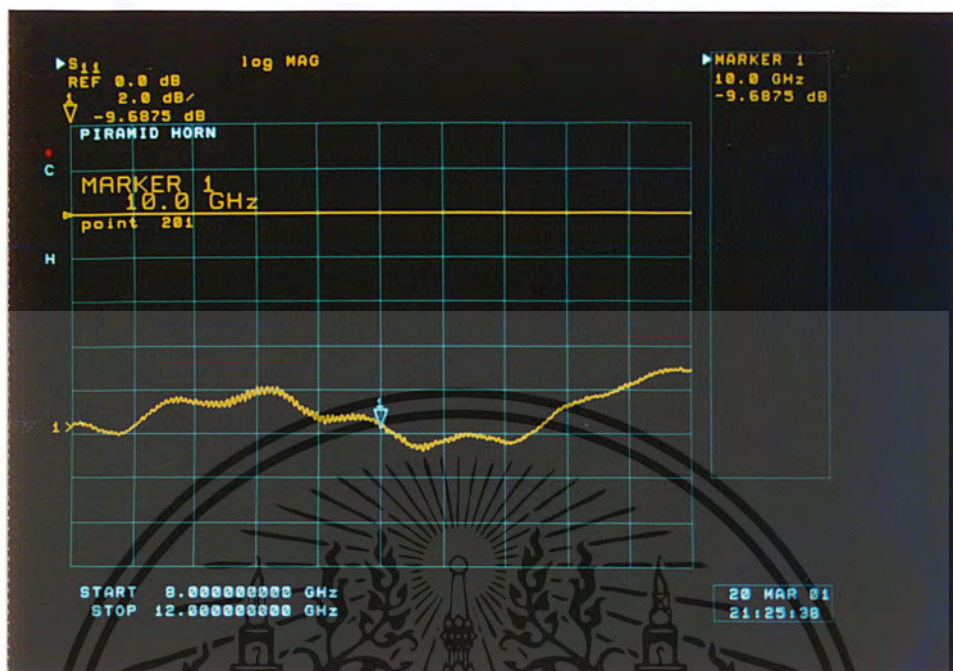


รูปที่ 4.9 สายอากาศปากแตรรูปพีระมิดที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ

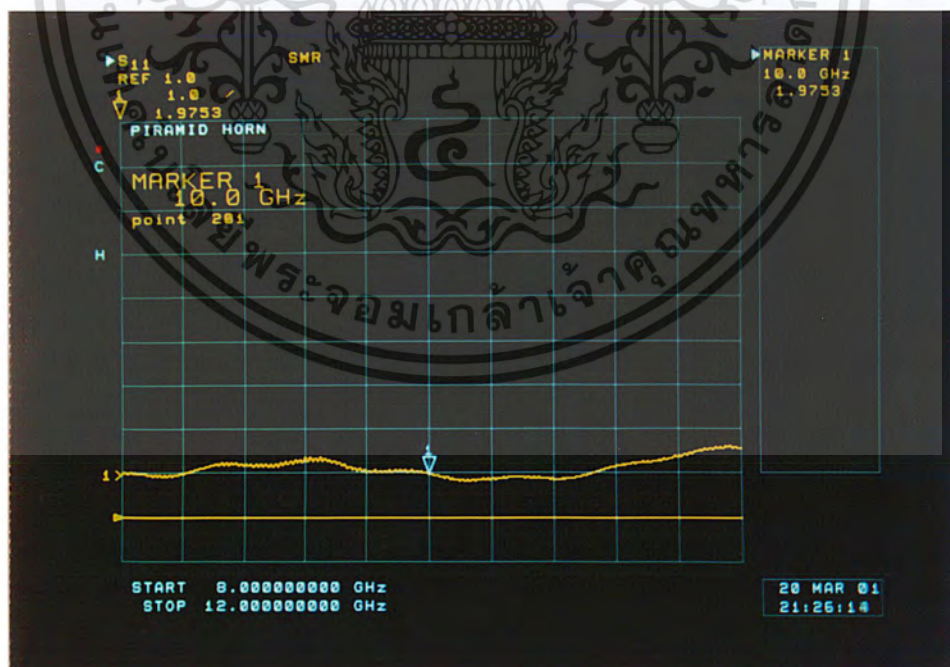


รูปที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ S_{11} ของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดที่ได้จากการจำลองแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

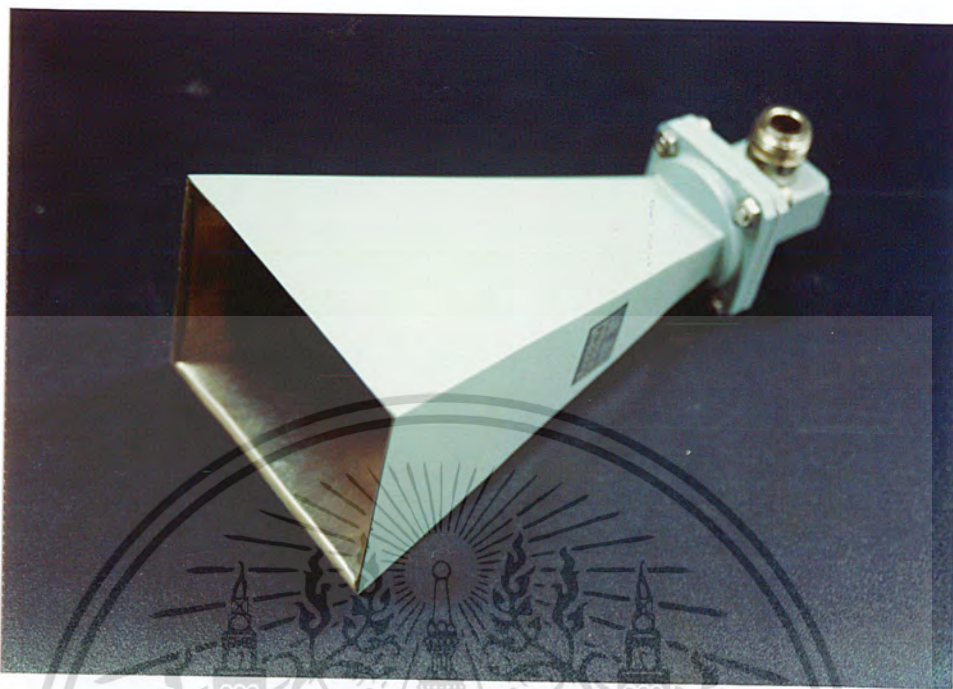


รูปที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ S_{11} ของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.12 ค่า SWR ของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

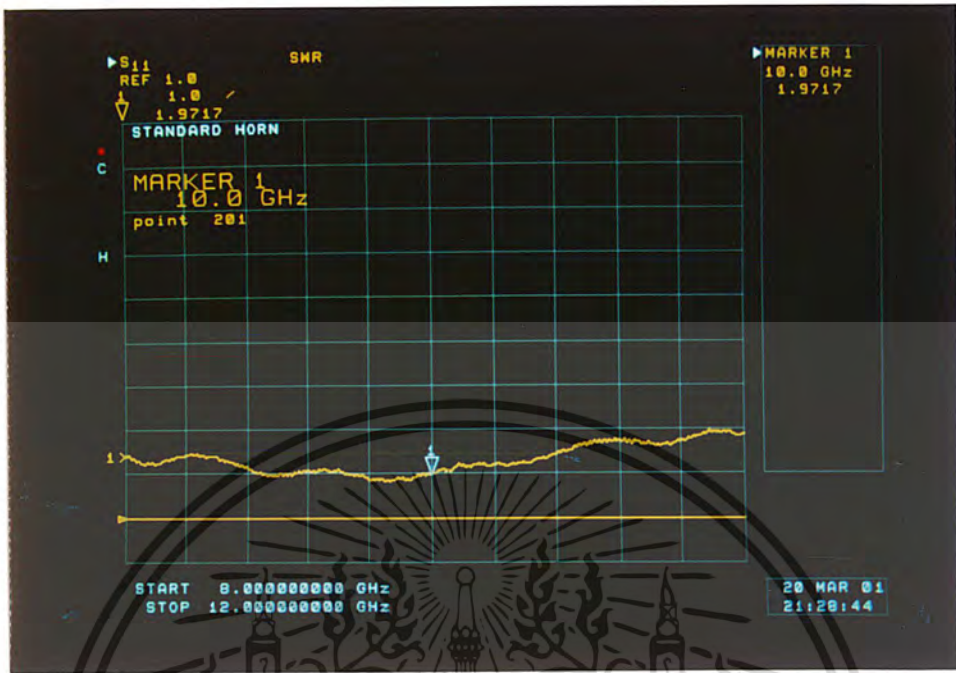


รูปที่ 4.13 สายอากาศปากแตรรูปพีระมิดของชุดทดลองไมโครเวฟ

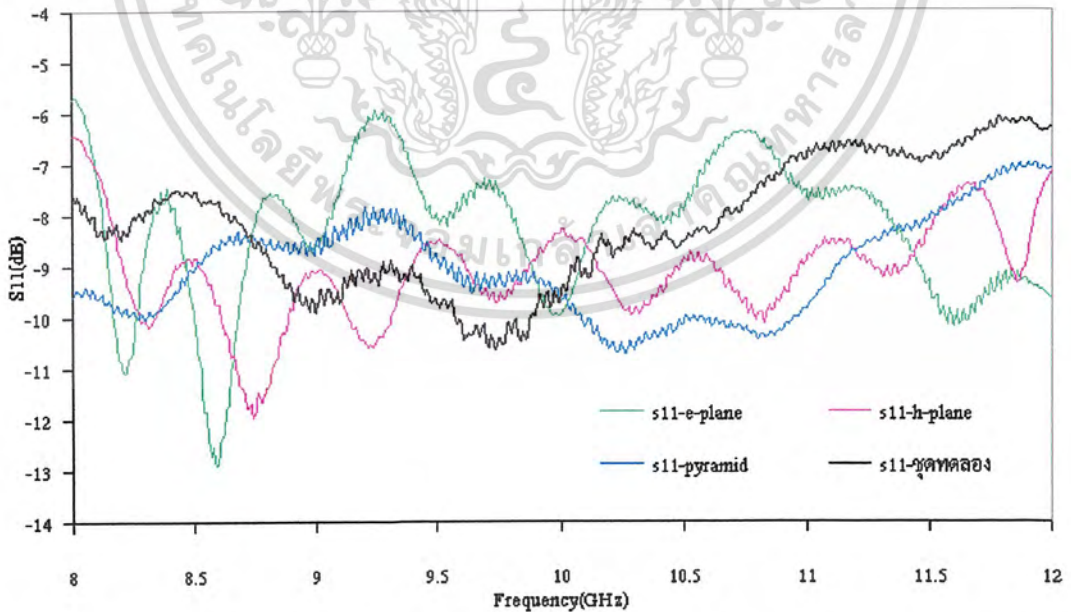


รูปที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ S (S_{11}) ของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดของชุดทดลองไมโครเวฟที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

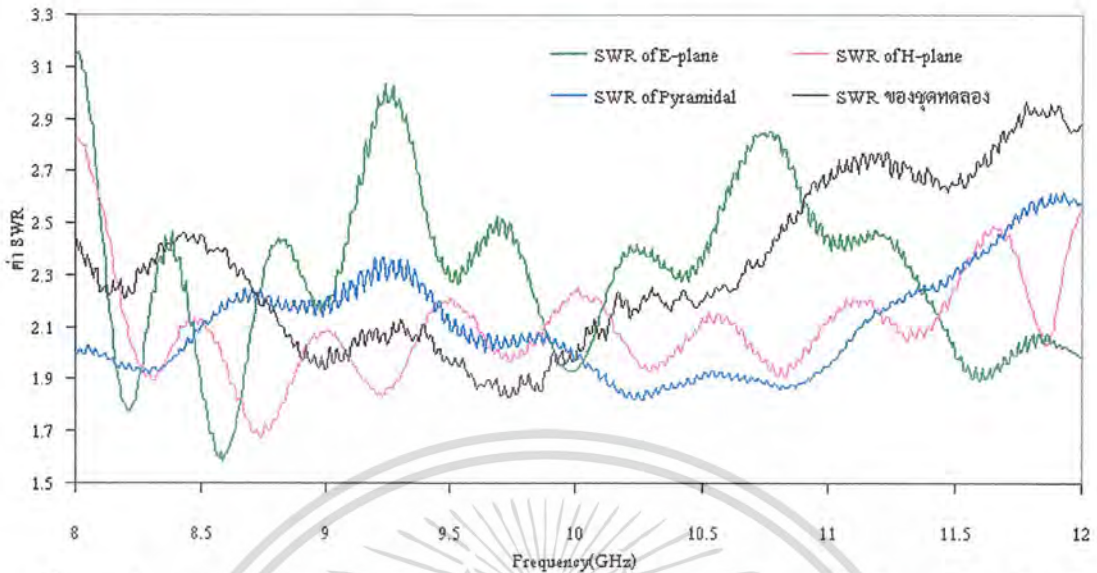


รูปที่ 4.15 ค่า SWR ของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดของชุดทดลองไมโครเวฟ ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ S (S_{11}) ของสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ที่ได้จากการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ค่า SWR ของสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ที่ได้จากการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

4.3 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

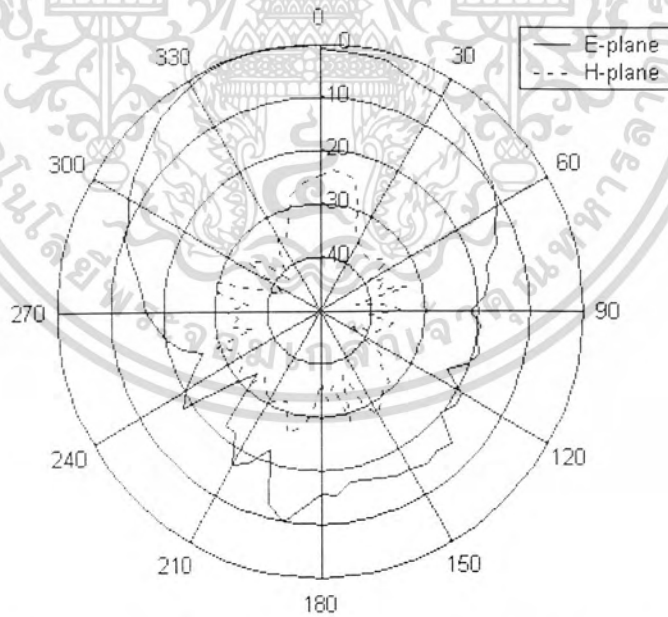
การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เป็นส่วนสำคัญในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เพราะจะแสดงถึงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศว่ามีทิศทางเป็นเช่นไร มีปมวิธกว้างหรือแคบ การทดลองในขั้นตอนนี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ทำการวัดหาแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศในช่วงความถี่ที่ต้องการ โดยการบันทึกค่าเพื่อดูว่าตรงกับที่ได้ทำการออกแบบไว้หรือไม่

ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยมีลักษณะเป็นการวัดความแรงของสัญญาณและเพิ่มทิศทางการรับของสายอากาศทางด้านรับ ดังรูปที่ 4.18 สายอากาศด้านส่งจะเป็นสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดของชุดทดลองไมโครเวฟจะต่อกับเครื่อง Series Synthesized Sweeper จะถูกยึดติดกับที่ ทำการส่งที่กำลังงาน -10 dBm ความถี่ 10 GHz ในส่วนของสายอากาศทางด้านรับจะเป็นสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ ซึ่งจะต่อกับเครื่อง Spectrum Analyzer วางบนฐานที่สามารถหมุนได้โดยทำการวัดทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็ก โดยตั้งให้สายอากาศทางด้านรับหันหน้าไปหาสายอากาศตัวส่งทำมุม 0 องศา จากนั้นบันทึกผลค่าความแรงของสัญญาณที่ได้จากหน้าจอของเครื่อง Spectrum Analyzer แล้วเปลี่ยนค่ามุมไปที่ละ 5 องศา บันทึกผลจนครบ 360 องศา จากนั้นนำค่าที่บันทึกผลทั้งหมดไปพล็อตกราฟซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

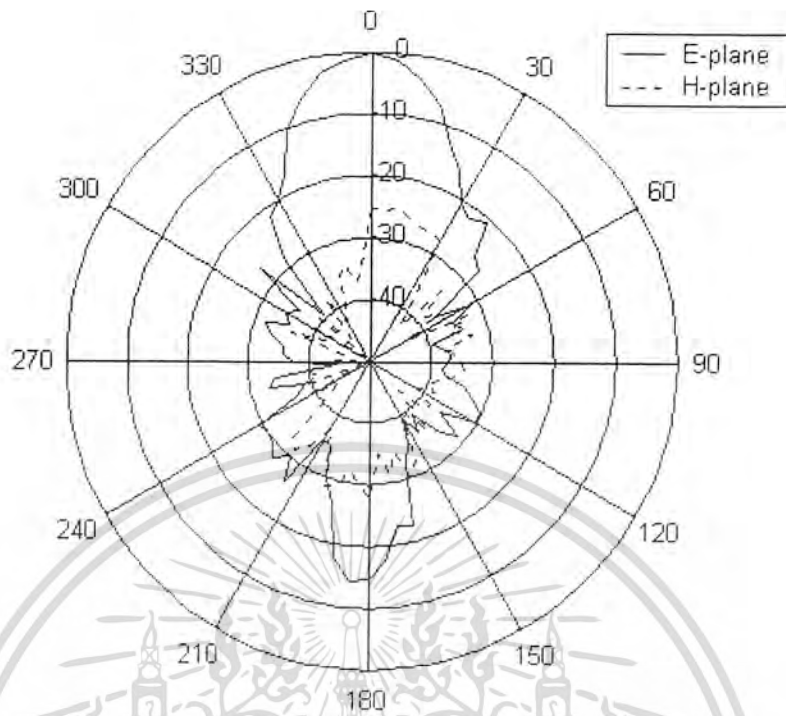


รูปที่ 4.18 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร

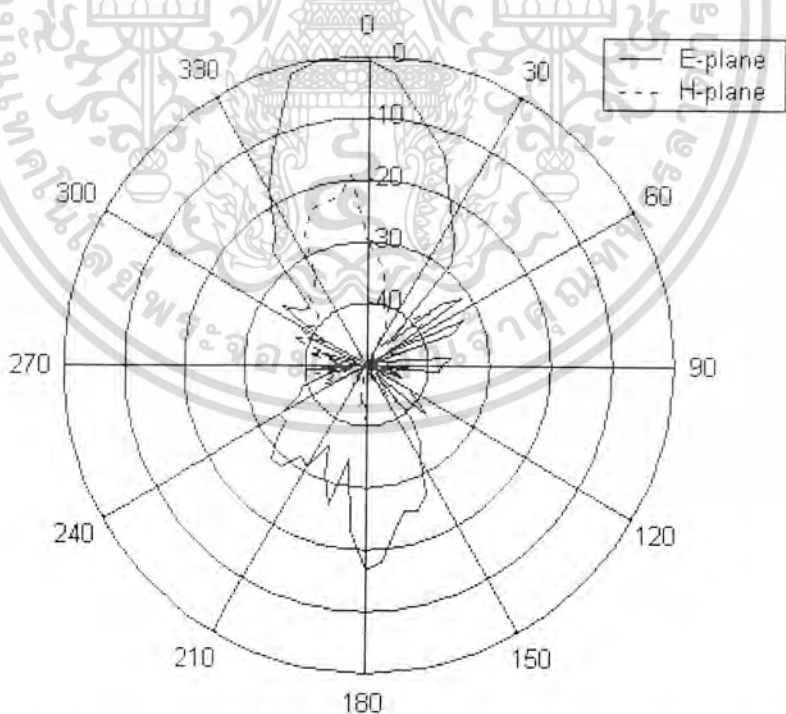


รูปที่ 4.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตรที่มีปลายลู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตรรูปพีระมิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Reflection Coefficient (S_{11})	Standing Wave Ratio (SWR)	Antenna gain
E-plane Sectoral	-13dB at 8.6 GHz	1.6 at 8.6 GHz	12.821 dB
H-plane Sectoral	-12dB at 8.75 GHz	1.7 at 8.75 GHz	15.414 dB
Pyramidal Sectoral	-10.7dB at 10.3 GHz	1.8 at 10.3 GHz	20.105 dB
Standard Horn Antenna	-10.4dB at 9.7 GHz	1.8 at 9.7GHz	-

รูปที่ 4.22 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลองของสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ กับสายอากาศปากแตรของชุดทดลองไมโครเวฟในจุดที่ผลการทดลองให้ค่าดีที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 บทสรุป

ปริญญาบัตรนี้เป็นการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้าง 3 โครงสร้างคือ สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามไฟฟ้า สายอากาศปากแตรที่มีปลายคู่ออกในระนาบสนามแม่เหล็ก และสายอากาศปากแตรรูปพีระมิด ซึ่งทำการทดลองเปรียบเทียบกับสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดของชุดทดลองไมโครเวฟ ทำการวัดผลตอบสนองต่อความถี่ของสายอากาศโดยพิจารณาจากค่าที่พารามิเตอร์ S_{11} ซึ่งค่าที่ได้ออกมาเป็นที่น่าพอใจคือ ค่า S_{11} ของสายอากาศปากแตรที่วิเคราะห์และออกแบบนั้น ที่ได้้นั้นดีกว่าของสายอากาศปากแตรของชุดทดลองไมโครเวฟ และในส่วนของ การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing-wave ratio (SWR)) ค่า SWR ที่ได้้นั้นก็ออกมาเป็นที่น่าพอใจ คือได้ค่าที่ใกล้เคียงกับสายอากาศปากแตรรูปพีระมิดของชุดทดลองไมโครเวฟ

การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบ เป็นส่วนสำคัญในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนั้นออกมาเป็นที่น่าพอใจคือ มีแบนด์วิธกว้าง และมีบีเอ็มวีที่แคบ ทำให้สามารถใช้งานได้หลายช่วงความถี่ และมีทิศทางในการรับสัญญาณดีและมีอัตราขยายสัญญาณที่สูง

ดังนั้น โครงการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศปากแตรนี้ จึงสามารถนำไปเป็นอุปกรณ์ในชุดทดลองไมโครเวฟ เพื่อเป็นการศึกษาการส่งและรับสัญญาณในระบบสื่อสารไมโครเวฟ

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการทำโครงการ ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการทำโครงการที่ทำให้ไม่สามารถสร้างสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ

1. ท่อนำคลื่นมีโครงสร้าง ไม่เหมาะสมกับ โครงสร้างของสายอากาศปากแตรบาง โครงสร้าง ทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองไม่ดีเท่าที่ควร

2. การออกแบบในทางทฤษฎีนั้นการออกแบบจะถูกกำหนดให้คงที่และเป็นค่าทางอุดมคติ แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านั้นมิได้คงที่เสมอไปเพราะความที่ไม่แน่นอนของวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาใช้สร้างและสภาพแวดล้อมต่างๆ ทำให้ค่าที่ได้คลาดเคลื่อนออกไป

3. โครงสร้างมีความยากในการเชื่อมต่อด้วยมือ ทำให้โครงการนี้มีความผิดพลาดในการเชื่อมต่ออยู่บ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ การวัดที่ถูกต้องจะใช้ห้องทดลองในการวัดโดยเฉพาะ

แนวทางในการพัฒนาต่อไป

ในการศึกษาและพัฒนาต่อไปควรที่จะออกแบบสายอากาศปากแตรแบบต่างๆ ให้โครงสร้างมีขนาดเหมาะสมกับการใช้งาน มีอัตราขยายสูงขึ้น บีมวิทที่แคบ และมีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงเพื่อสามารถนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์สื่อสารระบบไมโครเวฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] บัณฑิต วจน์อารยานนท์. พ.ศ.2536. วิศวกรรมสายอากาศ, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] Constantine A.Balanis. 1997, **Antenna Theory Analysis and Design**. United state of America : John Wiley & Sons.
- [3] Gary A.Thiele.Warren L.Stutzman. 1995. **Antenna Theory and Design**, United state of America : John Wiley & Sons.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

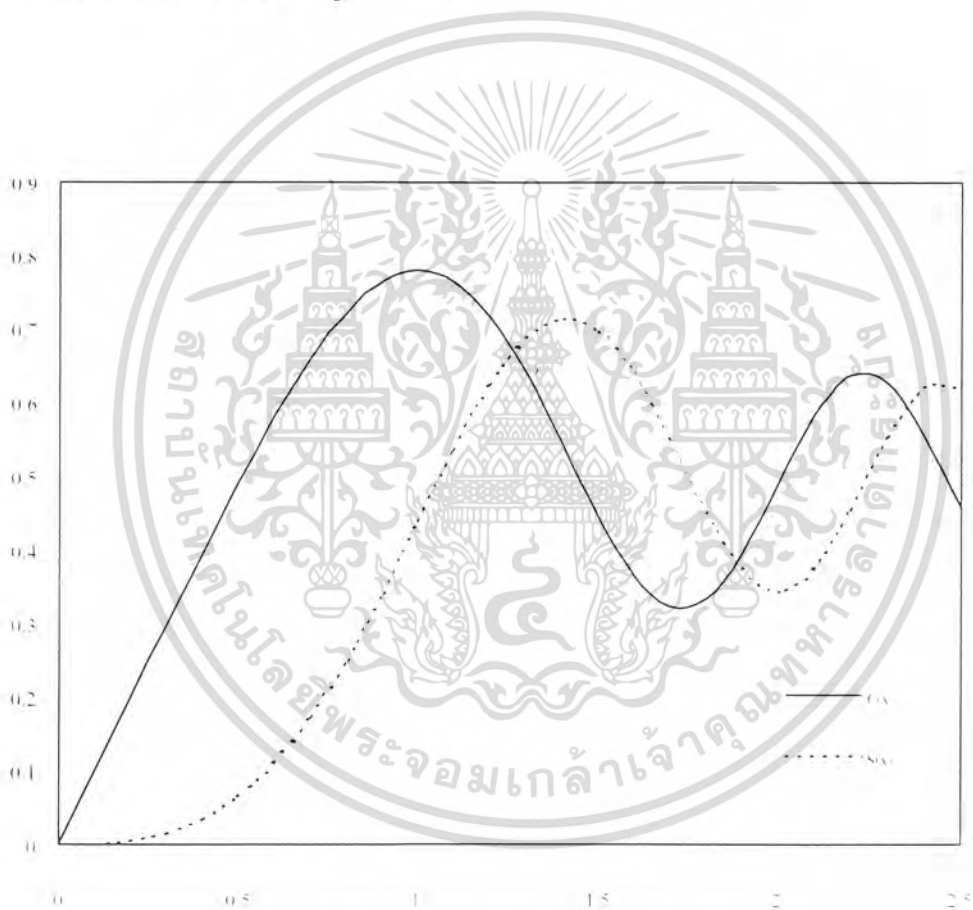
ภาคผนวก

เฟรสนเคลอินทิกรัลเป็นการอินทิกรัลที่มีรูปร่างดังนี้

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

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

$$\text{และ } C(x) - jS(x) = \int_0^x e^{-j\frac{\pi}{2}t^2} dt$$



รูปที่ 1 กราฟของ $C(x)$ และ $S(x)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ตารางค่า $C(x)$ และ $S(x)$

x	C(x)	S(x)	x	C(x)	S(x)
0	0	0	2.9	0.56237	0.41014
0.1	0.1	0.00052	3	0.60572	0.49631
0.2	0.19992	0.00419	3.1	0.5616	0.58181
0.3	0.2994	0.01412	3.2	0.46632	0.59335
0.4	0.39748	0.03336	3.3	0.4057	0.51929
0.5	0.49234	0.06473	3.4	0.43849	0.42965
0.6	0.5811	0.11054	3.5	0.53257	0.41525
0.7	0.65965	0.17214	3.6	0.58795	0.49231
0.8	0.72284	0.24934	3.7	0.54195	0.57498
0.9	0.76482	0.33978	3.8	0.4481	0.56562
1	0.77989	0.43826	3.9	0.42233	0.47521
1.1	0.76381	0.5365	4	0.49842	0.42052
1.2	0.71544	0.6234	4.1	0.57369	0.4758
1.3	0.63855	0.68633	4.2	0.54172	0.5632
1.4	0.5431	0.71353	4.3	0.44944	0.554
1.5	0.44526	0.69751	4.4	0.43833	0.46227
1.6	0.36546	0.63889	4.5	0.52602	0.43427
1.7	0.32383	0.5492	4.6	0.56724	0.51619
1.8	0.33363	0.45094	4.7	0.49143	0.56715
1.9	0.39447	0.37335	4.8	0.4338	0.49675
2	0.48825	0.34342	4.9	0.50016	0.43507
2.1	0.58156	0.37427	5	0.56363	0.49919
2.2	0.63629	0.4557	5.1	0.49979	0.56239
2.3	0.62656	0.55315	5.2	0.43889	0.49688
2.4	0.55496	0.61969	5.3	0.50778	0.44047
2.5	0.45742	0.61918	5.4	0.55723	0.51403
2.6	0.38894	0.54999	5.5	0.47843	0.55369
2.7	0.39249	0.45292	5.6	0.45171	0.47004
2.8	0.46749	0.39153	5.7	0.53846	0.45953

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x	C(x)	S(x)
5.8	0.52984	0.54604
5.9	0.44859	0.51633
6	0.49953	0.44696
6.1	0.5495	0.51647
6.2	0.46761	0.53982
6.3	0.476	0.45555
6.4	0.5496	0.49649
6.5	0.48161	0.54538
6.6	0.46899	0.46307
6.7	0.54674	0.4915
6.8	0.48307	0.54364
6.9	0.47322	0.46244
7	0.54547	0.4997
7.1	0.47332	0.53602
7.2	0.48874	0.45725
7.3	0.53927	0.51894
7.4	0.4601	0.51607
7.5	0.51601	0.4607
7.6	0.51564	0.53885
7.7	0.46278	0.48202
7.8	0.53947	0.48964
7.9	0.47598	0.53235
8	0.4998	0.46021
8.1	0.52275	0.53204
8.2	0.46384	0.48589
8.3	0.53775	0.49323
8.4	0.47092	0.52429
8.5	0.51417	0.46534
8.6	0.50249	0.53693
8.7	0.48274	0.46774

x	C(x)	S(x)
8.8	0.52797	0.52294
8.9	0.46612	0.48856
9	0.53537	0.49985
9.1	0.46661	0.51042
9.2	0.52914	0.48135
9.3	0.47628	0.52467
9.4	0.51803	0.47134
9.5	0.48729	0.531
9.6	0.50813	0.46786
9.7	0.49549	0.5325
9.8	0.50192	0.46758
9.9	0.49961	0.53215
10	0.49989	0.46817
10.1	0.49961	0.53151
10.2	0.50186	0.46885
10.3	0.49575	0.53061
10.4	0.50751	0.47033
10.5	0.48849	0.52804
10.6	0.51601	0.4746
10.7	0.47936	0.52143
10.8	0.52484	0.48413
10.9	0.47211	0.50867
11	0.52894	0.49991
11.1	0.47284	0.49079
11.2	0.52195	0.51805
11.3	0.48675	0.47514
11.4	0.50183	0.52786
11.5	0.51052	0.4744
11.6	0.4789	0.51755
11.7	0.52679	0.49525

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x	C(x)	S(x)
11.8	0.47489	0.49013
11.9	0.51544	0.52184
12	0.49993	0.47347
12.1	0.48426	0.52108
12.2	0.52525	0.49345
12.3	0.47673	0.48867
12.4	0.50951	0.52384
12.5	0.50969	0.47645
12.6	0.47653	0.50936
12.7	0.52253	0.51097
12.8	0.49376	0.47593
12.9	0.48523	0.51977
13	0.52449	0.49994
13.1	0.48598	0.48015
13.2	0.49117	0.52244
13.3	0.52357	0.49583
13.4	0.48482	0.48173

x	C(x)	S(x)
13.5	0.49103	0.5218
13.6	0.52336	0.49848
13.7	0.48908	0.47949
13.8	0.48534	0.51781
13.9	0.52168	0.50737
14	0.49996	0.47726
14.1	0.47844	0.50668
14.2	0.51205	0.5189
14.3	0.51546	0.48398
14.4	0.48131	0.48819
14.5	0.49164	0.5203
14.6	0.52113	0.50538
14.7	0.50301	0.47856
14.8	0.47853	0.49869
14.9	0.49971	0.52136
15	0.52122	0.49926

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้