



สายอากาศลำคลื่นรูปกรวยสำหรับสถานีฐานระบบ
การสื่อสารไร้สายท้องถิ่นไร้สายภายในอาคาร

A Conical Beam Antenna for Access Point of Indoor Wireless LAN System



โดย

นางสาวสุมาลี พุฒพวง

นายเอกชัย ปานทรัพย์

นายเอกสิทธิ์ ฉายางาม

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**61993**
วัน,เดือน,ปี.....**25 ก.ค. 2549**

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

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

นพ
ภาควิชา
วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปเพื่อประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศลำคลื่นรูปกรวยสำหรับสถานีฐานระบบ
การสื่อสารโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายในอาคาร

A Conical Beam Antenna for Access Point of Indoor Wireless LAN System



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศลำคลื่นรูปกรวยสำหรับสถานีฐานระบบการสื่อสารไร้สายท้องถิ่นไร้สายภายในอาคาร

A Conical Beam Antenna for Access Point of Indoor Wireless LAN System

ผู้จัดทำ

1. นางสาวสุมาลี พุดพวง 44010550
2. นายเอกชัย ปานทรัพย์ 44010624
3. นายเอกสิทธิ์ ฉายงาม 44010626

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.จเร สุรวัดน์ปัญญา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศลำคลื่นรูปกรวยสำหรับสถานีฐานระบบการ
สื่อสารโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายในอาคาร

A Conical Beam Antenna for Access Point of Indoor
Wireless LAN System

โดย นางสาวสุมาลี พุฒพวง 44010550
นายเอกชัย ปานทรัพย์ 44010624
นายเอกสิทธิ์ ฉายงาม 44010626

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
รศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นรูปกรวยสำหรับใช้กับสถานีฐานของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายในอาคาร สายอากาศที่ใช้ต้องมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนสามารถออกแบบและสร้างได้ง่าย ในโครงการนี้จะได้ศึกษาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นอันได้แก่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลัง ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด คุณลักษณะการโพลาไรซ์และคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ สายอากาศที่ให้ลำคลื่นรูปกรวยนี้สามารถนำไปใช้ติดตั้งเป็นสายอากาศที่สถานีฐานบนเพดานเพื่อให้บริการครอบคลุมคอมพิวเตอร์ในห้องได้

Abstract

This project presents a conical beam antenna for the access point of the indoor wireless LAN system. The advantage of the proposed antenna is that its structure is not complex and can be easily fabricated. This project describes the calculation of radiation characteristic such as radiation pattern, half power beamwidth, maximum directivity, polarization and impedance of the proposed antenna. This antenna can be used for wireless LAN system by installing on the ceiling to communicate between computers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 สายอากาศโมโนโพล	3
2.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	14
2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	23
2.3.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	23
2.3.2 แบบจำลองควาิตี้	24
บทที่ 3 การวิเคราะห์สายอากาศ	29
3.1 สายอากาศโมโนโพล	29
3.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	38
3.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	53
บทที่ 4 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับมาตรฐาน IEEE 802.11	57
บทที่ 5 การออกแบบ สร้างและทดสอบ	60
5.1 การออกแบบและการสร้างสายอากาศ	60
5.1.1 สายอากาศโมโนโพล	60
5.1.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	62
5.1.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	63
5.2 การทดสอบสายอากาศ	71
5.2.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์	71
5.2.2 การทดสอบแบบรูปสายอากาศ	71
5.3 การวัดค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	72
5.4 การทดสอบประสิทธิภาพ	73
บทที่ 6 ผลการทดลอง	75
6.1 สายอากาศต้นแบบ	75
6.1.1 สายอากาศโมโนโพล	75
6.1.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	75
6.1.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	76
6.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์	77
6.2.1 สายอากาศโมโนโพล	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
6.2.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	78
6.2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	80
6.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	81
6.3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพล	81
6.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	83
6.3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	86
6.4 การวัดค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	87
6.5 การทดสอบประสิทธิภาพ	91
6.5.1 กำลังงานทางด้ำนรับ	91
6.5.1.1 กำลังงานทางด้ำนรับของสายอากาศไดโพล	91
6.5.1.2 กำลังงานทางด้ำนรับของสายอากาศโมโนโพล	91
6.5.1.3 กำลังงานทางด้ำนรับของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	92
6.5.1.4 กำลังงานทางด้ำนรับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	92
6.5.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน	93
6.5.2.1 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศไดโพล	93
6.5.2.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศโมโนโพล	93
6.5.2.3 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	94
6.5.2.4 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	94
6.5.3 ค่าวิสัยสามารถ	95
6.5.3.1 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไดโพล	95
6.5.3.2 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศโมโนโพล	95
6.5.3.3 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	96
6.5.3.3 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	96
6.6 การทดสอบค่ากำลังงานทางด้ำนรับ	97
6.7 การทดสอบค่าวิสัยสามารถ (Throughput)	101
บทที่ 7 สรุป	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะของสายอากาศโมโน โพลบับนระนาบตัวนำ	3
รูปที่ 2.2 รูปแบบการสะท้อนที่ผิวตัวนำ	10
รูปที่ 2.3 ลักษณะของสายอากาศที่วางเหนือระนาบตัวนำ	14
รูปที่ 2.4 ทิศทางของ M	15
รูปที่ 2.5 แหล่งกำเนิดเสมือนที่เกิดขึ้นได้ตัวนำ	17
รูปที่ 2.6 การแบ่งบริเวณของการแพร่กระจายคลื่น	18
รูปที่ 2.7 รูปแบบการสะท้อนที่ผิวตัวนำ	19
รูปที่ 2.8 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศแบบไมโครสตริปแบบวงกลม	23
รูปที่ 2.9 การกระจายของประจุแผ่นตัวนำด้านบน	24
รูปที่ 3.1 สายอากาศโมโน โพลบับบนแผ่นระนาบตัวนำ	29
รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $A = 0.5\lambda, \phi = 0^\circ$	29
รูปที่ 3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $A = 0.5\lambda, \phi = 90^\circ$	30
รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $A = 0.5\lambda$	30
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $A = 1\lambda, \phi = 0^\circ$	31
รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $A = 1\lambda, \phi = 90^\circ$	31
รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $A = 1\lambda$	32
รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $A = 1.5\lambda, \phi = 0^\circ$	32
รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $A = 1.5\lambda, \phi = 90^\circ$	33
รูปที่ 3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $A = 1.5\lambda$	33
รูปที่ 3.11 ค่าโคเรคทีวิตีเทียบกับรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำ	34
รูปที่ 3.12 ค่ามุมยกสูงสุดเทียบกับรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำ	35
รูปที่ 3.13 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเทียบกับรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำ	36
รูปที่ 3.14 ระดับลำคลื่นย่อยด้านหลังเทียบกับรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำ	37
รูปที่ 3.15 โครงสร้างสายอากาศและตัวแปร	38
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก เมื่อ $\alpha = 0.3\lambda, \phi = 0^\circ$	38
รูปที่ 3.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก เมื่อ $\alpha = 0.3\lambda, \phi = 90^\circ$	39
รูปที่ 3.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $\alpha = 0.3\lambda$	39
รูปที่ 3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $\alpha = 0.5\lambda, \phi = 0^\circ$	40
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $\alpha = 0.5\lambda, \phi = 90^\circ$	40

	หน้า
รูปที่ 3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $a = 0.5\lambda$	41
รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $a = 0.7\lambda, \phi = 0^\circ$	41
รูปที่ 3.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $a = 0.7\lambda, \phi = 90^\circ$	42
รูปที่ 3.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $a = 0.7\lambda$	42
รูปที่ 3.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $a = 0.3\lambda$	43
รูปที่ 3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $a = 0.5\lambda$	44
รูปที่ 3.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $a = 0.7\lambda$	44
รูปที่ 3.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $a = 0.3\lambda$	45
รูปที่ 3.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $a = 0.5\lambda$	45
รูปที่ 3.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $a = 0.7\lambda$	46
รูปที่ 3.31 กราฟค่ามุมสนามสูงสุดในระนาบมุมยกกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ	46
รูปที่ 3.32 กราฟค่ามุมสนามสูงสุดในระนาบมุมยกกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ	47
รูปที่ 3.33 กราฟค่ามุมสนามสูงสุดในระนาบมุมยกกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ	47
รูปที่ 3.34 กราฟค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ	48
รูปที่ 3.35 กราฟค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ	48
รูปที่ 3.36 กราฟค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ	49
รูปที่ 3.37 กราฟค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ	50
รูปที่ 3.38 กราฟค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ	50
รูปที่ 3.39 กราฟค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ	51
รูปที่ 3.40 กราฟค่าระดับลำคลื่นด้านหลังกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ	51
รูปที่ 3.41 กราฟค่าระดับลำคลื่นด้านหลังกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ	52
รูปที่ 3.42 กราฟค่าระดับลำคลื่นด้านหลังกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ	52
รูปที่ 3.43 โครงสร้างสายอากาศแบบไมโครสตริบแบบวงกลม	53
รูปที่ 3.44 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่มุม $\phi = 0^\circ$ เมื่อความยาวรัศมีต่างกันที่ TM โหมด(2,1)	54
รูปที่ 3.45 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่มุม $\phi = 0^\circ$ เมื่อความยาวรัศมีต่างกันที่ TM โหมด(3,1)	54
รูปที่ 3.46 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่มุม $\phi = 0^\circ$ เมื่อความยาวรัศมีต่างกันที่ TM โหมด(4,1)	55
รูปที่ 3.47 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่มุม $\phi = 0^\circ$ ด้วย TM โหมดต่างๆที่มุม 40 องศา	55
รูปที่ 5.1 ค่าไครเรติวิตีเทียบกับรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำ	60
รูปที่ 5.2 ค่ามุมยกสูงสุดเทียบกับความยาวสายอากาศ	61

	หน้า
รูปที่ 5.3 สายอากาศโมโนโพลบนระนาบค้ำ	61
รูปที่ 5.4 สายอากาศคั่นแบบเมื่อมองจากด้านข้าง	62
รูปที่ 5.5 สายอากาศคั่นแบบเมื่อมองจากด้านบน	63
รูปที่ 5.6 สนามไฟฟ้าที่โหนด (3,1)	64
รูปที่ 5.7 การหาค่าความเข้มการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด	65
รูปที่ 5.8 การป้อนสัญญาณ โดยใช้สายส่งไมโครสตริปสามตอน	67
รูปที่ 5.9 ขนาดของไมโครสตริปรูปวงกลม โดยใช้สายส่งสามตอน	70
รูปที่ 5.10 การทดสอบแบบรูปของสายอากาศในระนาบมุมกวาด	71
รูปที่ 5.11 การทดสอบแบบรูปของสายอากาศในระนาบมุมยก	72
รูปที่ 5.12 การทดสอบการวัดกำลังงานด้านรับ	73
รูปที่ 5.13 การทดสอบการวัดค่าวิสัยสามารถ	74
รูปที่ 6.1 สายอากาศโมโนโพลคั่นแบบ	75
รูปที่ 6.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมีคั่นแบบ	75
รูปที่ 6.3 สายอากาศไมโครสตริปคั่นแบบ	76
รูปที่ 6.4 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมคั่นแบบด้านหลัง	76
รูปที่ 6.5 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง	77
รูปที่ 6.6 อินพุทอิมพีแดนซ์	77
รูปที่ 6.7 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง	78
รูปที่ 6.8 อินพุทอิมพีแดนซ์	78
รูปที่ 6.9 การตอบสนองเข้ากับสายอากาศคั่นแบบ	79
รูปที่ 6.10 อัตราส่วนคลื่นนิ่งหลังการแมทซ์ซิง	79
รูปที่ 6.11 อินพุทอิมพีแดนซ์หลังการแมทซ์ซิง	80
รูปที่ 6.12 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง	80
รูปที่ 6.13 อินพุทอิมพีแดนซ์	81
รูปที่ 6.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกขณะที่มุมกวาดมีค่า 0 องศา	81
รูปที่ 6.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกขณะที่มุมกวาดมีค่า 90 องศา	82
รูปที่ 6.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด	82
รูปที่ 6.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกขณะที่มุมกวาดมีค่า 0 องศา	83
รูปที่ 6.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกขณะที่มุมกวาดมีค่า 90 องศา	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 6.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดขณะที่มีมุมกมิต่ำ 90 องศา	84
รูปที่ 6.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดขณะที่มีมุมกวาดมีค่า 0 องศา	84
รูปที่ 6.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดขณะที่มีมุมกวาดมีค่า 90 องศา	85
รูปที่ 6.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดขณะที่มีมุมกมิต่ำ 90 องศา	85
รูปที่ 6.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดขณะที่มีมุมกวาดมีค่า 0 องศา	86
รูปที่ 6.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดขณะที่มีมุมกวาดมีค่า 90 องศา	86
รูปที่ 6.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดขณะที่มีมุมกมิต่ำ 90 องศา	87
รูปที่ 6.26 การติดตั้งสายอากาศมองทางด้านข้าง	88
รูปที่ 6.27 การติดตั้งสายอากาศมองทางด้านบน	89
รูปที่ 6.28 ความเข้มสัญญาณด้านรับของสายอากาศโมโนโพล	89
รูปที่ 6.29 ความเข้มสัญญาณด้านรับของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	90
รูปที่ 6.30 ความเข้มสัญญาณด้านรับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	90
รูปที่ 6.31 กำลังงานทางด้านรับของสายอากาศไดโพล	91
รูปที่ 6.32 กำลังงานทางด้านรับของสายอากาศโมโนโพล	91
รูปที่ 6.33 กำลังงานทางด้านรับของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	92
รูปที่ 6.34 กำลังงานทางด้านรับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	92
รูปที่ 6.35 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศไดโพล	93
รูปที่ 6.36 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศโมโนโพล	93
รูปที่ 6.37 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	94
รูปที่ 6.38 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	94
รูปที่ 6.39 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไดโพล	95
รูปที่ 6.40 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศโมโนโพล	95
รูปที่ 6.41 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	96
รูปที่ 6.42 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	96
รูปที่ 6.43 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ	97
รูปที่ 6.44 แผนผังบริเวณที่ทดสอบ	98
รูปที่ 6.45 ผลการทดสอบกำลังงานทางด้านรับของสายอากาศไดโพล	99
รูปที่ 6.46 ผลการทดสอบกำลังงานทางด้านรับของสายอากาศโมโนโพล	99
รูปที่ 6.47 ผลการทดสอบกำลังงานทางด้านรับของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	100
รูปที่ 6.48 ผลการทดสอบกำลังงานทางด้านรับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 6.49 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไดโพล	101
รูปที่ 6.50 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศโมโนโพล	101
รูปที่ 6.51 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี	102
รูปที่ 6.52 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	102



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณค่าต่างๆบนแผ่นกราฟด์เพลนอนันต์	56
ตารางที่ 3.2 ผลการคำนวณค่าต่างๆบนแผ่นกราฟด์เพลนอนันต์	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันอย่างมากจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบการสื่อสารไร้สายนั่นก็คือสายอากาศ ในการสร้างสายอากาศนั้นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ โครงสร้างของสายอากาศต้องไม่ซับซ้อนสามารถสร้างได้ง่าย และใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระบบดังกล่าว สำหรับสายอากาศที่ให้ลาคี่นรูปกรวยนั้น เป็นสายอากาศอีกชนิดหนึ่งที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในระบบการสื่อสารดังกล่าว เนื่องจากการใช้สายอากาศชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ระบบติดตามเป้าหมาย ซึ่งทำให้ลดความสิ้นเปลืองลงไปได้มาก ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ทำให้สายอากาศลาคี่นรูปกรวยเป็นสายอากาศที่น่าสนใจ และเหมาะสำหรับนำไปใช้ในระบบสื่อสารโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายเพื่อครอบคลุมพื้นที่ให้บริการในหน่วยงานต่างๆ หรือนำไปใช้ติดตั้งเป็นสายอากาศที่สถานีฐานบนเพดานเพื่อให้บริการครอบคลุมคอมพิวเตอร์ในห้องได้

สายอากาศที่ให้ลาคี่นรูปกรวยที่สมบูรณ์นั้น จะมีค่าสนามเป็นศูนย์กลางในแนวคี่งฉากกับระนาบของสายอากาศค่าสูงสุดของสนามจะชี้ไปยังเป้าหมาย หรือลูกข่ายและแบบรูปการแพร่กระจายคี่นในระนาบมุมกวาดจะมีความแรงของสนามเท่ากันทุกทิศทางในการนำสายอากาศชนิดนี้มาใช้ในระบบการสื่อสาร โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย สายอากาศจะต้องมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดไม่น้อยกว่า 4 dBi

โดยโครงงานนี้จะนำเสนอสายอากาศที่ใช้ในระบบสื่อสารโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายในอาคาร ซึ่งสายอากาศที่จะนำเสนอนี้จะให้ลาคี่นรูปกรวย โดยในที่นี้จะสร้างสายอากาศมาเปรียบเทียบกัน 3 ชนิด โดยการหาคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคี่น ค่ามุมที่สนามสูงสุด ในระนาบมุมยก ความกว้างของลาคี่นครึ่งก้าง ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่หามาได้มาเปรียบเทียบกัน

โครงงานฉบับนี้เป็นกรนำเสนอกรวิเคราะห์สายอากาศที่ให้ลาคี่นรูปกรวย ซึ่งครอบคลุมเนื้อหาทั้งหมด 7 บท ในแต่ละบทมีรายละเอียดโดยสรุปดังนี้

บทที่ 1 จะกล่าวถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตของงาน และเนื้อหาโดยสรุปของในแต่ละบทของปริญญานิพนธ์นี้

บทที่ 2 จะอธิบายการพิจารณาสายอากาศชนิดต่างๆ และคุณลักษณะของการแพร่กระจายคี่นพื้นฐานของสายอากาศ เช่น แบบรูปการแพร่กระจายคี่น ความเข้มการแพร่กระจายคี่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง เป็นต้น

บทที่ 3 จะเป็นการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของสายอากาศ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

บทที่ 4 เป็นการอธิบายความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับมาตรฐาน IEEE 802.11

บทที่ 5 เป็นการออกแบบสร้างและทดสอบสายอากาศที่ให้ค่าพารามิเตอร์ตามความต้องการโดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์มาทำการทดลองสร้าง พร้อมทั้งการนำสายอากาศที่ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพ

บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์

บทที่ 7 สรุปเนื้อหาโดยรวม

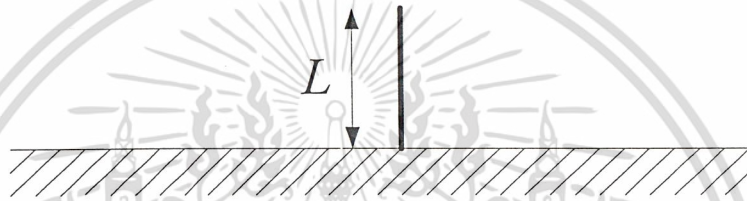


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 สายอากาศโมโนโพล

สายอากาศโมโนโพลประกอบด้วยลวดตัวนำบนแผ่นระนาบตัวนำซึ่งตั้งฉากกัน สายอากาศโมโนโพลทำหน้าที่เหมือนกับสายอากาศไดโพลที่ยาวเป็น 2 เท่าของตัวนำแต่จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเพียงครึ่งเดียวของสายอากาศไดโพลเพราะแผ่นระนาบตัวนำแบ่งอีกครึ่งหนึ่งออกไป ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศดังนี้



รูปที่ 2.1 ลักษณะของสายอากาศโมโนโพลบนระนาบตัวนำ

การหาค่าสนามไฟฟ้าของสายอากาศไดโพล

สายอากาศไดโพลมีการแจกแจงรูปกระแสดังนี้

$$I_e(x', y', z') = \begin{cases} \hat{a}_z I_0 \sin \left[k \left(\frac{l}{2} - z' \right) \right]; & 0 \leq z' \leq \frac{l}{2} \\ \hat{a}_z I_0 \sin \left[k \left(\frac{l}{2} + z' \right) \right]; & -\frac{l}{2} \leq z' \leq 0 \end{cases}$$

จาก

$$dE_\theta = jk\eta \bar{I}_e(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \sin \theta dz'$$

$$dH_\phi = jk \bar{I}_e(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \sin \theta dz'$$

โดยที่

$$dE_r = dE_\phi = dH_r = dH_\theta = 0$$

$$\text{เมื่อ } R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}, \quad x' = 0, y' = 0$$

$$\text{ได้ } R = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-z')^2}$$

ซึ่งกระจายได้ว่า

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + (-2zz' + z'^2)} = \sqrt{r^2 + (-2zz' \cos \theta + z'^2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเป็นสนามระยะไกลจะได้ $R = r - z' \cos \theta$ สำหรับเทอมเฟส และ $R = r$ สำหรับเทอมขนาด
จะได้ว่า

$$dE_\theta \approx jk\eta \bar{I}_e(x', y', z') \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta e^{jkz' \cos \theta} dz'$$

$$E_\theta = \int_{-l/2}^{l/2} dE_\theta = jk\eta \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \left[\bar{I}_e(x', y', z') e^{jkz' \cos \theta} dz' \right]$$

เมื่อทำการแจกแจงรูปกระแสจะได้

$$E_\theta = jkl_0\eta \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \left\{ \int_{-l/2}^0 \sin \left[k \left(\frac{l}{2} + z' \right) \right] e^{jkz' \cos \theta} dz' + \int_0^{l/2} \sin \left[k \left(\frac{l}{2} - z' \right) \right] e^{jkz' \cos \theta} dz' \right\}$$

อินทิเกรตโดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\int e^{\alpha x} \sin(\beta x + \gamma) dx = \frac{e^{\alpha x}}{\alpha^2 + \beta^2} [\alpha \sin(\beta x + \gamma) - \beta \cos(\beta x + \gamma)]$$

เมื่อ

$$\alpha = jk \cos \theta$$

$$x = z'$$

$$\beta = \pm k$$

$$\gamma = k \frac{l}{2}$$

จะได้

$$\int_{-l/2}^0 \sin \left[k \left(\frac{l}{2} + z' \right) \right] e^{jkz' \cos \theta} dz'$$

$$= \frac{1}{k^2 - k^2 \cos^2 \theta} \left[jk \cos \theta \sin \left(k \frac{l}{2} \right) - k \cos \left(k \frac{l}{2} \right) \right] + \frac{ke^{-jk \frac{l}{2} \cos \theta}}{k^2 - k^2 \cos^2 \theta}$$

$$\int_0^{l/2} \sin \left[k \left(\frac{l}{2} - z' \right) \right] e^{jkz' \cos \theta} dz'$$

$$= -\frac{1}{k^2 - k^2 \cos^2 \theta} \left[jk \cos \theta \sin \left(k \frac{l}{2} \right) + k \cos \left(k \frac{l}{2} \right) \right] + \frac{ke^{jk \frac{l}{2} \cos \theta}}{k^2 - k^2 \cos^2 \theta}$$

เมื่อนำมารวมกันจะได้

$$= \frac{1}{k \sin^2 \theta} 2 \cos \left(k \frac{l}{2} \cos \theta \right) - \frac{2 \cos \left(k \frac{l}{2} \right)}{k \sin^2 \theta}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะหาสนามไฟฟ้าของไดโพล

$$E_\theta = \frac{j\eta I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right]; 0 \leq \theta \leq \pi$$

และสนามแม่เหล็กได้

$$H_\phi = \frac{E_\theta}{\eta} = \frac{jI_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right]; 0 \leq \theta \leq \pi$$

ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศไดโพลที่แพร่กระจายเมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกลเมื่อแผ่นระนาบตัวนำเป็นอนันต์จะได้

$$E_\theta = \frac{j\eta I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right]; 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (2-1-1)$$

และ

$$H_\phi = \frac{E_\theta}{\eta} = \frac{jI_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right]; 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (2-1-2)$$

เมื่อ

$$\eta = \text{อินทรีนสติกอิมพีแดนซ์} = 120\pi$$

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

$$\lambda = \text{ความยาวคลื่น}$$

$$\theta = \text{มุมยก}$$

$$l = 2 \text{ เท่าของความยาวสายอากาศไดโพล}$$

$$r = \text{ระยะทางจากต้นกำเนิดไปยังจุดสังเกต}$$

$$I_0 = \text{ค่ากระแสสูงสุด}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาค่าพอยติงเวกเตอร์เฉลี่ยจาก

$$S_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{E} \times \bar{H}^*] = \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{a}_\theta E_\theta \times \bar{a}_\phi H_\phi^*]$$

$$S_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}\left[\bar{a}_\theta E_\theta \times \bar{a}_\phi \frac{E_\theta^*}{\eta}\right]$$

$$S_{av} = \bar{a}_r \frac{1}{2\eta} |E_\theta|^2$$

$$S_{av} = \frac{\eta |I_0|^2}{8\pi^2 r^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right]$$

และหาความเข้มการแผ่กระจายคลื่นจาก

$$U = r^2 S_{av}$$

$$U = \frac{\eta |I_0|^2}{8\pi^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right]^2$$

(2-1-3)

จะได้ค่ากำลังงานการแผ่กระจายคลื่นจาก

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} W_{av} r^2 \sin\theta d\theta d\phi$$

$$P_{rad} = \frac{\eta |I_0|^2}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{[\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)]^2}{\sin\theta} d\theta$$

(2-1-4)

ให้

$$\cos\theta = x$$

$$\theta = \cos^{-1} x$$

$$d\theta = \frac{-dx}{\sqrt{1-x^2}}$$

$$\sin^2\theta = 1 - \cos^2\theta = 1 - x^2$$

จะได้ขอบเขตบน $\theta = \pi \therefore x = \cos\theta = \cos\pi = -1$

จะได้ขอบเขตล่าง $\theta = 0 \therefore x = \cos\theta = \cos 0 = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$P_{rad} = \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_1^{-1} \frac{\left[\cos\left(\frac{kl}{2}x\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \right]^2}{\sqrt{1-x^2}} \cdot \frac{-dx}{\sqrt{1-x^2}}$$

$$P_{rad} = \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_{-1}^1 \frac{\left[\cos\left(\frac{kl}{2}x\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \right]^2}{1-x^2} dx$$

$$P_{rad} = \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_{-1}^1 \frac{\left[\cos^2\left(\frac{kl}{2}x\right) - 2\cos\left(\frac{kl}{2}x\right)\cos\left(\frac{kl}{2}\right) + \cos^2\left(\frac{kl}{2}\right) \right]}{(1+x)(1-x)} dx$$

จาก

$$\cos^2\left(\frac{kl}{2}x\right) = \frac{1}{2} + \frac{\cos(klx)}{2}$$

$$\cos^2\left(\frac{kl}{2}\right) = \frac{1}{2} + \frac{\cos(kl)}{2}$$

จะได้

$$P_{rad} = \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_{-1}^1 \frac{\left[\frac{1}{2} + \frac{\cos(klx)}{2} + \frac{1}{2} + \frac{\cos(kl)}{2} - 2\cos\left(\frac{kl}{2}x\right)\cos\left(\frac{kl}{2}\right) \right]}{(1+x)(1-x)} dx$$

$$= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^1 \left[1 + \frac{\cos(klx)}{2} + \frac{\cos(kl)}{2} - 2\cos\left(\frac{kl}{2}x\right)\cos\left(\frac{kl}{2}\right) \right] \frac{[2]}{(1+x)(1-x)} dx$$

จาก

$$\frac{2}{(1-x)(1+x)} = \frac{1}{1-x} + \frac{1}{1+x}$$

$$P_{rad} = \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^1 \left[1 + \frac{\cos(klx)}{2} + \frac{\cos(kl)}{2} - 2\cos\left(\frac{kl}{2}x\right)\cos\left(\frac{kl}{2}\right) \right] \left[\frac{1}{1-x} + \frac{1}{1+x} \right] dx$$

ให้

$$1-x = y$$

$$x = 1-y; dx = -dy$$

$$1+x = y$$

$$x = y-1; dx = dy$$

เมื่อ

$$1-x = y, x = 0 \rightarrow y = 1, x = 1 \rightarrow y = 0$$

$$1+x = y, x = 0 \rightarrow y = 1, x = 1 \rightarrow y = 2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
P_{rad} &= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \left\{ \int_1^0 \left[1 + \frac{\cos(kl(1-y))}{2} + \frac{\cos(kl)}{2} - 2 \cos\left(\frac{kl(1-y)}{2}\right) \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \right] \frac{-dy}{y} \right. \\
&\quad \left. + \int_1^2 \left[1 + \frac{\cos(kl(y-1))}{2} + \frac{\cos(kl)}{2} - 2 \cos\left(\frac{kl(y-1)}{2}\right) \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \right] \frac{dy}{y} \right\} \\
&= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \left\{ \int_0^1 \left[1 + \frac{\cos(kl(1-y))}{2} + \frac{\cos(kl)}{2} - 2 \cos\left(\frac{kl(1-y)}{2}\right) \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \right] \frac{dy}{y} \right. \\
&\quad \left. + \int_1^2 \left[1 + \frac{\cos(kl(y-1))}{2} + \frac{\cos(kl)}{2} - 2 \cos\left(\frac{kl(y-1)}{2}\right) \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \right] \frac{dy}{y} \right\}
\end{aligned}$$

จาก

$$\begin{aligned}
\cos(kl(1-y)) &= \cos(kl - kly) = \cos(kl) \cos(kly) + \sin(kl) \sin(kly) \\
\cos(kl(y-1)) &= \cos(kly - kl) = \cos(kl) \cos(kly) + \sin(kl) \sin(kly) \\
\cos\left(\frac{kl(1-y)}{2}\right) &= \cos\left(\frac{kl}{2} - \frac{kly}{2}\right) = \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \cos\left(\frac{kly}{2}\right) + \sin\left(\frac{kl}{2}\right) \sin\left(\frac{kly}{2}\right) \\
\cos\left(\frac{kl(y-1)}{2}\right) &= \cos\left(\frac{kly}{2} - \frac{kl}{2}\right) = \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \cos\left(\frac{kly}{2}\right) + \sin\left(\frac{kl}{2}\right) \sin\left(\frac{kly}{2}\right)
\end{aligned}$$

จะได้

$$\begin{aligned}
P_{rad} &= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \left\{ \int_0^1 \left[1 + \frac{\cos(kl)}{2} + \frac{1}{2} (\cos(kl) \cos(kly) + \sin(kl) \sin(kly)) - 2 \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \left(\cos\left(\frac{kl}{2}\right) \cos\left(\frac{kly}{2}\right) + \sin\left(\frac{kl}{2}\right) \sin\left(\frac{kly}{2}\right) \right) \right] \frac{dy}{y} \right. \\
&\quad \left. + \int_1^2 \left[1 + \frac{\cos(kl)}{2} + \frac{1}{2} (\cos(kl) \cos(kly) + \sin(kl) \sin(kly)) - 2 \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \left(\cos\left(\frac{kl}{2}\right) \cos\left(\frac{kly}{2}\right) + \sin\left(\frac{kl}{2}\right) \sin\left(\frac{kly}{2}\right) \right) \right] \frac{dy}{y} \right\} \\
&= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \left\{ \int_0^1 \left[1 + \frac{\cos(kl)}{2} + \frac{1}{2} (\cos(kl) \cos(kly) + \sin(kl) \sin(kly)) - 2 \cos^2\left(\frac{kl}{2}\right) \cos\left(\frac{kly}{2}\right) - 2 \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \sin\left(\frac{kl}{2}\right) \sin\left(\frac{kly}{2}\right) \right] \frac{dy}{y} \right. \\
&\quad \left. + \int_1^2 \left[1 + \frac{\cos(kl)}{2} + \frac{1}{2} (\cos(kl) \cos(kly) + \sin(kl) \sin(kly)) - 2 \cos^2\left(\frac{kl}{2}\right) \cos\left(\frac{kly}{2}\right) - 2 \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \sin\left(\frac{kl}{2}\right) \sin\left(\frac{kly}{2}\right) \right] \frac{dy}{y} \right\} \\
&= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^2 \left[1 + \frac{\cos(kl)}{2} + \frac{1}{2} \cos(kl) \cos(kly) + \frac{1}{2} \sin(kl) \sin(kly) - 2 \cos^2\left(\frac{kl}{2}\right) \cos\left(\frac{kly}{2}\right) - 2 \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \sin\left(\frac{kl}{2}\right) \sin\left(\frac{kly}{2}\right) \right] \frac{dy}{y}
\end{aligned}$$

เมื่อ

$$\cos^2\left(\frac{kl}{2}\right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(kl)$$

$$\sin\left(\frac{kl}{2}\right) \cos\left(\frac{kl}{2}\right) = \frac{1}{2} \sin(kl)$$

ทำการแปลงได้

$$\begin{aligned}
P_{rad} &= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^2 \left[1 + \frac{\cos(kl)}{2} + \frac{1}{2} \cos(kl) \cos(kly) + \frac{1}{2} \sin(kl) \sin(kly) - (1 + \cos(kl)) \cos\left(\frac{kly}{2}\right) - \sin(kl) \sin\left(\frac{kly}{2}\right) \right] \frac{dy}{y} \\
&= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^2 \left[1 + \frac{\cos(kl)}{2} + \frac{1}{2} \cos(kl) \cos(kly) + \frac{1}{2} \sin(kl) \sin(kly) - \cos\left(\frac{kly}{2}\right) - \cos(kl) \cos\left(\frac{kly}{2}\right) - \sin(kl) \sin\left(\frac{kly}{2}\right) \right] \frac{dy}{y}
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^2 \left[1 - \cos\left(\frac{kly}{2}\right) + \frac{1}{2} \sin(kl) \sin(kly) - \sin(kl) \sin\left(\frac{kly}{2}\right) + \frac{\cos(kl)}{2} + \frac{1}{2} \cos(kl) \cos(kly) - \cos(kl) \cos\left(\frac{kly}{2}\right) \right] \frac{dy}{y} \\
&= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^2 \left[1 - \cos\left(\frac{kly}{2}\right) + \frac{1}{2} \sin(kl) (\sin(kly) - 2 \sin\left(\frac{kly}{2}\right)) + \frac{\cos(kl)}{2} (1 + \cos(kly) - 2 \cos\left(\frac{kly}{2}\right)) \right] \frac{dy}{y}
\end{aligned}$$

จาก

$$\frac{kly}{2} = z$$

$$y = \frac{2z}{kl}$$

$$dy = \frac{2}{kl} dz$$

$$\frac{dy}{y} = \frac{2}{kl} dz \frac{kl}{2z} = \frac{dz}{z}$$

หาขอบเขตล่าง $y=0 \rightarrow z=0$

หาขอบเขตบน $y=2 \rightarrow z=kl$

ได้

$$\begin{aligned}
P_{rad} &= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \left\{ \int_0^{kl} (1 - \cos z) \frac{dz}{z} + \frac{1}{2} \sin(kl) \left[\int_0^{kl} (\sin 2z - 2 \sin z) \frac{dz}{z} \right] + \frac{\cos(kl)}{2} \left[\int_0^{kl} (1 + \cos 2z - 2 \cos z) \frac{dz}{z} \right] \right\} \\
&= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \left\{ \int_0^{kl} \frac{1}{z} dz - \int_0^{kl} \frac{\cos z}{z} dz + \frac{1}{2} \sin(kl) \left[\int_0^{kl} \frac{\sin 2z}{2z} d2z - 2 \int_0^{kl} \frac{\sin z}{z} dz \right] + \frac{\cos(kl)}{2} \left[\int_0^{kl} \frac{2(1 - \cos z)}{z} dz - \int_0^{2kl} \frac{(1 - \cos 2z)}{2z} d2z \right] \right\} \\
&= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \left\{ C + \ln(kl) - Ci(kl) + \frac{1}{2} \sin(kl) [Si(2kl) - 2Si(kl)] + \frac{1}{2} \cos(kl) [2Cin(kl) - Cin(2kl)] \right\}
\end{aligned}$$

โดยที่

$$Ci(x) = - \int_x^\infty \frac{\cos y}{y} dy = \int_\infty^x \frac{\cos y}{y} dy$$

$$Si(x) = \int_0^x \frac{\sin y}{y} dy$$

$$Cin(x) = \ln(\gamma x) - Ci(x) = \ln(\gamma) + \ln(x) - Ci(x) = \int_0^x \left(\frac{1 - \cos y}{y} \right) dy$$

จะได้ค่าไครคิตีจาก

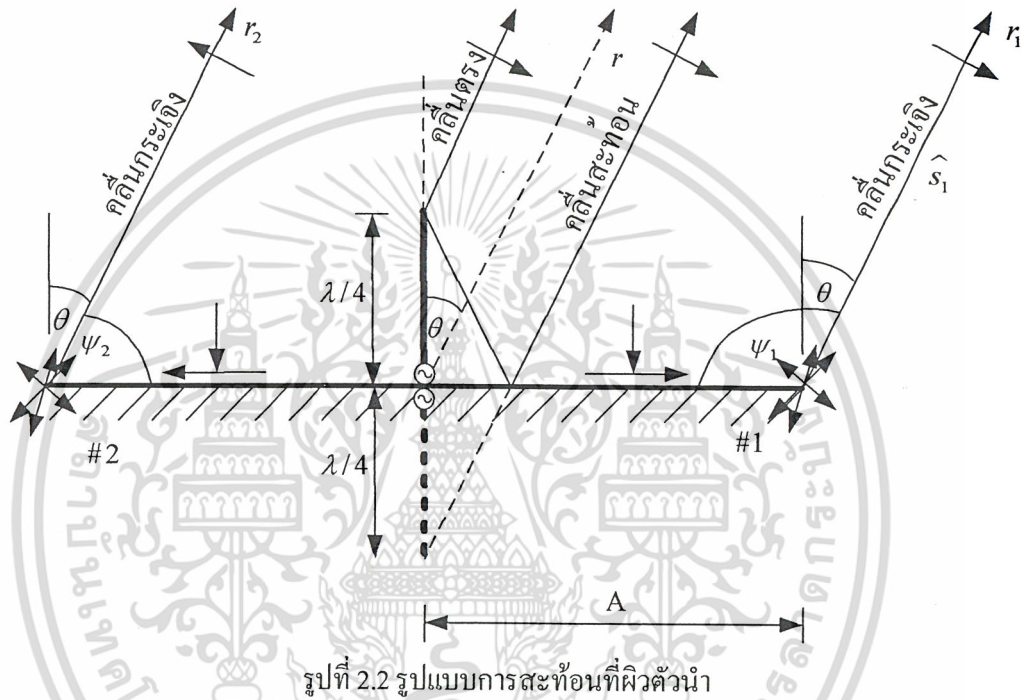
$$D_0 = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \quad (2-1-5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เมื่อแผ่นตัวนำมีความยาวจำกัด จะพบว่าสนามลัพธ์นั้นยังได้รับอิทธิพลมาจากสนามที่กระเจิงมาจากขอบด้วย ซึ่งสนามทั้งหมดนี้มีอิทธิพลในแต่ละบริเวณขึ้นอยู่กับการวางสายอากาศ ในกรณีนี้จะวางสายอากาศติดกับระนาบตัวนำ

สนามทั้งหมดประกอบด้วย

- สนามที่เดินทางเป็นทางตรงมายังผู้สังเกต
- สนามที่สะท้อนมาจากแผ่นตัวนำยาวอนันต์
- สนามที่กระเจิงจากขอบ



หาสนามที่กระเจิงจากขอบได้จาก

$$E^d(\theta) = \mathbf{E}^i(Q) \cdot \bar{\mathbf{D}}A(r, a)e^{-j\beta s}$$

โดยที่	$\mathbf{E}^i(Q)$	คือ สนามที่ขอบ
	$\bar{\mathbf{D}}$	คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิง
	$A(r, a)$	คือ ตัวประกอบการลดทอน
	$e^{-j\beta s}$	คือ ตัวประกอบเฟส

สำหรับสนามที่เป็นการตกกระทบแบบตั้งฉาก $\beta'_0 = 90^\circ$ คลื่นมองว่าเป็นคลื่นทรงกลม ตัวนำเป็นแผ่นวงกลม และพิจารณาว่าผู้สังเกตสังเกตที่สนามระยะไกลแล้วจะได้ว่า

1 คิวประกอบการลดทอน

$$A(\rho_c, s) = \sqrt{\frac{\rho_c}{s(\rho_c + s)}} \stackrel{s \gg \rho_c}{\approx} \frac{\sqrt{\rho_c}}{s}$$

เมื่อ

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{1}{\rho_e} - \frac{\widehat{n}_e \cdot (\widehat{s}'_1 - \widehat{s}_1)}{\rho_g \sin^2 \beta'_0}$$

โดยที่ ρ_e คือรัศมีความโค้งของหน้าคลื่นตกกระทบ (คลื่นทรงกลม $\rho_e = s'$) ρ_g คือรัศมีความโค้งของขอบตรงจุดที่เกิดการกระเจิง

ดังนั้น

$$\frac{1}{\rho_{c1}} = \frac{1}{s'} - \frac{\widehat{n}_1 \cdot \widehat{s}'_1 - \widehat{n}_1 \cdot \widehat{s}_1}{A \sin^2(\pi/2)}$$

สำหรับขอบที่ #1 จะได้

$$\frac{1}{\rho_{c1}} = \frac{1}{A} \frac{\widehat{n}_1 \cdot \widehat{s}'_1 - \widehat{n}_1 \cdot \widehat{s}_1}{A} = \frac{1 - \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)\right]}{A} = \frac{\sin \theta}{A}$$

$$\rho_{c1} = \frac{A}{\sin \theta}$$

สำหรับขอบที่ #2 จะได้

$$\frac{1}{\rho_{c2}} = \frac{1}{A} \frac{\widehat{n}_1 \cdot \widehat{s}'_1 - \widehat{n}_1 \cdot \widehat{s}_1}{A} = \frac{1 - \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)\right]}{A} = \frac{\sin \theta}{A}$$

$$\rho_{c2} = -\frac{A}{\sin \theta}$$

2 คิวประกอบเฟส

ที่ขอบที่ #1

$$e^{-j\beta s} \rightarrow e^{-j\beta s_1} = e^{-j\beta(r - A \sin \theta)}$$

ที่ขอบที่ #2

$$e^{-j\beta s} \rightarrow e^{-j\beta s_2} = e^{-j\beta(r + A \sin \theta)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 สัมประสิทธิ์การกระเจิง

เนื่องจากมุมตกกระทบจากแหล่งกำเนิดไปยังจุดที่ตกกระทบเป็น 0 ดังนั้น

ที่ขอบที่ #1

$$\xi_1^- = \psi_1 - \psi_0 = \psi_1 = \theta + \frac{\pi}{2} = \xi_1$$

$$\xi_1^+ = \psi_1 - \psi_0 = \psi_1 = \theta + \frac{\pi}{2} = \xi_1$$

ที่ขอบที่ #2

$$\xi_2^- = \psi_2 - \psi_0 = \psi_2 = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \theta, 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ \frac{5\pi}{2} - \theta, \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi \end{cases}$$

$$\xi_2^+ = \psi_2 - \psi_0 = \psi_2 = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \theta, 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ \frac{5\pi}{2} - \theta, \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi \end{cases}$$

โดย

ψ_1 คือ มุมที่วัดจากระนาบตัวนำไปยัง \hat{s}_1

ψ_2 คือ มุมที่วัดจากระนาบตัวนำไปยัง \hat{s}_2

ดังนั้น

$$D(L, \xi_1^\pm, \beta'_0, n) = 2D^i(A, \theta + \frac{\pi}{2}, n) = 2D^r(A, \theta + \frac{\pi}{2}, n)$$

$$D^i(L_i, \psi - \psi', n) = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{n\pi\beta \sin \beta'_0}} \left\{ \begin{array}{l} \cot \left[\frac{\pi + (\psi - \psi')}{2n} \right] F[\beta L_i g^+(\psi - \psi')] \\ + \cot \left[\frac{\pi - (\psi - \psi')}{2n} \right] F[\beta L_i g^-(\psi - \psi')] \end{array} \right\}$$

$$D^r(L_i, \psi + \psi', n) = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{n\pi\beta \sin \beta'_0}} \left\{ \begin{array}{l} \cot \left[\frac{\pi + (\psi + \psi')}{2n} \right] F[\beta L_i g^+(\psi + \psi')] \\ + \cot \left[\frac{\pi - (\psi + \psi')}{2n} \right] F[\beta L_i g^-(\psi + \psi')] \end{array} \right\}$$

เมื่อ L คือ พารามิเตอร์ระยะทาง ซึ่งสำหรับคลื่นทรงกลมแล้ว

$$L = s' \sin^2 \beta'_0$$

เมื่อ $\beta'_0 = 90^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$g^\pm(\xi)$ หาค่าได้จาก

$$g^\pm(\xi) = 1 + \cos[\xi - 2n\pi N^\pm] = 1 + \cos \xi$$

$F(x)$ หาค่าได้จาก

$$F(x) = 2j\sqrt{x} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-j\tau^2} d\tau$$

4 สนามที่ขอบ

จาก
$$E_{\theta G}(r, \theta, \phi) = E_0 \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin \theta} \right] \frac{e^{-jkr}}{r}; 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

ดังนั้น ที่ขอบ #1 $E_1^i(Q_1) = \frac{1}{2} E_{\theta G}(r = A, \theta = \frac{\pi}{2})$

ที่ขอบ #2 $E_2^i(Q_2) = -\frac{1}{2} E_{\theta G}(r = A, \theta = \frac{\pi}{2})$

เมื่อทำตามข้อ 1 ถึง 4 ก็จะได้

$$E_1^d(r, \theta, \phi) = E_1^i(Q_1) D(A, \xi_1^\pm, 2) \frac{1}{s_1} \sqrt{\frac{A}{\sin \theta}} e^{-j\beta(r - A \sin \theta)}$$

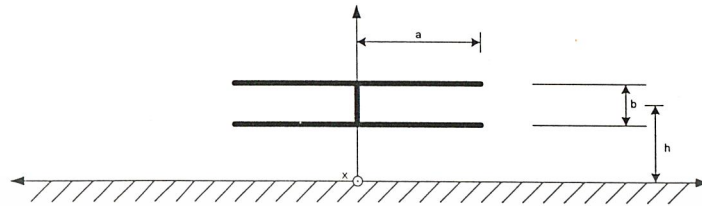
$$E_2^d(r, \theta, \phi) = E_2^i(Q_2) D(A, \xi_1^\pm, 2) \frac{1}{s_2} \sqrt{\frac{A}{\sin \theta}} e^{-j\beta(r + A \sin \theta)}$$

ดังนั้นจะได้สนามรวม

$$E_\theta^t(r, \theta, \phi) = \begin{cases} E_{\theta G}(r, \theta, \phi) + E_1^d(r, \theta, \phi) + E_2^d(r, \theta, \phi), & 0 \leq \theta \leq \pi/2 \\ E_1^d(r, \theta, \phi) + E_2^d(r, \theta, \phi), & \pi/2 \leq \theta \leq \pi \end{cases}$$

2.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี

สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมีที่วางเหนือระนาบตัวนำมีโครงสร้างดังรูป



รูปที่ 2.3 ลักษณะของสายอากาศที่วางเหนือระนาบตัวนำ

โดยวิธีตัดขั้วเวกเตอร์ซึ่งหากระยะระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองใกล้กันมากๆ แล้วจะได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ช่องเปิดของท่อนำคลื่นจะมีค่าคงที่ กำหนดให้มีค่าเป็น

$$\mathbf{M}(\rho', \phi', z') = [M_\rho \cos \phi' - M_\phi \sin \phi'] \hat{a}_x + [M_\rho \sin \phi' + M_\phi \cos \phi'] \hat{a}_y + M_z \hat{a}_z$$

พิจารณาเวกเตอร์แม่เหล็ก

$$\mathbf{M}(x', y', z') = M_x(x', y', z') \hat{a}_x + M_y(x', y', z') \hat{a}_y + M_z(x', y', z') \hat{a}_z$$

เนื่องจากสายอากาศเป็นแผ่นวงกลมจึงจะสะดวกขึ้นหากใช้พิกัดทรงกระบอกที่แหล่งกำเนิด

$$\mathbf{M}(\rho', \phi', z') = [M_\rho \cos \phi' - M_\phi \sin \phi'] \hat{a}_x + [M_\rho \sin \phi' + M_\phi \cos \phi'] \hat{a}_y + M_z \hat{a}_z$$

และเนื่องจากการพิจารณาหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมองในพิกัดทรงกลม ดังนั้น

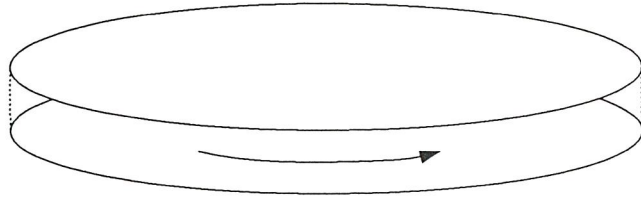
$$\begin{aligned} \mathbf{M} = & [M_\rho \cos \phi' - M_\phi \sin \phi'] [\hat{a}_r \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_\theta \cos \theta \cos \phi - \hat{a}_\phi \sin \phi] \\ & + [M_\rho \sin \phi' + M_\phi \cos \phi'] [\hat{a}_r \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_\theta \cos \theta \sin \phi + \hat{a}_\phi \cos \phi] \\ & + M_z [\hat{a}_r \cos \theta + \hat{a}_\theta \sin \theta] \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} \mathbf{M} = & \hat{a}_r \{ M_\rho [\cos \phi' \sin \theta \cos \phi + \sin \phi' \sin \theta \sin \phi] \\ & + M_\phi [-\sin \phi' \sin \theta \cos \phi + \cos \phi' \sin \theta \sin \phi] + M_z \cos \theta \} \\ & + \hat{a}_\theta \{ M_\rho [\cos \phi' \cos \theta \cos \phi + \cos \phi' \cos \theta \sin \phi] \\ & + M_\phi [-\sin \phi' \cos \theta \cos \phi + \cos \phi' \cos \theta \sin \phi] - M_z \sin \theta \} \\ & + \hat{a}_\phi \{ M_\rho [-\cos \phi' \sin \phi + \sin \phi' \cos \phi] \\ & + M_\phi [\sin \phi' \sin \phi + \cos \phi' \cos \phi] \} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างจะพบว่า จะอยู่ที่ผิวของช่องเปิดเท่านั้น



รูปที่ 2.4 ทิศทางของ M

ซึ่งก็คือ M มีเพียงทิศทางเดียวคือ ϕ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mathbf{M} = \hat{a}_r M_\phi \sin\theta \sin(\phi - \phi') + \hat{a}_\theta M_\phi \cos\theta \sin(\phi - \phi') + \hat{a}_\phi M_\phi \cos(\phi - \phi')$$

จาก

$$\mathbf{M}_s = -\hat{a}_n \times \mathbf{E}$$

$$\mathbf{M}_s = -\hat{a}_\rho \times \left(\frac{V}{b} \hat{a}_z \right)$$

$$= \frac{V}{b} \hat{a}_\phi$$

$$M_\rho = \frac{V}{b}$$

เพื่อความสะดวกในการพิจารณา จะพิจารณาที่มุม $\phi = 0$ หรือระนาบ $y = 0$ ดังนั้น

$$\mathbf{M} = -\frac{V}{b} \sin\theta \sin\phi' \hat{a}_r - \frac{V}{b} \cos\theta \sin\phi' \hat{a}_\theta + \frac{V}{b} \cos\phi' \hat{a}_\phi$$

นำไปหาฟังก์ชันช่วย F

จาก

$$\mathbf{F} = \frac{\epsilon}{4\pi} \int_s \frac{\mathbf{M} e^{-jkR}}{R} ds'$$

และ

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \mathbf{F}$$

เมื่อผู้สังเกตอยู่ที่ระยะไกลจะได้ว่า

ด้าน $+x$ สำหรับเฟส $R_+ \approx r - A \sin\theta \cos\phi'$

สำหรับขนาด $R_+ \approx r$

ด้าน $-x$ สำหรับเฟส $R_- \approx r + A \sin \theta \cos \phi'$
 สำหรับขนาด $R_- \approx r$

แทนค่าจะได้ว่า

$$\text{ด้าน } +x \quad F_{\phi+} = \frac{\varepsilon}{4\pi r} \int_0^b \int_0^{2\pi} \frac{V}{b} \cos \phi' e^{-jk(r-A \sin \theta \cos \phi')} a d\phi' dz'$$

$$\text{ด้าน } -x \quad F_{\phi-} = -\frac{\varepsilon}{4\pi r} \int_0^b \int_0^{2\pi} \frac{V}{b} \cos \phi' e^{-jk(r+A \sin \theta \cos \phi')} a d\phi' dz'$$

นั่นคือ

$$\begin{aligned} F_\phi &= F_{\phi-} + F_{\phi+} \\ &= \frac{\varepsilon V a e^{-jkr}}{4\pi b r} \left(\int_0^b \int_0^{2\pi} \cos \phi' e^{jkA \sin \theta \cos \phi'} d\phi' dz' - \int_0^b \int_0^{2\pi} \cos \phi' e^{-jkA \sin \theta \cos \phi'} d\phi' dz' \right) \\ &= \frac{\varepsilon V a e^{-jkr}}{4\pi b r} \int_0^b \int_0^{2\pi} \cos \phi' \left(e^{jkA \sin \theta \cos \phi'} - e^{-jkA \sin \theta \cos \phi'} \right) d\phi' dz' \\ &= \frac{\varepsilon V a e^{-jkr}}{4\pi r} \int_0^{2\pi} \cos \phi' \left(e^{jkA \sin \theta \cos \phi'} - e^{-jkA \sin \theta \cos \phi'} \right) d\phi' \end{aligned}$$

เมื่อจัดรูปจะได้ว่า

$$F_\phi = \frac{\varepsilon V a e^{-jkr}}{4\pi r} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j(kA \cos \phi' + \phi')} d\phi'$$

ซึ่งอาศัยคุณสมบัติของเบสเซลจะได้ว่า

$$F_\phi = \frac{j\varepsilon V a e^{-jkr} J_1(ka \sin \theta)}{2r}$$

ส่วน F_r และ F_θ เมื่ออินทิเกรตจะได้ผลลัพธ์เป็นศูนย์
 จากนั้นนำไปหาค่าสนามไฟฟ้าจาก

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \mathbf{F}$$

จะพบว่า \mathbf{F} มีเพียงองค์ประกอบเดียว ดังนั้น

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{\varepsilon} \left\{ \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial (F_\phi \sin \theta)}{\partial \theta} \hat{a}_r - \frac{1}{r} \frac{\partial (r F_\phi)}{\partial \theta} \hat{a}_\theta \right\}$$

ซึ่งจะหาค่าสนามได้เป็น

$$E_\theta(r, \theta, \phi) = \frac{kV_0 a e^{-jkr} J_1(ka \sin \theta)}{2r}$$

$$H_\phi(r, \theta, \phi) = \frac{kV_0 a e^{-jkr} J_1(ka \sin \theta)}{2r\eta}$$

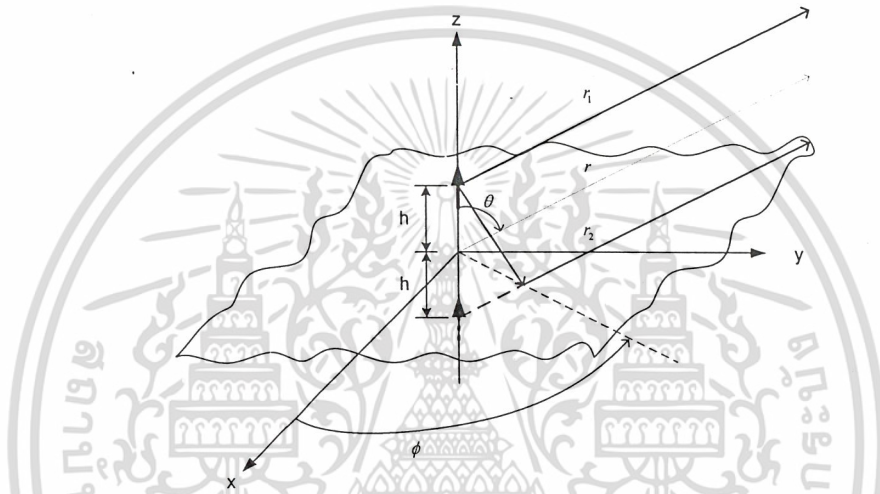
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมีที่วางบนแผ่นระนาบตัวนำยาวอนันต์นั้นสามารถใช้ทฤษฎีเงา มาอธิบายได้ว่า มีแหล่งกำเนิดเสมือนกำเนิดขึ้นอยู่ลึกลงไปใต้แผ่นตัวสะท้อนในแนวเดียวกันที่ระยะเท่ากับ ความสูงของแหล่งกำเนิดจริง ส่วนทิศทางนั้นในกรณีนี้จะมีทิศทางเดียวกันดังนั้นจะได้ว่า

สนามลัพธ์เกิดจากผลรวมของสนามจาก

- สนามที่เดินทางเป็นทางตรงมายังผู้สังเกต
- สนามที่สะท้อนมาจากแผ่นตัวนำยาวอนันต์

นั่นคือ



รูปที่ 2.5 แหล่งกำเนิดเสมือนที่เกิดขึ้นในตัวนำ

เพราะฉะนั้น

$$E'_\theta(r, \theta, \phi) = E'_\theta(r, \theta, \phi) + E'_\theta(r, \theta, \phi)$$

โดยที่

$E'_\theta(r, \theta, \phi)$ คือ สนามที่เดินทางเป็นทางตรงมายังผู้สังเกต

$E'_\theta(r, \theta, \phi)$ คือ สนามที่สะท้อนมาจากแผ่นตัวนำยาวอนันต์

แทนค่าสมการสนามจากวิธีตัดกัณฑ์เวกเตอร์จะได้ว่า

$$E'_\theta(r, \theta, \phi) = \frac{kV_0ae^{-jk_1r_1}J_1(ka \sin \theta_1)}{2r_1}$$

$$E'_\theta(r, \theta, \phi) = \frac{kV_0ae^{-jk_2r_2}J_1(ka \sin \theta_2)}{2r_2}$$

เมื่อพิจารณาที่ระยะไกลจะได้ว่า

สำหรับเฟสแล้ว

$$r_1 \approx r - h \cos \theta$$

$$r_2 \approx r + h \cos \theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไขเอกสารต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนสำหรับขนาด

$$r_1 \approx r_2 \approx r$$

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

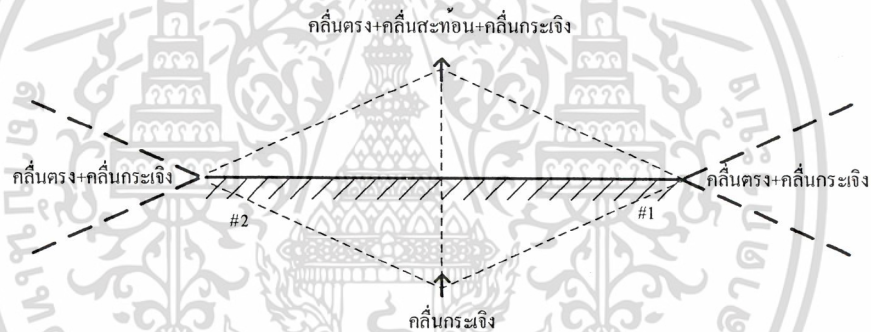
แทนค่าลงในสมการจะได้ว่า

$$E_o^i(r, \theta, \phi) = \frac{kV_0 a J_1(ka \sin \theta) e^{-jk(r-h \cos \theta)}}{2r}$$

ในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

$$E_o^r(r, \theta, \phi) = \frac{kV_0 a J_1(ka \sin \theta) e^{-jk(r+h \cos \theta)}}{2r}$$

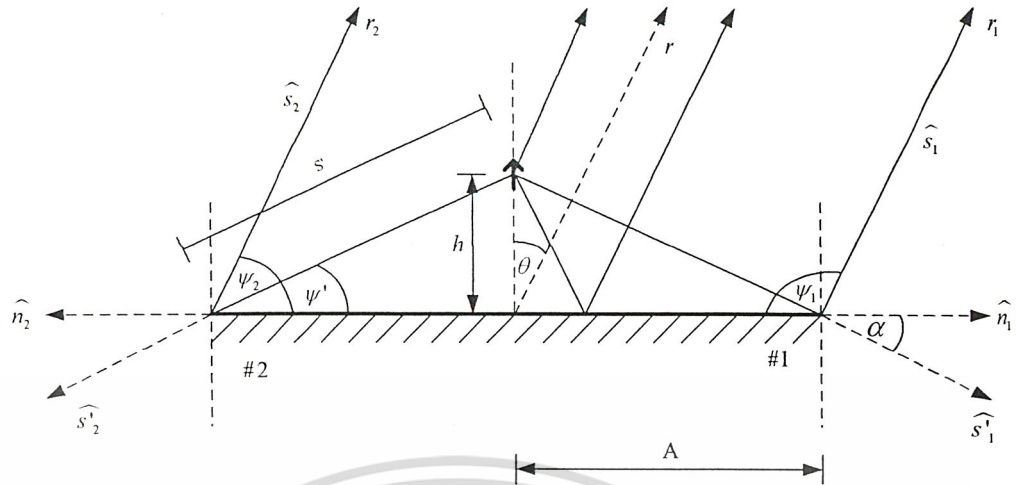
แต่เมื่อแผ่นตัวนำมีความยาวจำกัด จะพบว่าสนามลัพธ์นั้นยังได้รับอิทธิพลมาจากสนามที่กระเจิงมาจากขอบด้วย ซึ่งสนามทั้งหมดนี้มีอิทธิพลในแต่ละบริเวณขึ้นอยู่กับการวางสายอากาศ ในกรณีนี้จะวางสายอากาศเหนือระนาบตัวนำซึ่งจะแบ่งได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่



รูปที่ 2.6 การแบ่งบริเวณของการแพร่กระจายคลื่น

ดังนั้นสนามทั้งหมดจึงประกอบด้วย

- สนามที่เดินทางเป็นทางตรงมายังผู้สังเกต
- สนามที่สะท้อนมาจากแผ่นตัวนำวอนันต์
- สนามที่กระเจิงจากขอบ



รูปที่ 2.7 รูปแบบการสะท้อนที่ผิวค้ำน้ำ

กรรมวิธีการกระเจิงอธิบายได้ดังรูป โดยที่การหาสนามที่กระเจิงจากขอบนั้นมีความสัมพันธ์กับขนาดของสนามที่ตกกระทบตรงขอบ ถ้าประสิทธิภาพสะท้อนจากขอบ และเฟสที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะได้ว่า

$$\mathbf{E}^d(s) = \mathbf{E}^i(Q_D) \cdot \overline{\mathbf{D}}A(\rho_c, s) e^{-j\beta s}$$

โดยที่ $\mathbf{E}^i(Q_D)$ คือ สนามที่ขอบ
 $\overline{\mathbf{D}}$ คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิง
 $A(\rho_c, s)$ คือ ตัวประกอบการลดทอน
 $e^{-j\beta s}$ คือ ตัวประกอบเฟส

สำหรับสนามที่เป็นการตกกระทบแบบตั้งฉาก ($\beta'_0 = 90^\circ$) คลื่นมองว่าเป็นคลื่นทรงกลม ตัวนำเป็นแผ่นวงกลม และพิจารณาว่าผู้สังเกตสังเกตที่สนามระยะไกลแล้วจะได้ว่า

1 ตัวประกอบการลดทอน

สำหรับคลื่นทรงกลม และผู้สังเกตสังเกตที่สนามระยะไกลแล้วจะได้ว่า

$$A(\rho_c, s) = \sqrt{\frac{\rho_c}{s(\rho_c + s)}} \stackrel{s \gg \rho_c}{\approx} \frac{\sqrt{\rho_c}}{s}$$

เมื่อ

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{1}{\rho_e} - \frac{\hat{n}_e \cdot (\hat{s}'_1 - \hat{s}_1)}{\rho_g \sin^2 \beta'_0}$$

โดยที่ ρ_e คือรัศมีความโค้งของหน้าคลื่นตกกระทบ (คลื่นทรงกลม $\rho_e = s'$)
 ρ_g คือรัศมีความโค้งของขอบตรงจุดที่เกิดการกระเจิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\frac{1}{\rho_{c1}} = \frac{1}{s'} - \frac{\widehat{n}_1 \cdot \widehat{s}'_1 - \widehat{n}_1 \cdot \widehat{s}_1}{A \sin^2(\pi/2)}$$

สำหรับขอบที่ #1 จะได้

$$\frac{1}{\rho_{c1}} = \frac{1}{s'} - \frac{[\cos \psi' - \cos(\pi/2 - \theta)]}{A}$$

$$\rho_{c1} = \left[\frac{1}{s'} - \frac{(\cos \psi' - \sin \theta)}{A} \right]^{-1}$$

สำหรับขอบที่ #2 จะได้

$$\frac{1}{\rho_{c1}} = \frac{1}{s'} - \frac{[\cos \psi' - \cos(\pi/2 + \theta)]}{A}$$

$$\rho_{c1} = \left[\frac{1}{s'} - \frac{(\cos \psi' + \sin \theta)}{A} \right]^{-1}$$

จากรูปจะพบว่า $\cos \psi' = A/s'$

$$\therefore \rho_{c1} = \left[\frac{1}{s'} - \frac{1}{A} \left(\frac{A}{s'} - \sin \theta \right) \right]^{-1} = \frac{A}{\sin \theta}$$

$$\text{และ} \quad \rho_{c1} = \left[\frac{1}{s'} - \frac{1}{A} \left(\frac{A}{s'} + \sin \theta \right) \right]^{-1} = \frac{-A}{\sin \theta}$$

ดังนั้น

$$A_1(s_1, \theta) = \frac{1}{s_1} \sqrt{\frac{A}{\sin \theta}}$$

$$A_2(s_2, \theta) = \frac{1}{s_2} \sqrt{\frac{-A}{\sin \theta}}$$

2 ตัวประกอบเฟส

ที่ขอบที่ #1

$$e^{-j\beta s} \rightarrow e^{-j\beta s_1} = e^{-j\beta(r - A \sin \psi')}$$

ที่ขอบที่ #2

$$e^{-j\beta s} \rightarrow e^{-j\beta s_2} = e^{-j\beta(r + A \sin \psi')}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 สัมประสิทธิ์การกระเจิง

จากทฤษฎีเงาจะได้ว่าสนามที่สะท้อนจากผิวค้ำนำจะมีทิศทางเดียวกันซึ่งก็คือ

$$D(\rho, \psi, \psi', n) = D^i(\rho, \psi - \psi', n) + D^r(\rho, \psi + \psi', n)$$

โดยที่

$$D^i(L_i, \psi - \psi', n) = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{n\pi\beta \sin \beta'_0}} \left\{ \begin{array}{l} \cot \left[\frac{\pi + (\psi - \psi')}{2n} \right] F[\beta L_i g^+(\psi - \psi')] \\ + \cot \left[\frac{\pi - (\psi - \psi')}{2n} \right] F[\beta L_i g^-(\psi - \psi')] \end{array} \right\}$$

$$D^r(L_i, \psi + \psi', n) = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{n\pi\beta \sin \beta'_0}} \left\{ \begin{array}{l} \cot \left[\frac{\pi + (\psi + \psi')}{2n} \right] F[\beta L_i g^+(\psi + \psi')] \\ + \cot \left[\frac{\pi - (\psi + \psi')}{2n} \right] F[\beta L_i g^-(\psi + \psi')] \end{array} \right\}$$

เมื่อ L คือ พารามิเตอร์ระยะทาง ซึ่งกำหนดไว้ที่ขอบเขตแล้ว

$$L = \frac{ss' \sin^2 \beta'_0}{s + s'}$$

แทนค่า $s = s'$ และ $\beta'_0 = 90^\circ$ จะได้

$$L = s'$$

$g^\pm(\xi)$ หาค่าได้จาก

$$g^\pm(\xi) = 1 + \cos[\xi - 2n\pi N^\pm] = 1 + \cos \xi$$

$F(x)$ หาค่าได้จาก

$$F(x) = 2j \sqrt{x} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-j\tau^2} d\tau$$

ψ_1 คือ มุมที่วัดจากระนาบค้ำนำไปยัง \hat{s}_1

$$\psi_1 = \frac{\pi}{2} + \theta$$

ψ_2 คือ มุมที่วัดจากระนาบค้ำนำไปยัง \hat{s}_2

$$\psi_2 = \begin{cases} \frac{\pi}{2} + \theta, & 0 \leq \theta \leq \pi/2 \\ \frac{5\pi}{2} + \theta, & \pi/2 < \theta \leq \pi \end{cases}$$

ดังนั้น

$$\text{ที่ขอบที่ \#1 } D = D(s', \psi_1 - \psi', 2)$$

$$\text{ที่ขอบที่ \#2 } D = D(s', \psi_2 - \psi', 2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 สนามที่ขอบ

$$\text{จาก} \quad E_{\theta}^i(r, \theta, \phi) = \frac{kV_0 a J_1(ka \sin \theta) e^{-jk(r-h \cos \theta)}}{2r}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{ที่ขอบ \#1} \quad E_1^i(Q_D) = E_{\theta}^d(s', \frac{\pi}{2} + \alpha, 0)$$

$$\text{ที่ขอบ \#2} \quad E_2^i(Q_D) = -E_{\theta}^d(s', \frac{\pi}{2} + \alpha, \pi)$$

เมื่อทำตามข้อ 1 ถึง 4 ก็จะได้

$$E_1^d(r, \theta, \phi) = E_1^d(s', \frac{\pi}{2} + \alpha, 0) D(s', \psi_1 - \psi', 2) \frac{1}{s_1} \sqrt{\frac{A}{\sin \theta}} e^{-j\beta(r - A \sin \psi')}$$

$$E_2^d(r, \theta, \phi) = E_2^d(s', \frac{\pi}{2} + \alpha, \pi) D(s', \psi_2 - \psi', 2) \frac{1}{s_2} \sqrt{\frac{-A}{\sin \theta}} e^{-j\beta(r + A \sin \psi')}$$

$$\therefore E^d(r, \theta, \phi) = E_1^d(r, \theta, \phi) + E_2^d(r, \theta, \phi)$$

ซึ่งจะได้ว่าสนามลัพธ์จะเป็น

$$E_{\theta}^i(r, \theta, \phi) = \begin{cases} E^i(r, \theta, \phi) + E^r(r, \theta, \phi) + E^d(r, \theta, \phi), & 0 \leq \theta \leq \pi/2 - \alpha \\ E^i(r, \theta, \phi) + E^d(r, \theta, \phi), & \pi/2 - \alpha < \theta \leq \pi/2 + \alpha \\ E^d(r, \theta, \phi), & \pi/2 + \alpha < \theta \leq \pi/2 \end{cases} \quad (2-2-1)$$

ซึ่งจากสมการสนามไฟฟ้าลัพธ์นี้จะนำไปหาพอยท์ติงเวกเตอร์ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง และค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ได้ต่อไป

โดยสมการค่าพอยท์ติงเวกเตอร์

$$\mathbf{S} = (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) / 2 \quad (2-2-2)$$

แทนค่าจะได้ว่า

$$\mathbf{S} = \frac{E_{\theta}^i (H_{\phi}^i)^*}{2} \hat{a}_r \quad (2-2-3)$$

พิจารณาค่า สภาพเจาะจงทิศทาง

$$D = \frac{4\pi}{\int_s P_n(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2-2-4)$$

โดยที่

$$P_n(\theta, \phi) = \frac{S(\theta, \phi)}{S(\theta, \phi)_{\max}}$$

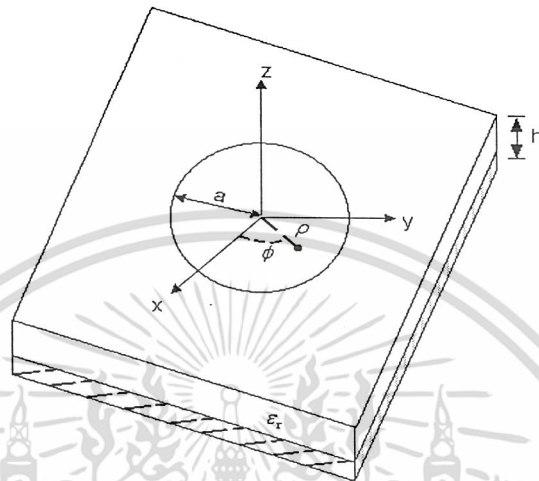
ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

$$HPBW = \left| \theta_{\text{upper}} \Big|_{P_n = -3\text{dB}} - \theta_{\text{lower}} \Big|_{P_n = -3\text{dB}} \right| \quad (2-2-5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม (Circular Microstrip Antenna)

2.3.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม



รูปที่ 2.8 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศแบบไมโครสตริปแบบวงกลม

โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วยส่วนประกอบ 4 ส่วนด้วยกันคือ

1. แผ่นตัวนำ (Patch)

เป็นแผ่นโลหะที่บางมาก โดยปกติแล้วความหนาจะมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นที่อยู่ในอากาศมาก (ความยาวคลื่นของความถี่ที่ออกแบบ) ซึ่งการออกแบบรูปร่างและขนาดของแผ่นตัวนำ จะทำให้ได้รูปแบบการกระจายคลื่นที่ต้องการ และรูปร่างของแผ่นตัวนำก็มีด้วยกันหลายอย่าง เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส, สามเหลี่ยม, วงกลม, วงรี หรือเป็นรูปวงแหวน

สำหรับแผ่นตัวนำแบบ สี่เหลี่ยมผืนผ้า, สี่เหลี่ยมจัตุรัส และวงกลม จะเป็นรูปแบบที่พบได้บ่อยเพราะสามารถสร้างและคำนวณได้ง่ายกว่ารูปร่างแบบอื่น

2. สารตัวกลาง

มีลักษณะเป็นไดอิเล็กทริก จะใช้สารที่มีค่า เพอร์มิททิวิตีอยู่ระหว่าง 2.2 ถึง 12 ซึ่งสารที่มีความหนา มากกว่าจะมีค่าเพอร์มิททิวิตีต่ำกว่า, ให้ช่วงความถี่การใช้งานมากกว่า และให้ประสิทธิภาพมากกว่า แต่จะทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนสารที่มีค่าเพอร์มิททิวิตีมาก จะมีขนาดเล็ก แต่จะมีความสูญเสียมากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพด้อยกว่า และให้ช่วงความถี่ใช้งานน้อยกว่า แต่จะเหมาะกับอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับคลื่นความถี่ ไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กราวด์เพลน (Ground Plane)

กราวด์เพลนจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำมากๆ โดยจะติดอยู่อีกด้านหนึ่งของสารตัวกลาง (คนละด้านกับแผ่นตัวนำ) และทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น

4. ส่วนป้อนสัญญาณ (Feed line)

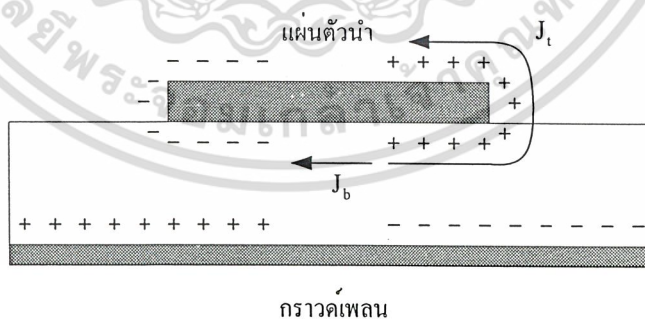
จะทำหน้าที่เป็นตัวป้อนสัญญาณให้กับไมโครสตริป ซึ่งส่วนนี้มีความสำคัญมาก เพราะมันมีผลต่อการโพลาไรเซชัน(Polarization)ของสายอากาศ และการทำแมทซิ่ง(Matching)

2.3.2 แบบจำลองควาวิตี (Cavity Model)

ในแบบจำลองชนิดนี้จะมองสายอากาศแบบไมโครสตริปให้มีลักษณะเหมือนโพรงที่มีสารไดอิเล็กทริกอยู่ภายใน ซึ่งการมองในลักษณะนี้จะทำให้เกิดความถี่พ้องอันดับสูงขึ้นได้ (High Order Resonance) แต่เพื่อให้สามารถเข้าใจสนามพลังงาน (สนามแม่เหล็ก และ สนามไฟฟ้า) ภายในสารไดอิเล็กทริก จึงคิดเสมือนว่าโพรงไดอิเล็กทริกนี้ถูกปิดล้อมด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้า (ด้านบน และ ด้านล่าง) และ กำแพงสนามแม่เหล็ก (คิดเสมือนว่าเปิดวงจรอยู่) ที่อยู่ตามขอบของแผ่นตัวนำ แต่แบบจำลองลักษณะนี้จะทำให้ไม่มี อินพุทอิมพีแดนซ์ ในรูปของส่วนจินตภาพ ซึ่งส่งผลให้ไม่มีการส่งคลื่นออกไป อย่างไรก็ตาม การสมมติให้มีแบบจำลองอย่างนี้ทำให้สามารถคำนวณ รูปแบบการแผ่กระจายคลื่น, อินพุทอิมพีแดนซ์ และ ความถี่ตอบสนองได้ใกล้เคียงกับค่าที่เกิดจากการวัด ซึ่งแบบจำลองชนิดนี้มีลักษณะคล้ายกับวิธีเพอร์เทอร์เบชัน (Perturbation Method) ที่เป็นที่นิยมกันในการคำนวณ ท่อเวฟไกด์ (Waveguide)

สำหรับการสร้างสนามพลังงานภายในโพรงไดอิเล็กทริกและการแผ่กระจายคลื่นผ่านกำแพงสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้น ได้ดังนี้

เมื่อป้อนพลังงานเข้าไปยังแผ่นตัวนำไมโครสตริป จะเกิดการกระจายของประจุบนผิวด้านบน และ ด้านล่างของแผ่นตัวนำ รวมไปถึงเกิดการกระจายของประจุบนกราวด์เพลนด้วย ดังรูปที่ 2.9



กราวด์เพลน

รูปที่ 2.9 การกระจายของประจุแผ่นตัวนำด้านบน

ซึ่งการกระจายของประจุเหล่านี้เกิดจากกระบวนการสองชนิดคือ

1. จากแรงดึงดูดระหว่างประจุต่างชนิดกันของประจุบนผิวด้านล่างของแผ่นตัวนำ กับประจุบนแผ่นระนาบตัวนำ ซึ่งจะทำให้เกิดมีจำนวนประจุหนาแน่นขึ้นที่บริเวณแผ่นตัวนำด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เกิดจากแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกัน ของประจุบนพื้นผิวด้านล่างแผ่นตัวนำ ซึ่งจากแรงผลัคนี้จะทำให้ที่บริเวณของของแผ่นตัวนำมีประจุบางส่วนขึ้นไปอยู่ที่พื้นผิวด้านบนของแผ่นตัวนำ

กระบวนการทั้งสองชนิดนี้ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส J_b และ J_t (บ่อยมาจาก bottom และ t บ่อยมาจาก top) ดังรูปที่ 2.9

สำหรับสายอากาศที่ทำจากวัสดุบางๆ แรงผลัคนั้นแรกจะมีมากกว่าชนิดหลัง ทำให้ประจุส่วนใหญ่ไปอยู่ที่ผิวด้านล่างของแผ่นตัวนำ เป็นผลให้กระแสส่วนใหญ่ไหลอยู่ที่ผิวใต้แผ่นตัวนำ จะมีกระแสปริมาณเล็กน้อยเท่านั้นที่ไหลรอบๆ ขอบด้านบนของแผ่นตัวนำ และปริมาณของกระแสที่ว่านี้จะมีค่าลดลงถ้าวัสดุมีขนาดบางลงด้วย สำหรับในทางอุดมคติแล้ว กระแสที่ไหลอยู่ด้านบนของแผ่นตัวนำจะมีค่าเป็นศูนย์ เป็นผลให้สนามแม่เหล็ก (ที่เกิดจากกระแสอันนี้) ที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ด้วย จึงสามารถสมมติได้ว่ามีพื้นผิวที่เป็นตัวนำแม่เหล็กในอุดมคติคืออยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำ จะมีสนามแม่เหล็กเหลืออยู่เล็กน้อยเสมอ ดังนั้น ข้อสมมตินี้อาจไม่ถูกต้องนัก แต่การสมมติอย่างนี้จะทำให้่ง่ายต่อการหา โหมดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (โหมด) ที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำ

ผลจากการให้สายอากาศแบบไมโครสตริปมีขนาดบางมาก (น้อยกว่าความยาวคลื่นมากๆ)

1. พลังงานที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำและอยู่ภายในสาร ไดอิเล็กทริกจะเกิดการสะท้อนกลับขึ้นที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำ และมีแค่ส่วนน้อยเท่านั้นที่หลุดออกไปเป็นพลังงานแผ่กระจายคลื่น ดังนั้น สายอากาศแบบไมโครสตริปจึงมีประสิทธิภาพที่ไม่สูงนัก

2. พลังงานที่อยู่ใต้แผ่นตัวนำจะทำให้เกิดคลื่นนิ่ง ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์

3. การเปลี่ยนแปลงของสนามตามความสูงของสาร ไดอิเล็กทริกจะเป็นค่าคงที่

4. ปรากฏการณ์ฟรินกิงที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำจะมีค่าน้อยมาก

ดังนั้นจึงมีแต่สนาม TM เท่านั้นที่อยู่ในโพรงไดอิเล็กทริก

นอกจากนี้ยังต้องสมมติให้สิ่งที่ปิดล้อมทุกด้านของโพรงไดอิเล็กทริก (แผ่นตัวนำ และ กำแพงสนามแม่เหล็ก) ไม่มีการสูญเสียพลังงาน, โพรงไดอิเล็กทริกไม่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้ และ อิมพีแดนซ์มีแต่ส่วนจริงเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าอิมพีแดนซ์จะต้องมีส่วนจินตภาพด้วยเสมอ เช่น เกิดจากความต้านทานการแผ่กระจายคลื่น (R_r), ความต้านทานการสูญเสีย (R_L) และการสูญเสียเนื่องจากสารไดอิเล็กทริก ซึ่งความสูญเสียทั้งหมดนี้จะอยู่ในรูป δ_{eff} และสำหรับสายอากาศแล้วจะได้ว่า $\frac{1}{Q} = \delta_{eff}$

ค่าสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายเมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกลเมื่อกราวด์เพลนเป็นอนันต์จะได้

$$E_\theta(\theta, \phi) = j^n \frac{V a_e k_0}{2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos n\phi [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)] \quad (2-3-1)$$

$$E_\phi(\theta, \phi) = j^n \frac{V a k_0}{2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos \theta \sin n\phi [J_{n+1}(k_0 a \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a \sin \theta)] \quad (2-3-2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $J_n(ka)$ คือ เบสเซลฟังก์ชัน อันดับที่ n

$$k = \frac{x'_{nm}}{a}$$

x'_{nm} เป็นค่ารากของอนุพันธ์เบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ n

$$V = hE_0 J_n(ka)$$

h คือ ความหนาของสารตัวกลางไดอิเล็กทริก

a คือ รัศมี

แต่เนื่องจากปรากฏการณ์ฟริงกิง(Fringing Effects) ทำให้แผ่นตัวนำ(patch) มีขนาดทางไฟฟ้าดูมากกว่าขนาดจริง จึงต้องใช้แฟคเตอร์ช่วยแก้ไข เราจะใช้ effective radius: a_e แทนรัศมีจริง a โดย a_e หาได้จาก

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{\pi a}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (2-3-3)$$

ดังนั้น องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าเขียนใหม่ได้

$$E_\theta(\theta, \phi) = j^n \frac{V a_e k_0}{2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos n\phi \left[J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta) \right] \quad (2-3-4)$$

$$E_\phi(\theta, \phi) = j^n \frac{V a_e k_0}{2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos \theta \sin n\phi \left[J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta) \right] \quad (2-3-5)$$

การหาสมการความเข้มการแผ่กระจายคลื่นจาก

$$U(\theta, \phi) = \frac{1}{2\eta} |\vec{E}(\theta, \phi)|^2$$

$$U(\theta, \phi) = \frac{1}{2\eta} \left[|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2 \right]$$

$$U(\theta, \phi) = \left(\frac{j^n V a_e k_0}{960\pi} \right)^2 \left\{ \begin{aligned} & \cos^2 n\phi \left[J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta) \right]^2 \\ & + \cos^2 \theta \sin^2 n\phi \left[J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta) \right]^2 \end{aligned} \right\} \quad (2-3-6)$$

สมการกำลังงานการแผ่กระจายคลื่นหาจาก

$$P_{rad} = \frac{1}{2} \left\{ \text{Re} \iint_s (\vec{E} \times \vec{H}^*) ds \right\}$$

$$P_{rad} = \frac{1}{2} \left\{ \text{Re} \iint_s (E_\theta H_\phi^* - E_\phi H_\theta^*) ds \right\}$$

$$P_{rad} = \frac{1}{2} \frac{1}{\eta} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2 \right] r^2 \sin \theta d\theta d\phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{rad} = \frac{(j^n V a_c k_0)^2}{960} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \begin{aligned} & [J_{n+1}(k_0 a_c \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_c \sin \theta)]^2 \\ & + \cos^2 \theta [J_{n+1}(k_0 a_c \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_c \sin \theta)]^2 \end{aligned} \right\} \sin \theta d\theta \quad (2-3-7)$$

สภาพเจาะจงทิศทางจะหาได้จาก

$$D = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2-3-8)$$

จากสมการกำลังงานการแพร่กระจายคลื่นจะหาแอดมิตแทนซ์เนื่องจากความสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นได้ว่า

$$G_{rad} = \frac{2P_{rad}}{|V|^2}$$

ดังนั้น เมื่อแทนค่า P_{rad} จะได้

$$G_{rad} = \frac{(a_c k_0)^2}{480} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \begin{aligned} & [J_{n+1}(k_0 a_c \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_c \sin \theta)]^2 \\ & + \cos^2 \theta [J_{n+1}(k_0 a_c \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_c \sin \theta)]^2 \end{aligned} \right\} \sin \theta d\theta \quad (2-3-9)$$

สมการแอดมิตแทนซ์เนื่องจากความสูญเสียในผิวตัวนำ

$$G_c = \frac{\pi (\pi \mu_0 f)^{-3/2}}{4h^2 \sqrt{\sigma}} \left[(ka_e)^2 - n^2 \right] \quad (2-3-10)$$

สมการแอดมิตแทนซ์เนื่องจากความสูญเสียในสารไดอิเล็กทริก

$$G_d = \frac{\tan \delta}{4\mu_0 h f} \left[(ka_e)^2 - n^2 \right] \quad (2-3-11)$$

ดังนั้น สมการแอดมิตแทนซ์รวมจะได้ว่า

$$G_t = G_{rad} + G_c + G_d \quad (2-3-12)$$

การหา ควอลิตี้แฟคเตอร์ (Quality factor)

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \quad (2-3-13)$$

โดย Q_{rad} เป็นควอลิตี้แฟคเตอร์เนื่องจากความสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่น

Q_c เป็นควอลิตี้แฟคเตอร์เนื่องจากความสูญเสียในผิวตัวนำ

Q_d เป็นควอลิตี้แฟคเตอร์เนื่องจากความสูญเสียในสารไดอิเล็กทริก

ซึ่งควอลิตี้แฟคเตอร์เนื่องจากความสูญเสียในผิวตัวนำหาได้จาก

$$Q_c = h\sqrt{f\mu\sigma}$$

ซึ่งควอลิตี้แฟคเตอร์เนื่องจากความสูญเสียในสารไดอิเล็กทริกหาได้จาก

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งควอลิตี้แฟคเตอร์เนื่องจากความสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นหาได้จาก

$$Q_{rad} = \frac{240 \left\{ (ka_e)^2 - (n)^2 \right\}}{h\mu f (ka_e)^2 \left\{ \int_0^\pi \left[J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta) \right]^2 + \cos^2 \theta \left[J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) + J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta) \right]^2 \right\} \sin \theta d\theta}$$

การหาอินพุทอิมพีแดนซ์(input impedance)จากวงจรเทียบเคียงของสายอากาศไมโครสตริปที่มี RLC ขนานกันจะได้

$$L = \frac{R}{2\pi f Q_i}$$

$$C = \frac{Q_i}{2\pi R f}$$

$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} \quad (2-3-14)$$

เมื่อแทนค่า L และ C จะได้

$$Z_{in} = R = R_{in}$$

ดังนั้น สมการความต้านทาน(input resistance)จะได้ว่า

$$R_{in} = \frac{1}{G_i} \frac{J_n^2(k\rho)}{J_n^2(ka_e)} \quad (2-3-15)$$

เมื่อ

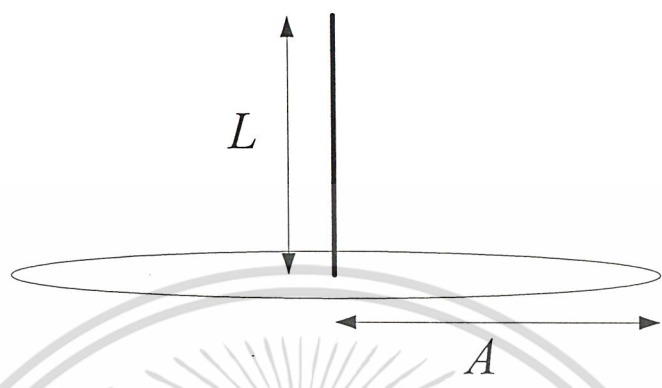
$$k = \frac{x'_{nm}}{a_e}$$

x'_{nm} เป็นค่ารากของอนุพันธ์เบสเสลฟังก์ชันอันดับที่ n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

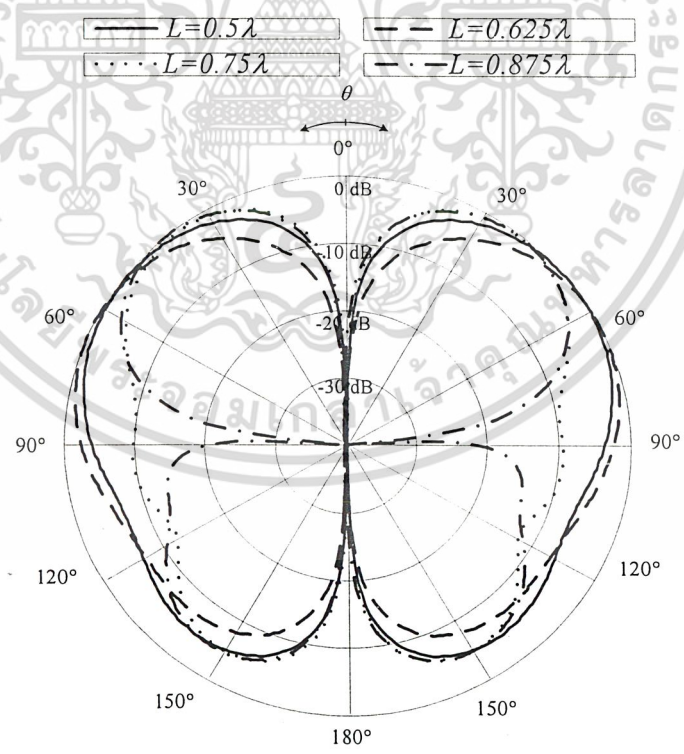
บทที่ 3 การวิเคราะห์สายอากาศ

3.1 สายอากาศโมโนโพล



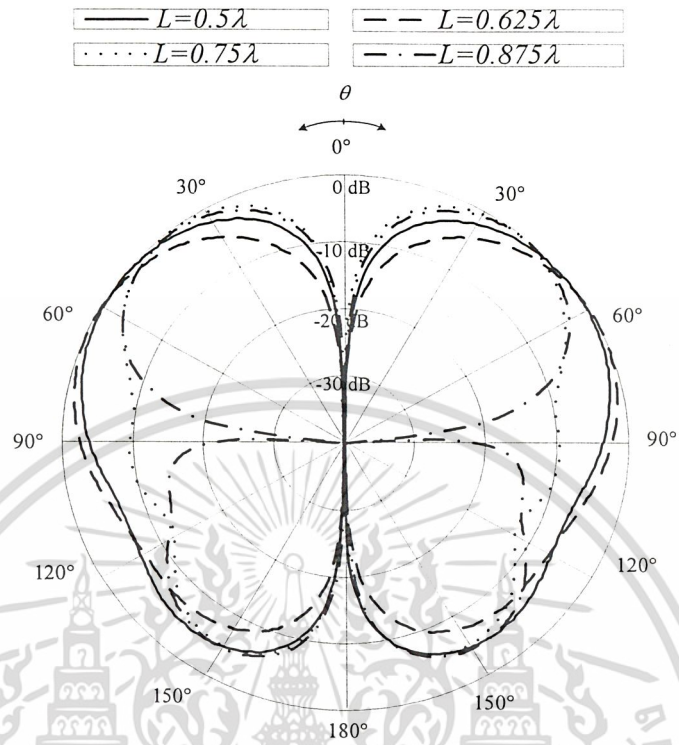
รูปที่ 3.1 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นระนาบตัวนำ

ทำการหาค่าความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการเลือกสายอากาศที่จะนำไปใช้โดยเลือกสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะกับการนำไปใช้
 เมื่อทำการหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเทียบจะได้กราฟดังรูป

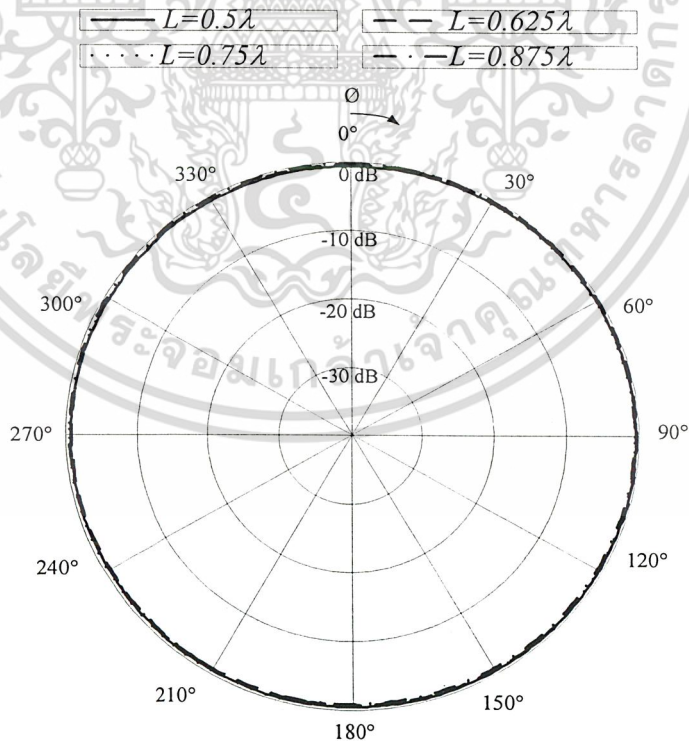


รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $A = 0.5\lambda, \phi = 0^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

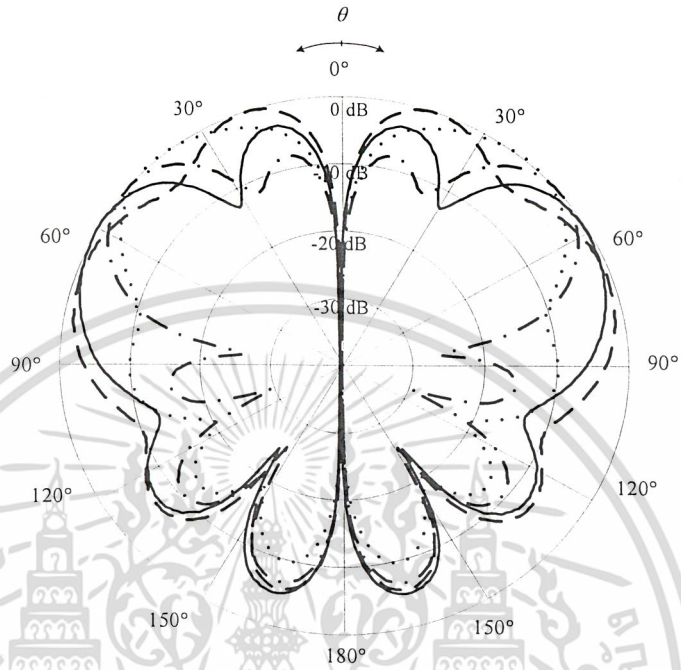
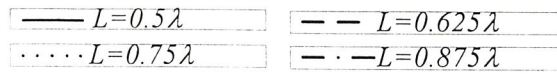


รูปที่ 3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $A = 0.5\lambda, \phi = 90^\circ$

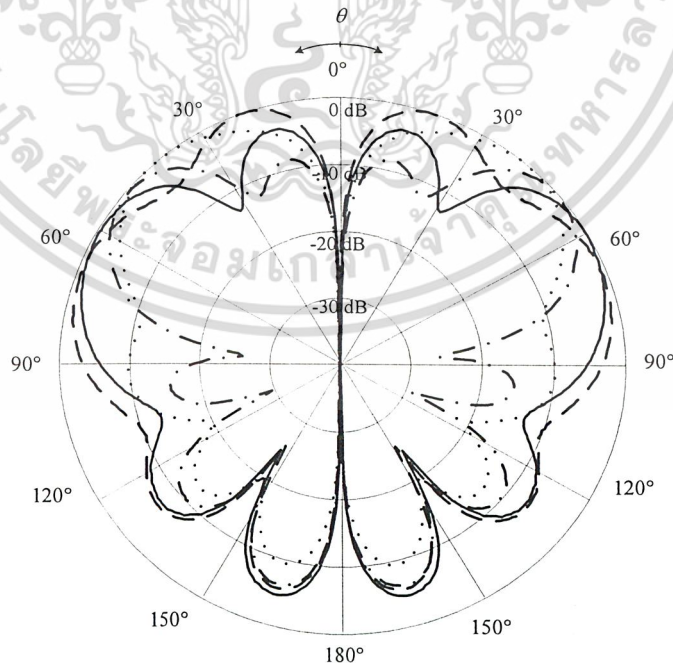


รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $A = 0.5\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

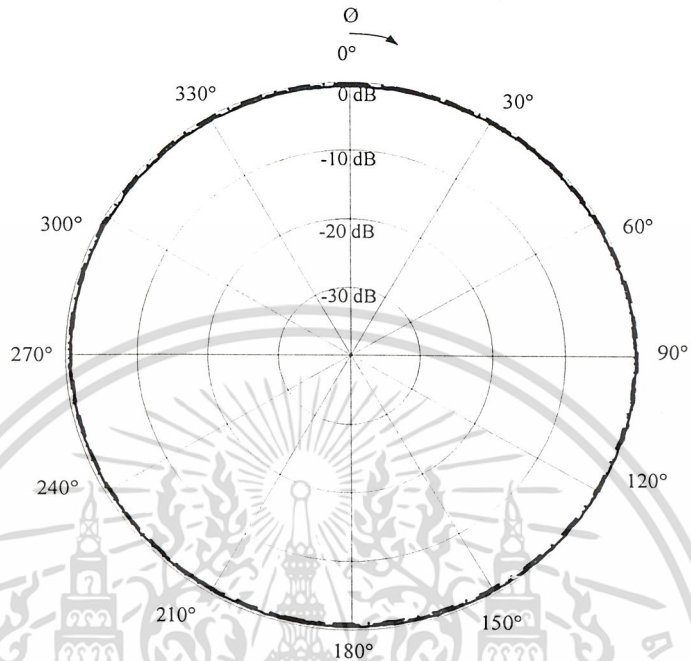
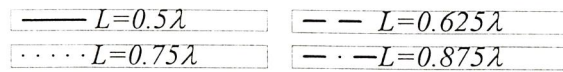


รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $A = 1\lambda, \phi = 0^\circ$

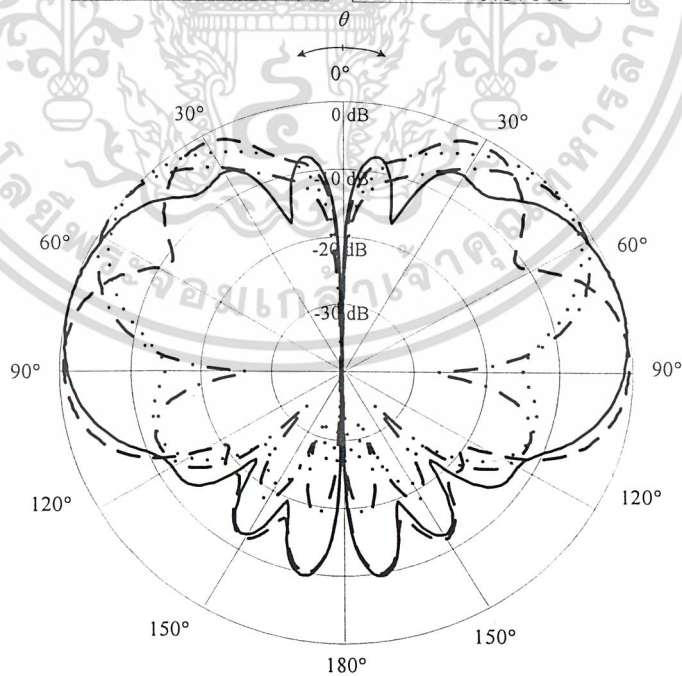


รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $A = 1\lambda, \phi = 90^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

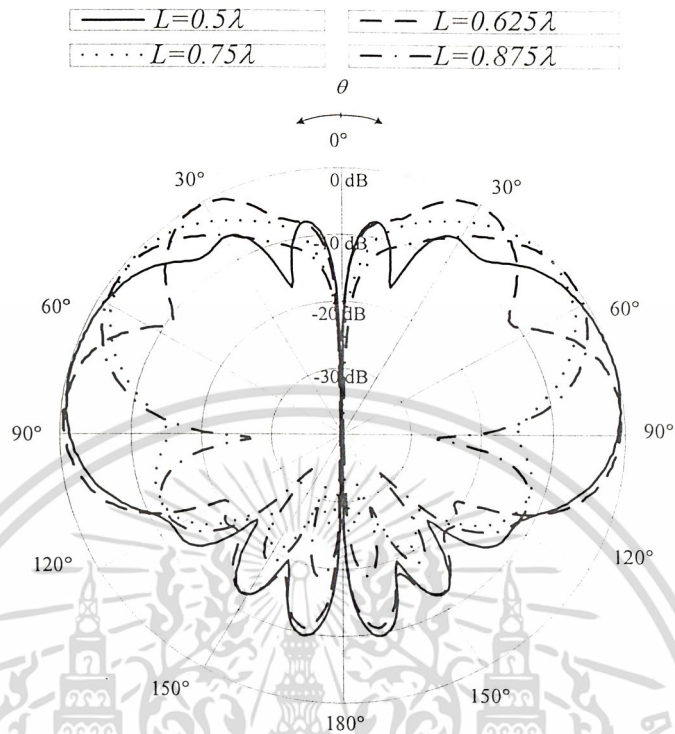


รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $A = 1\lambda$

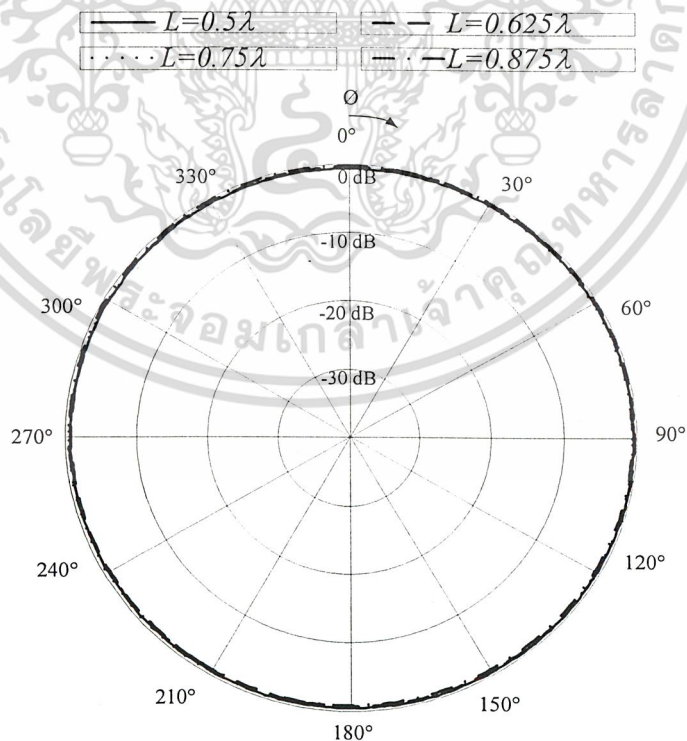


รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $A = 1.5\lambda, \phi = 0^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $A = 1.5\lambda, \phi = 90^\circ$

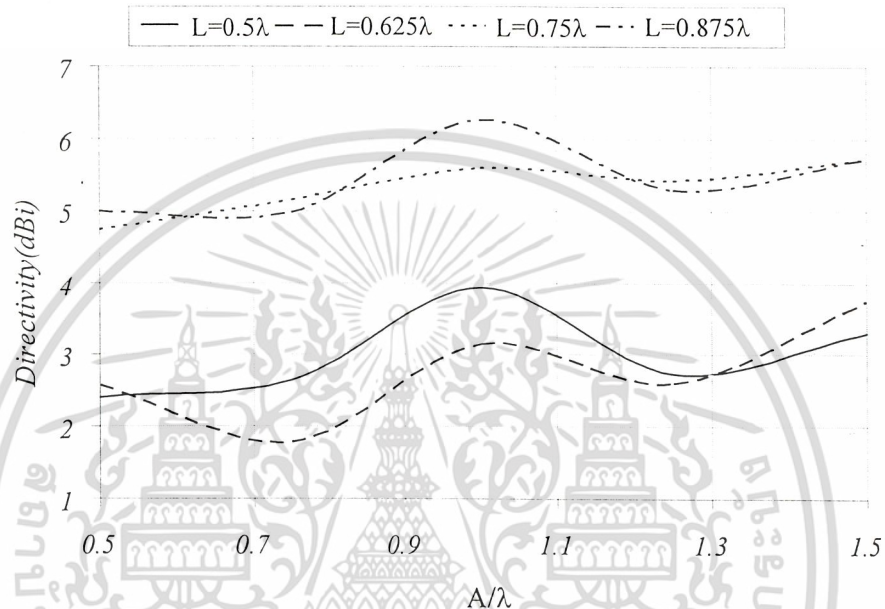


รูปที่ 3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $A = 1.5\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากกราฟทั้ง 3 รูปจะสรุปได้ว่าเมื่อรัศมีของระนาบตัวนำมีค่ามากขึ้น ค่าของมุมยกสูงสุดจะมีค่ามากขึ้น และเมื่อความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้นจะมีค่ามุมยกสูงสุดเพิ่มขึ้นเว้นแต่ ช่วงที่สายอากาศยาวขึ้นแล้ว บีมของลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมากขึ้นจนเป็นลำคลื่นหลักค่ามุมสูงสุดจะลดลงอย่างรวดเร็ว

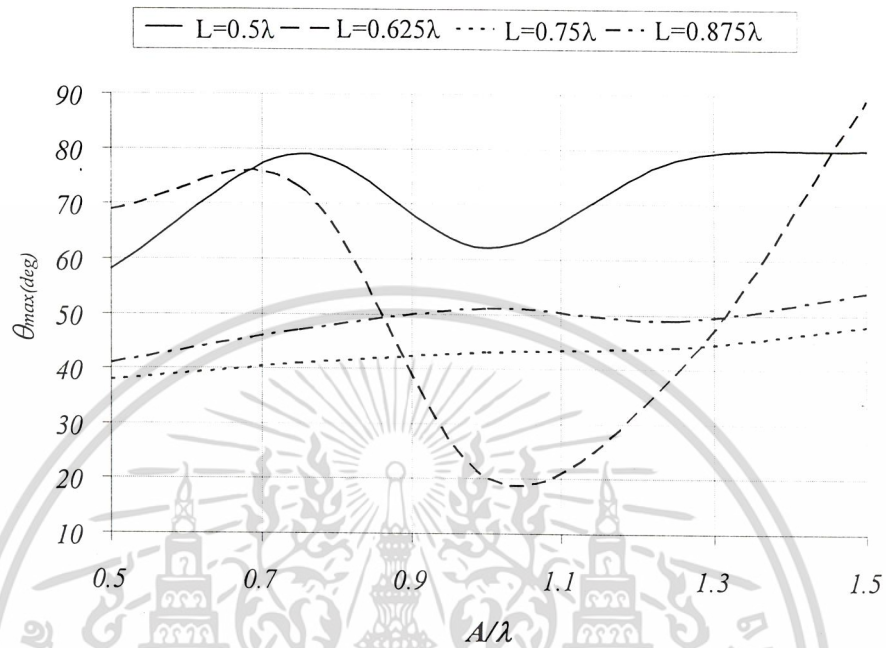
เมื่อทำการหาค่าไดเรกทิวิตีจะได้กราฟดังรูป



รูปที่ 3.11 ค่าไดเรกทิวิตีเทียบกับรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำ

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อค่าไดเรกทิวิตีมีค่าสูงสุดที่รัศมีของแผ่นระนาบตัวนำมีค่า $n\lambda/2$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม เมื่อค่ารัศมีเปลี่ยนแปลงไปค่าไดเรกทิวิตีจะค่อยๆลดลงจนต่ำที่สุดเมื่อรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำมีค่า $n\lambda/4$ เมื่อ n เป็นจำนวนคี่ เมื่อพิจารณาความยาวของสายอากาศจะเห็นว่าเมื่อค่าความยาวสายอากาศเพิ่มขึ้นค่าไดเรกทิวิตีมีแนวโน้มลดลง แต่จากรูปจะเห็นว่าค่าไดเรกทิวิตีเมื่อความยาวสายอากาศมีค่า 0.75λ มีค่ามากกว่าค่าไดเรกทิวิตี เมื่อความยาวสายอากาศน้อยกว่ามากเนื่องจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อความยาวสายอากาศมีค่า 0.75λ นี้ ลำคลื่นย่อยจะมีค่ามากขึ้นจนกลายเป็นลำคลื่นหลัก จึงทำให้ค่าไดเรกทิวิตีเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

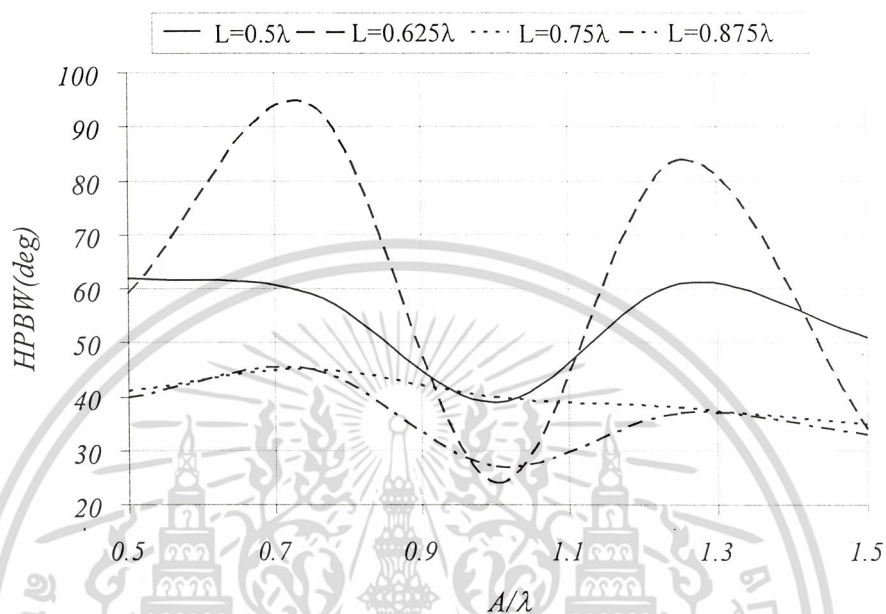
จากนั้นทำการหาค่ามุมยกสูงสุดเทียบกับรัศมีของระนาบตัวนำได้ดังรูป



รูปที่ 3.12 ค่ามุมยกสูงสุดเทียบกับรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำ

จากรูปจะเห็นว่า เมื่อค่ารัศมีของตัวนำเพิ่มขึ้นค่ามุมยกสูงสุดจะมากขึ้นเว้นแต่เป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากค่าคลื่นย่อยเป็นค่าคลื่นหลักค่ามุมยกสูงสุดจะตกลง

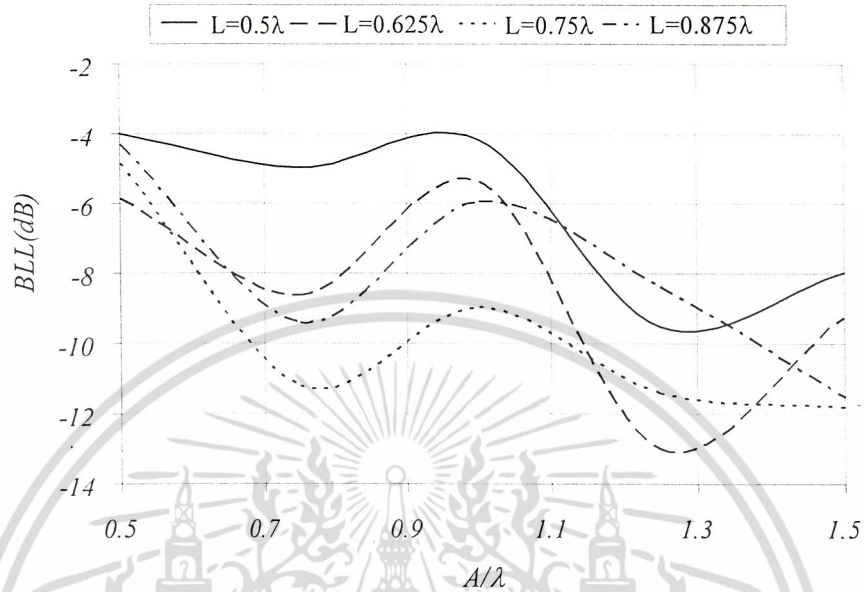
ทำการหาความกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังกับรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำได้
 ดังรูป



รูปที่ 3.13 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเทียบกับรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำ

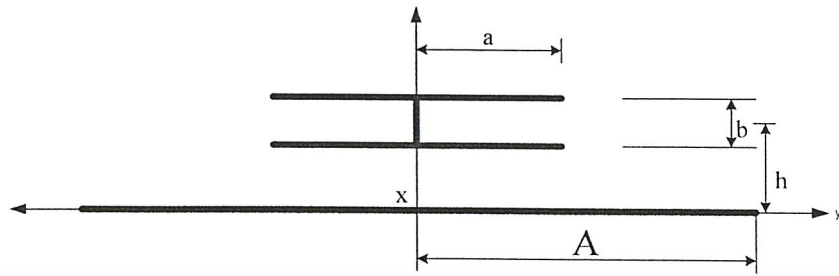
จากรูปจะเห็นว่าเมื่อค่ารัศมีของแผ่นระนาบตัวนำมีค่า $n\lambda/4$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะมีค่าที่มากที่สุดและจะลดลงเมื่อค่ารัศมีของระนาบตัวนำออกจากช่วงนั้นจนถึงน้อยที่สุดที่รัศมีของแผ่นระนาบตัวนำมีค่า $n\lambda/2$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม จากรูปจะสังเกตว่าเมื่อความยาวสายอากาศมีค่า 0.625λ ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่ารัศมีของตัวนำเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากเมื่อดูแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเห็นว่าที่ความยาวสายอากาศค่านี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงลำคลื่นย่อยเป็นลำคลื่นหลักเมื่อรัศมีของระนาบตัวนำเปลี่ยนไป

เมื่อทำการพลอตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำและระดับต่ำคลื่นย้อนด้านหลัง จะได้กราฟดังรูป



รูปที่ 3.14 ระดับต่ำคลื่นย้อนด้านหลังเทียบกับรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำ
จากรูปจะเห็นว่าเมื่อรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำเพิ่มขึ้นระดับต่ำคลื่นย้อนด้านหลังจะมีแนวโน้มลดลง

3.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรีสมิ โครงสร้างและตัวแปร



รูปที่ 3.15 โครงสร้างสายอากาศและตัวแปร

โดยที่ a เป็นรัศมีของท่อนำคลื่นเชิงรีสมิ

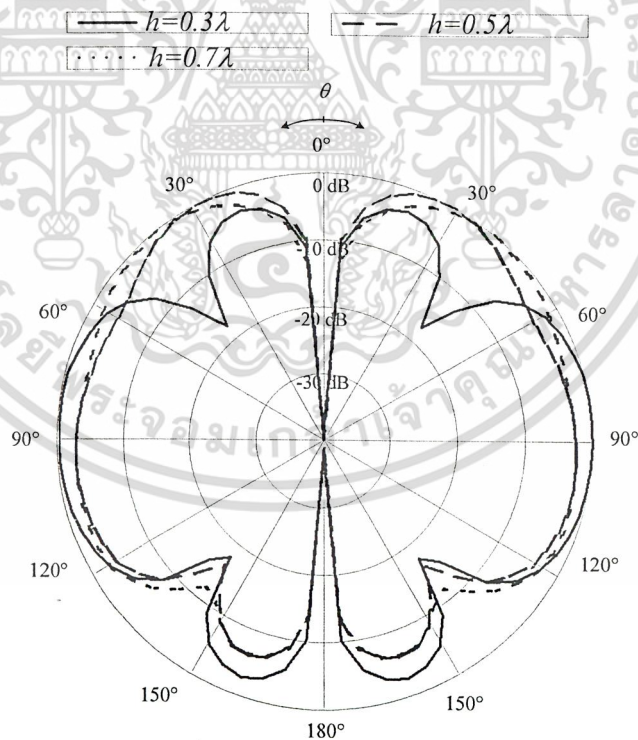
b เป็นระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองที่ประกบกันเป็นท่อนำคลื่นเชิงรีสมิ

h เป็นความสูงที่สายอากาศลอยเหนือระนาบตัวนำ

A เป็นรัศมีของแผ่นตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน

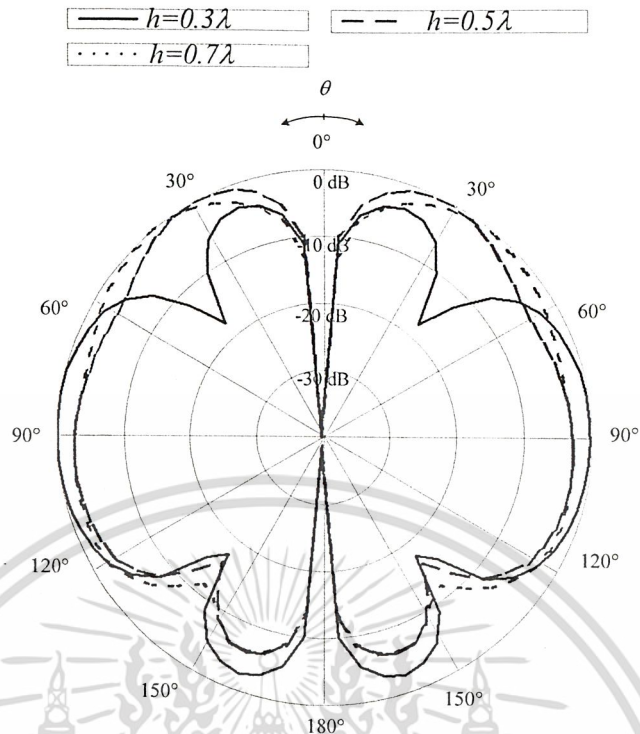
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

$$A = 0.75\lambda$$

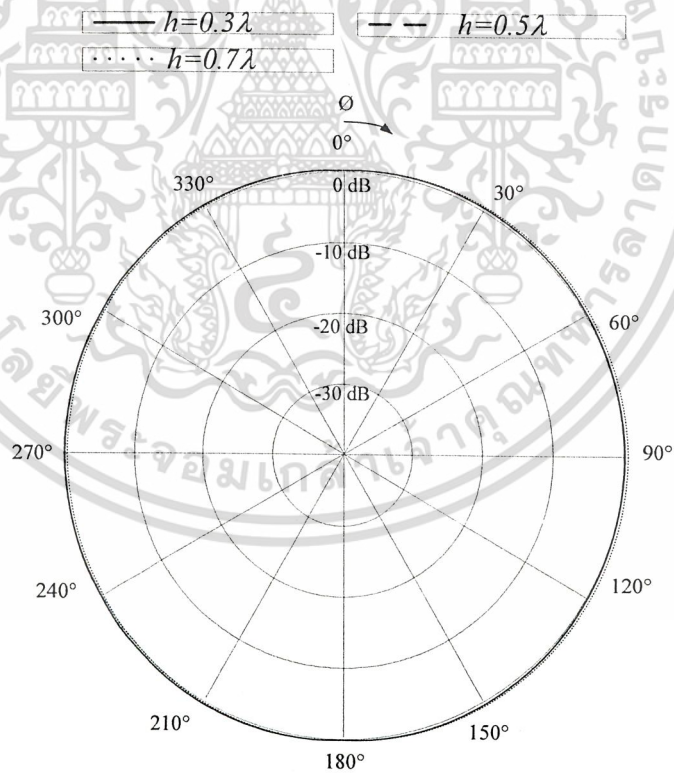


รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก เมื่อ $a = 0.3\lambda$, $\phi = 0^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

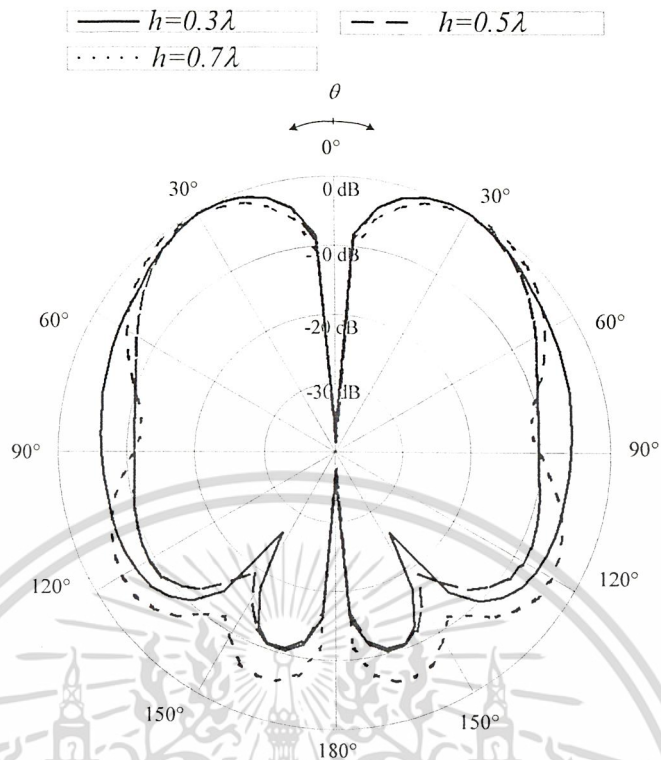


รูปที่ 3.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยก เมื่อ $a = 0.3\lambda$, $\phi = 90^\circ$

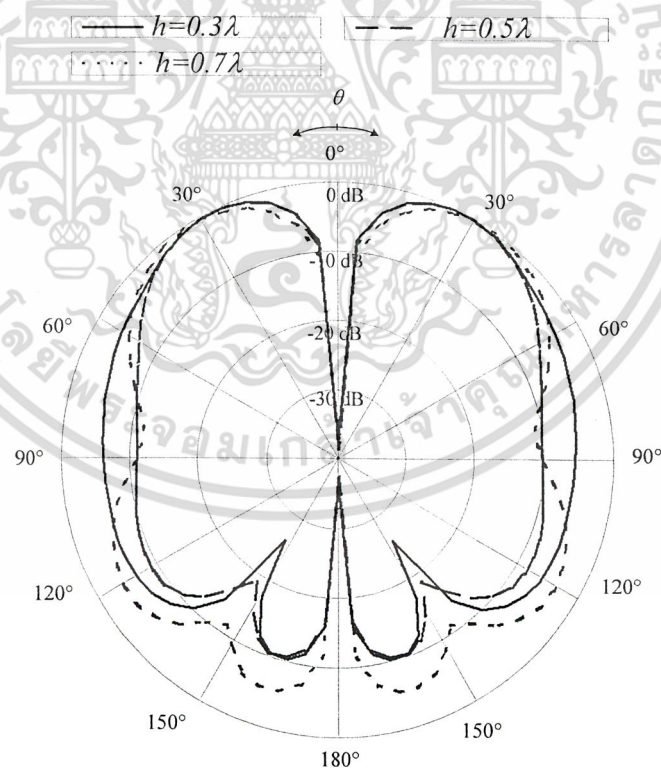


รูปที่ 3.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $a = 0.3\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

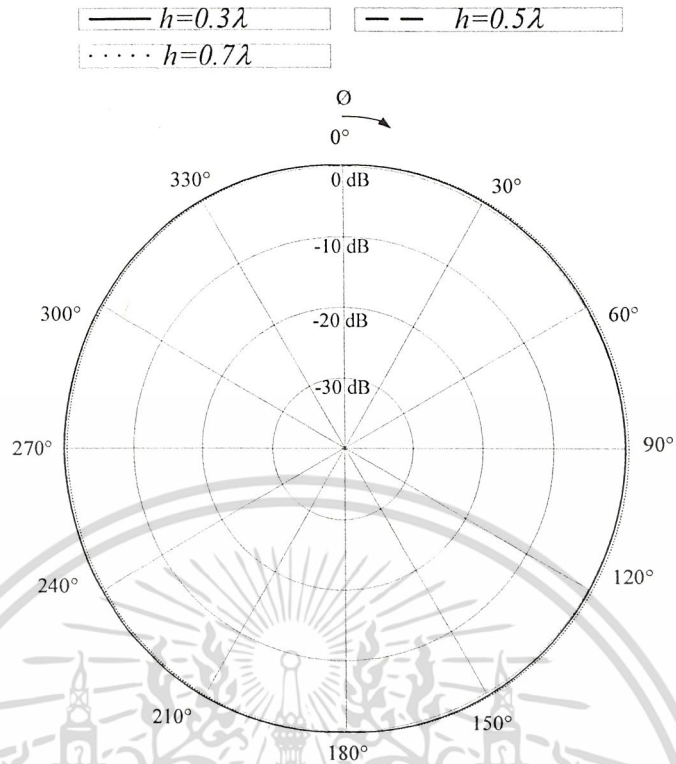


รูปที่ 3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $a = 0.5\lambda, \phi = 0^\circ$

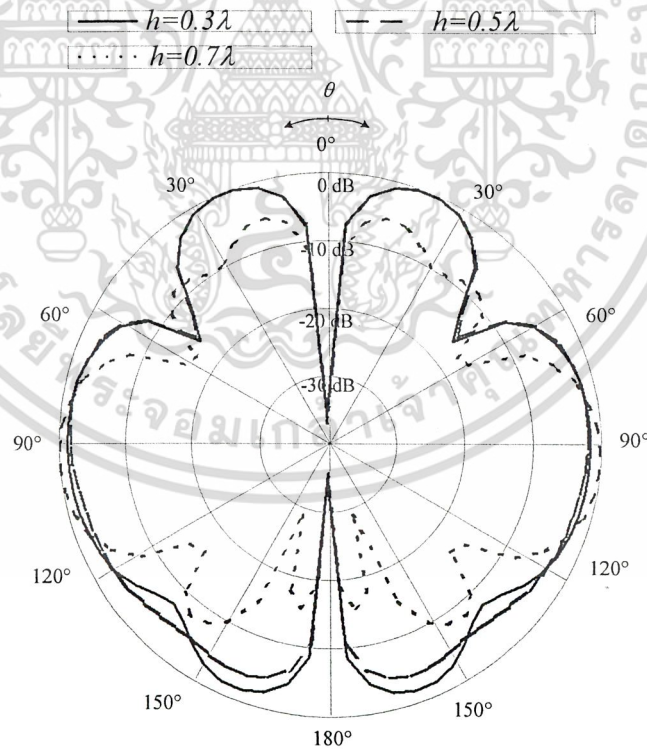


รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $a = 0.5\lambda, \phi = 90^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

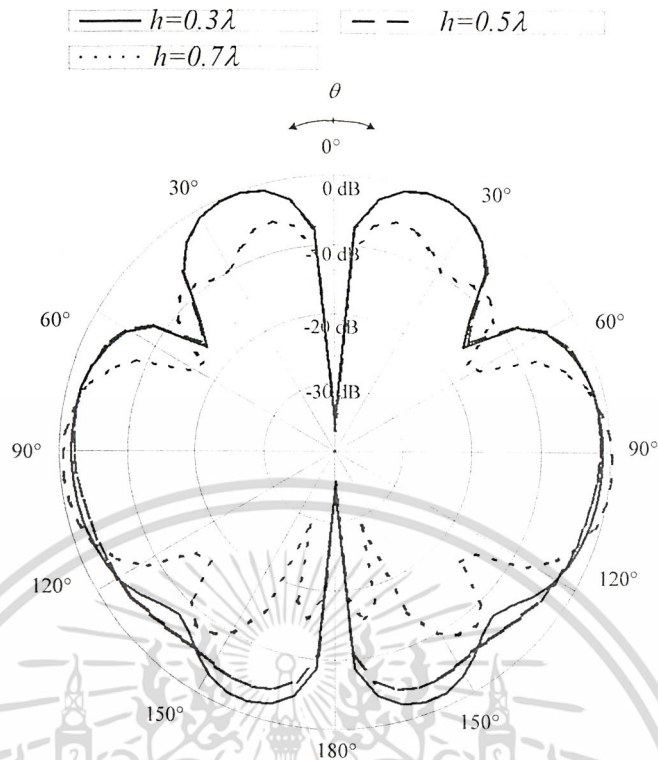


รูปที่ 3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $\alpha = 0.5\lambda$

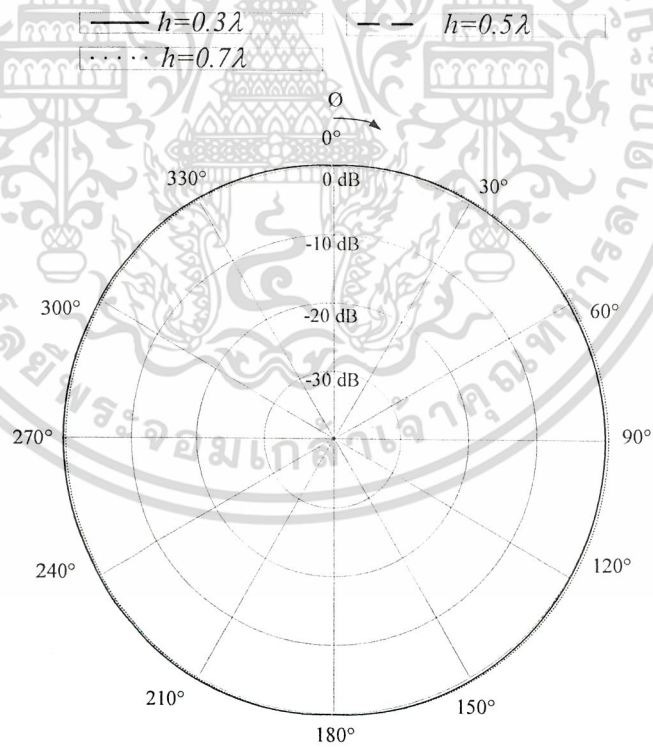


รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $\alpha = 0.7\lambda, \phi = 0^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



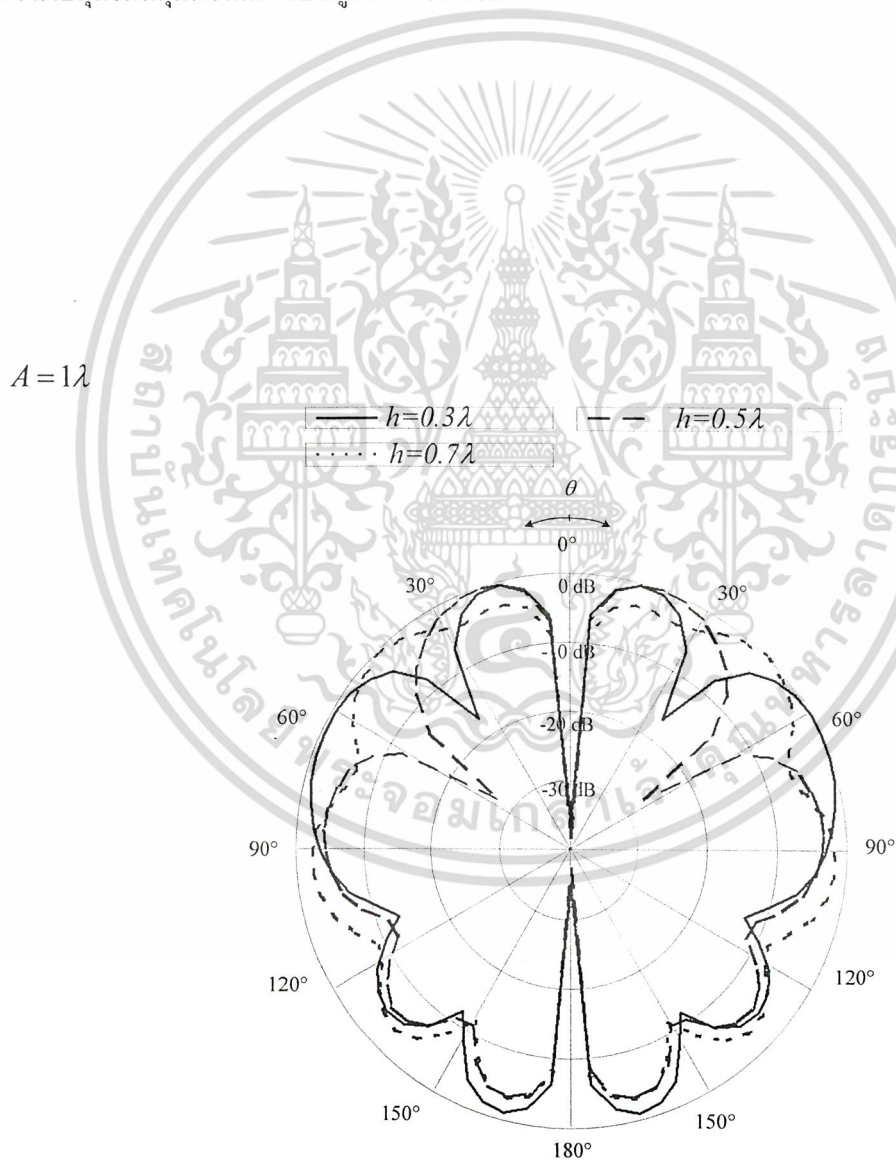
รูปที่ 3.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $a = 0.7\lambda, \phi = 90^\circ$



รูปที่ 3.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดเมื่อ $a = 0.7\lambda$

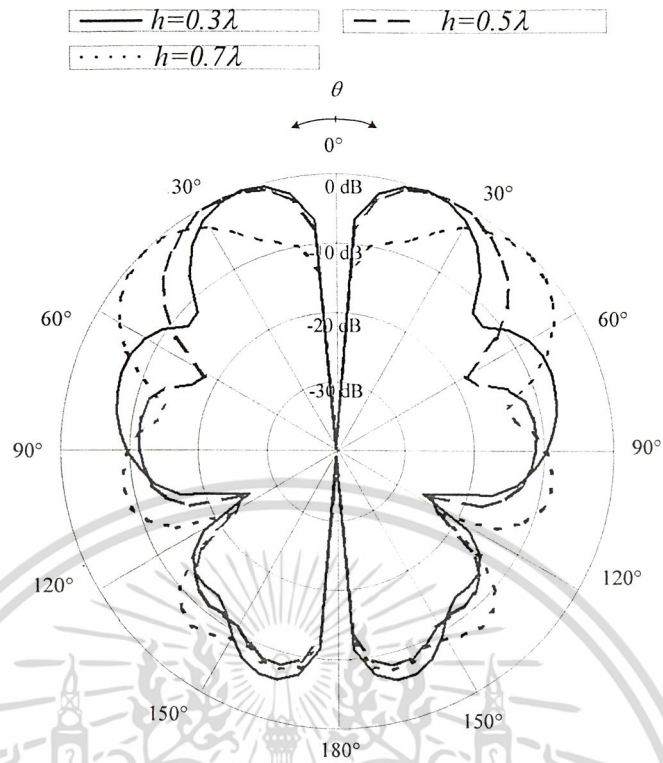
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะพบว่าหากเพิ่มความสูงขึ้นไปค่ามุมสนามสูงสุดในระนาบมุมจะลดลงตาม แต่หากเพิ่มไปจนถึงระยะหนึ่งค่ามุมนั้นก็กลับเพิ่มมากขึ้นอีกครั้ง ในทำนองเดียวกันกับค่าสภาพเจาะจงทิศทางคือ หากเพิ่มความสูงขึ้นค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะเพิ่มขึ้นตาม แต่หากเพิ่มไปจนถึงระยะหนึ่งค่านั้นก็กลับลดลงอีกครั้ง สำหรับจำนวนโลบนั้นจะพบว่าจะเกิดมากขึ้นถ้าความสูงเพิ่มมากขึ้น และยังพบอีกว่าที่ความสูงค่าหนึ่งจะมีแนวโน้มนำเพิ่มขึ้นตามรัศมีของท่อนำคลื่นเชิงรัศมี นอกจากนี้ลำคลื่นด้านหลังก็จะเพิ่มมากขึ้นตามค่ารัศมีของท่อนำคลื่นที่เพิ่มขึ้น และจะพบว่าที่รัศมีน้อยๆ ถ้าเพิ่มความสูงจะทำให้ลำคลื่นด้านหลังเพิ่มขึ้น แต่ถ้ารัศมีมีค่ามากจะทำให้ลำคลื่นด้านหลังมีค่าลดลง ความกว้างลำคลื่นหลักก็ลดลงตามรัศมีที่เพิ่มขึ้น ส่วนลักษณะของแบบรูปมีความสมมาตรกันในระนาบมุมกวาด ดังนั้นเพื่อความสะดวกจากนี้ไปจึงจะแสดงเฉพาะแบบรูปในระนาบมุมยกที่มุมกวาดมีค่าเป็นศูนย์องศาเท่านั้น

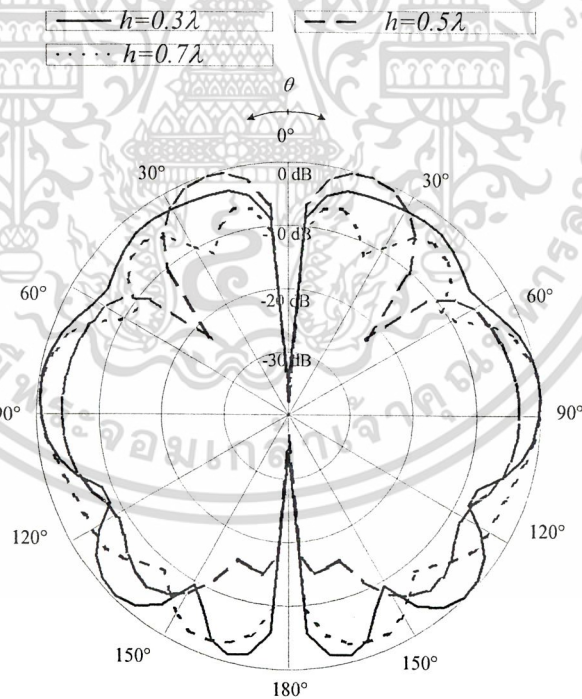


รูปที่ 3.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $a = 0.3\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $\alpha = 0.5\lambda$

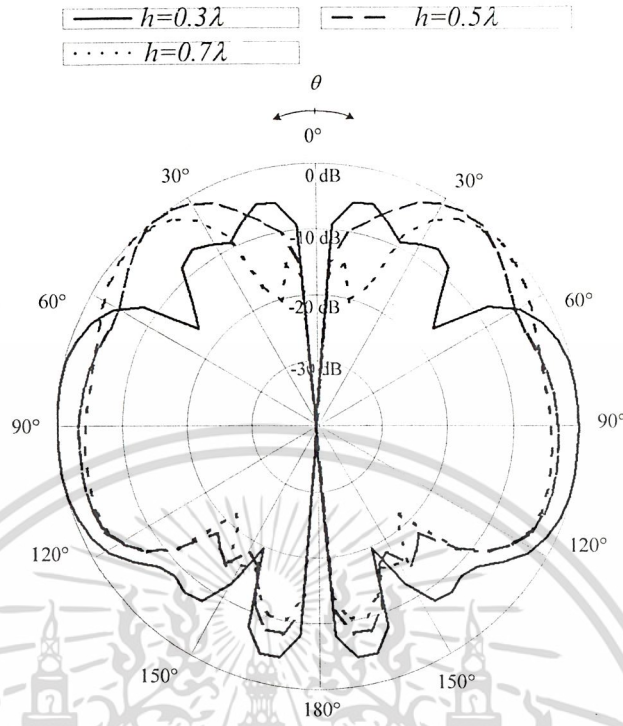


รูปที่ 3.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $\alpha = 0.7\lambda$

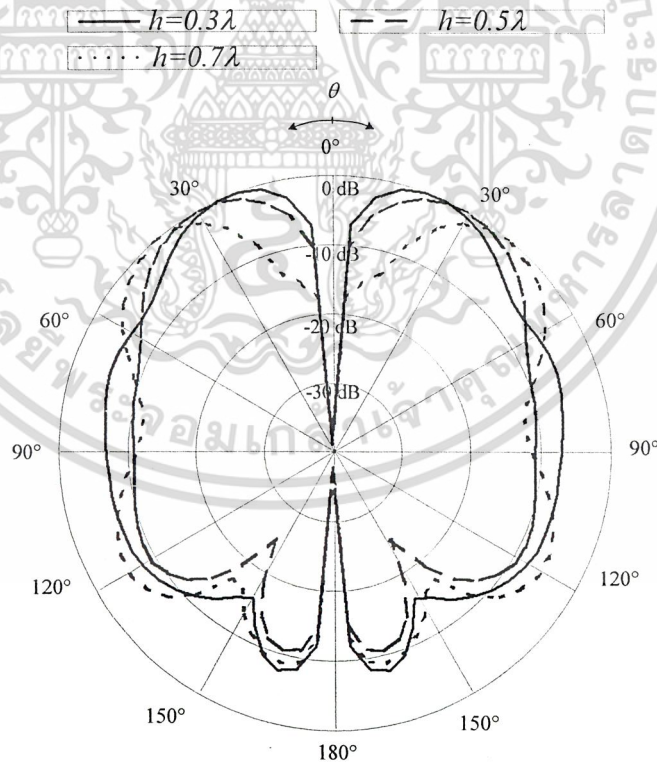
พบว่ากรณีที่รัศมีของแผ่นตัวนำเพิ่มขึ้นนี้ทำให้แนวโน้มค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนไปเล็กน้อย คือ ค่ามุมสนามสูงสุดในระนาบมุมยกมีค่าลดลง ลำคลื่นหลักจะมีความกว้างเล็กลง และเกิดจำนวนลำคลื่นย่อยมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$A = 1.25\lambda$

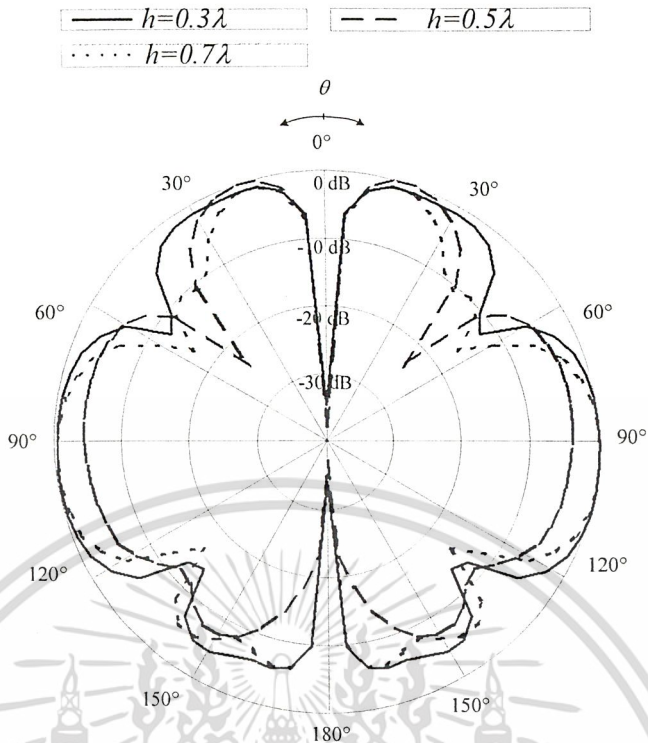


รูปที่ 3.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $\alpha = 0.3\lambda$



รูปที่ 3.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $\alpha = 0.5\lambda$

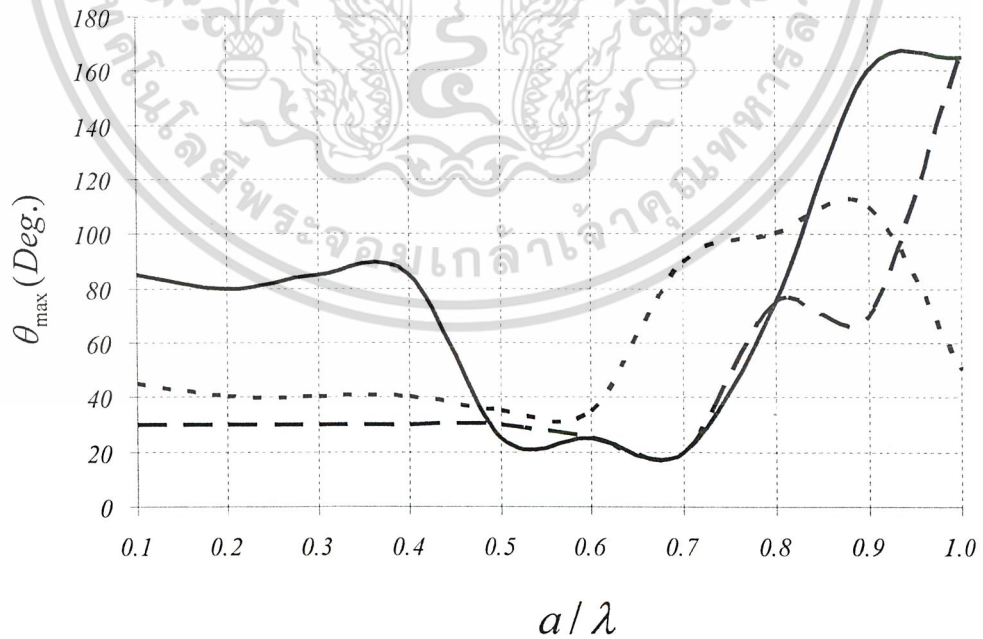
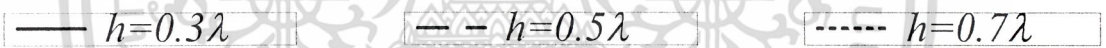
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกเมื่อ $\alpha = 0.7\lambda$

ค่ามุมสนามสูงสุดในระนาบมุมยก

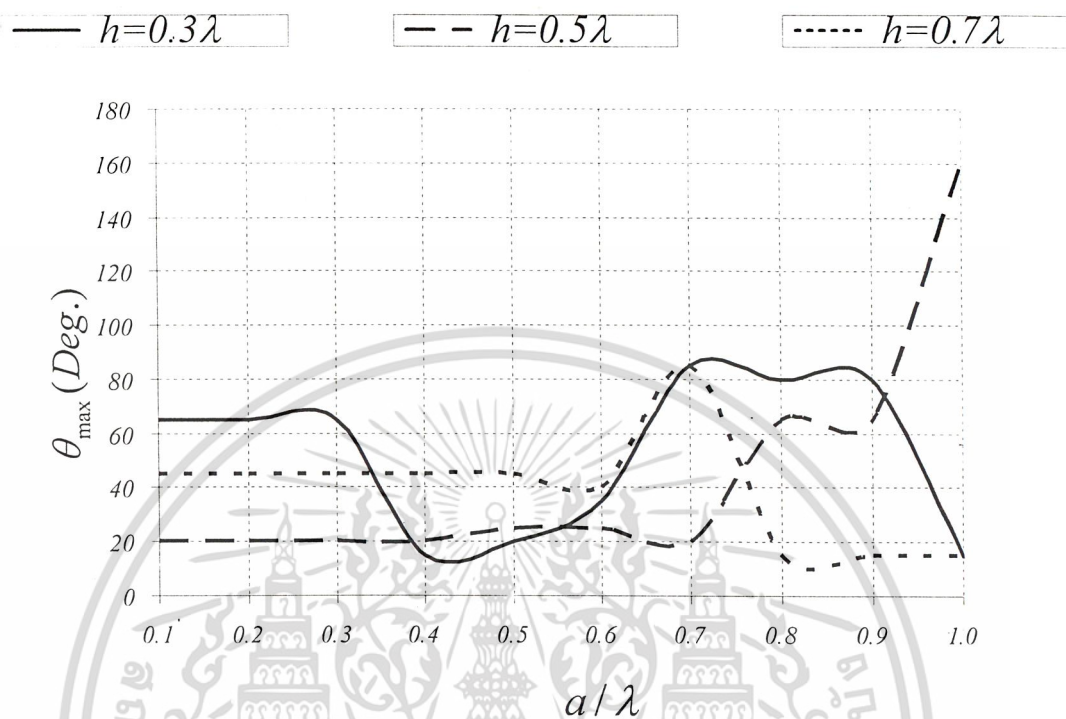
$A = 0.75\lambda$



รูปที่ 3.31 กราฟค่ามุมสนามสูงสุดในระนาบมุมยกกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ

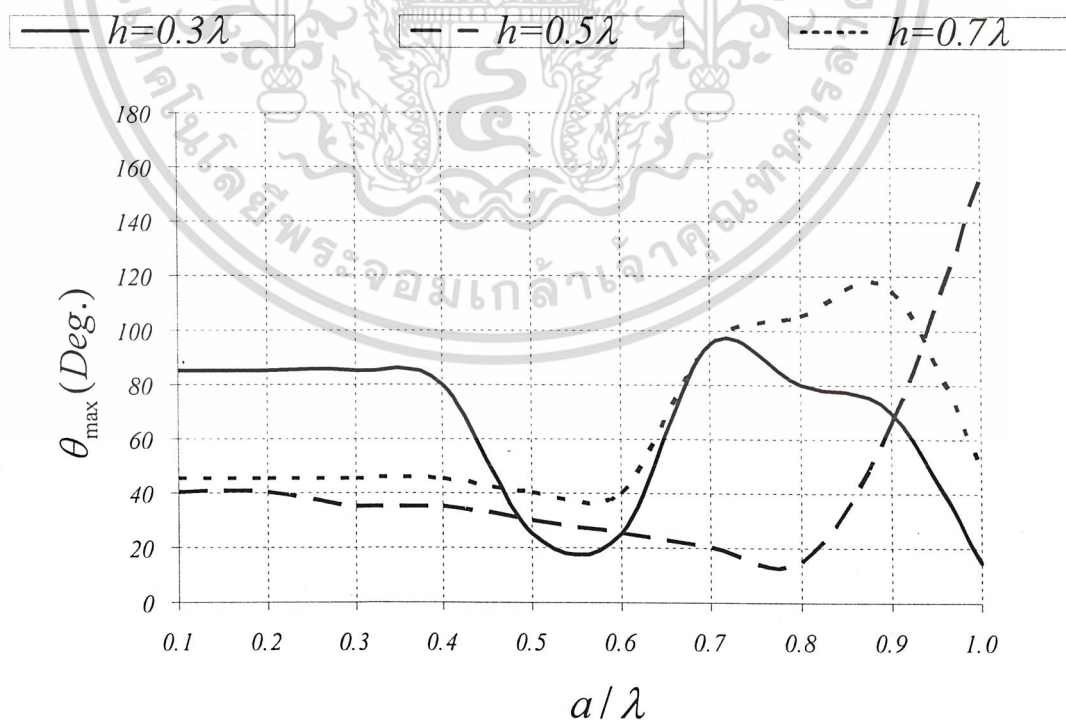
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = 1\lambda$$



รูปที่ 3.32 กราฟค่ามุมสนามสูงสุดในระยะนามุมยกกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่มีความสูงต่างๆ

$$A = 1.25\lambda$$



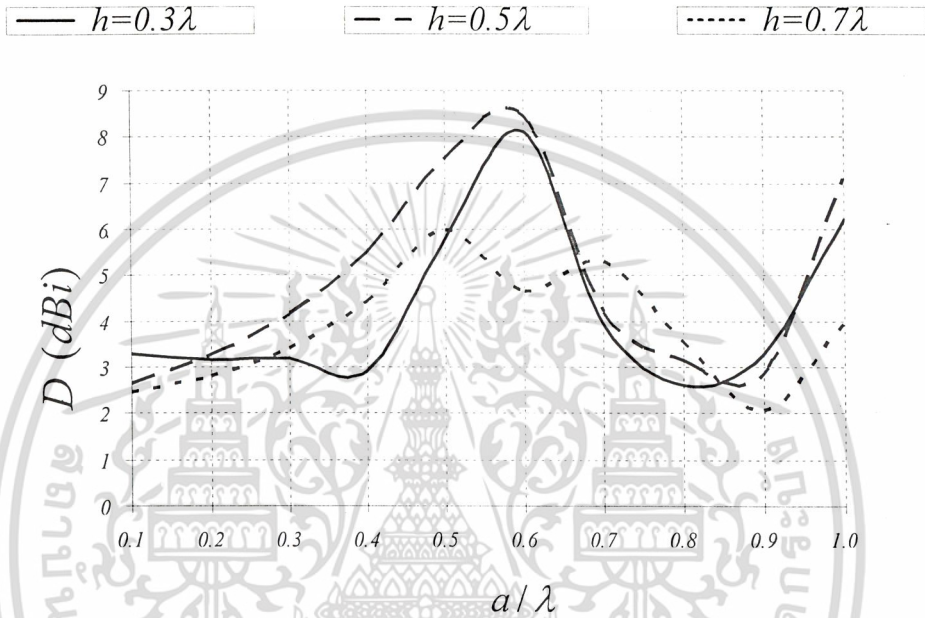
รูปที่ 3.33 กราฟค่ามุมสนามสูงสุดในระยะนามุมยกกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่มีความสูงต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงความสูงแม้เพียงไม่มากก็มีผลต่อค่ามุมสนามสูงสุด ในระนาบมุม ยก ให้เปลี่ยนแปลงไปมากกว่าการเปลี่ยนแปลงรัศมีของท่อนำคลื่น และพบว่าความกว้างของแผ่นตัวนำมีผล ทำให้ค่ามุมสนามสูงสุดในระนาบมุมขดลดลงเล็กน้อย

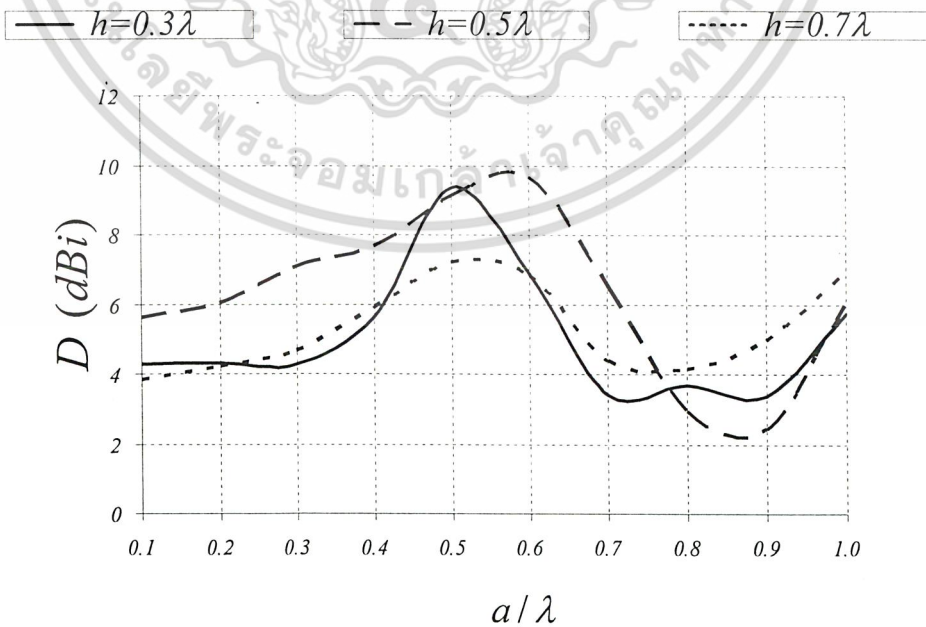
ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

$$A = 0.75\lambda$$



รูปที่ 3.34 กราฟค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ

$$A = 1\lambda$$



รูปที่ 3.35 กราฟค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ

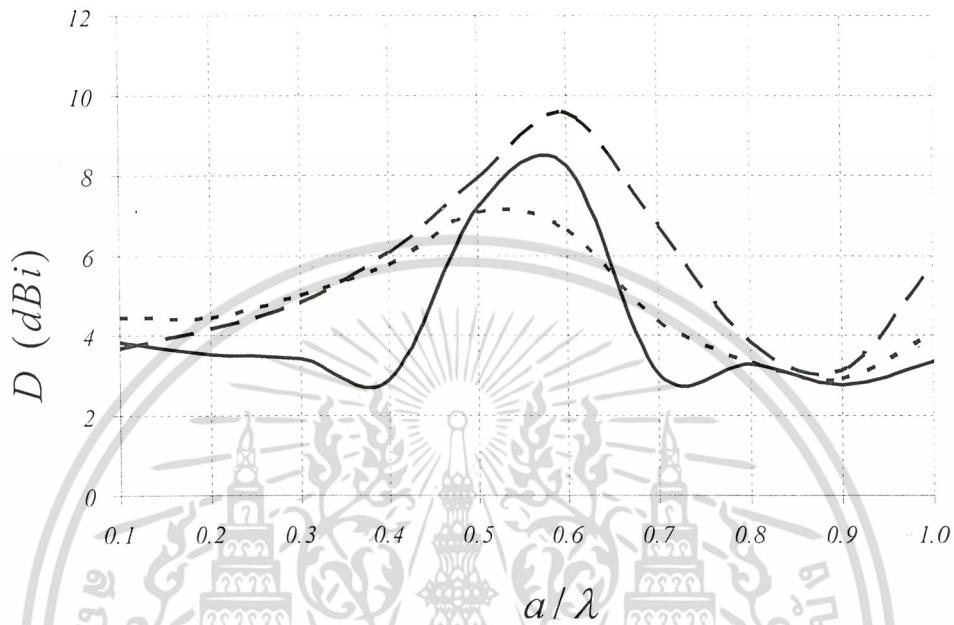
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = 1.25\lambda$$

$$\text{— } h = 0.3\lambda$$

$$\text{-- } h = 0.5\lambda$$

$$\text{- - - } h = 0.7\lambda$$

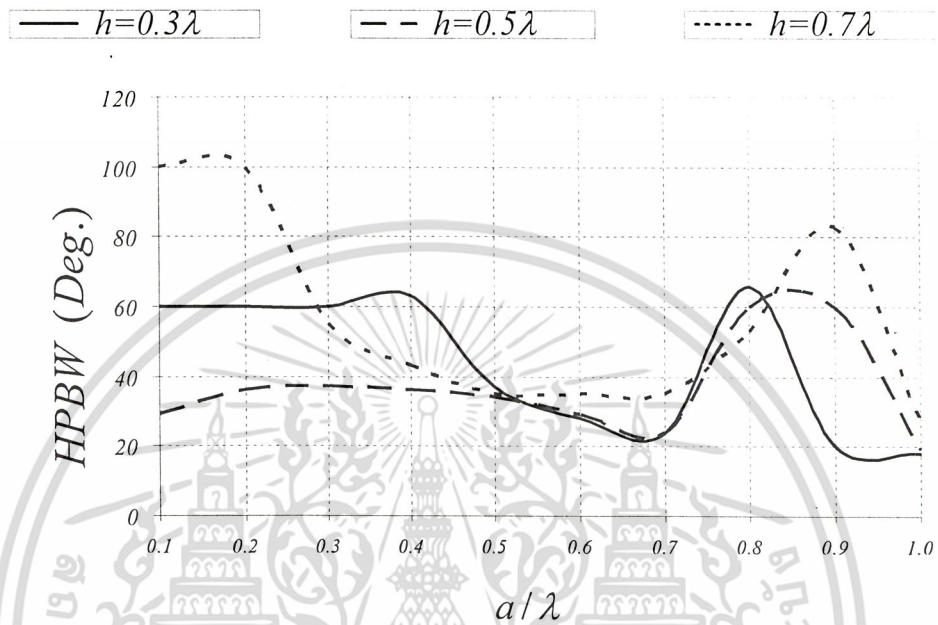


รูปที่ 3.36 กราฟค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่มีความสูงต่างๆ จากกราฟจะเห็นว่ารัศมีท่อนำคลื่นที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงขึ้นเป็นช่วงๆ และในช่วงนั้นยังพบอีกด้วยว่าความสูงที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางลดลง และความกว้างของแผ่นตัวสะท้อนที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเพิ่มขึ้นอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

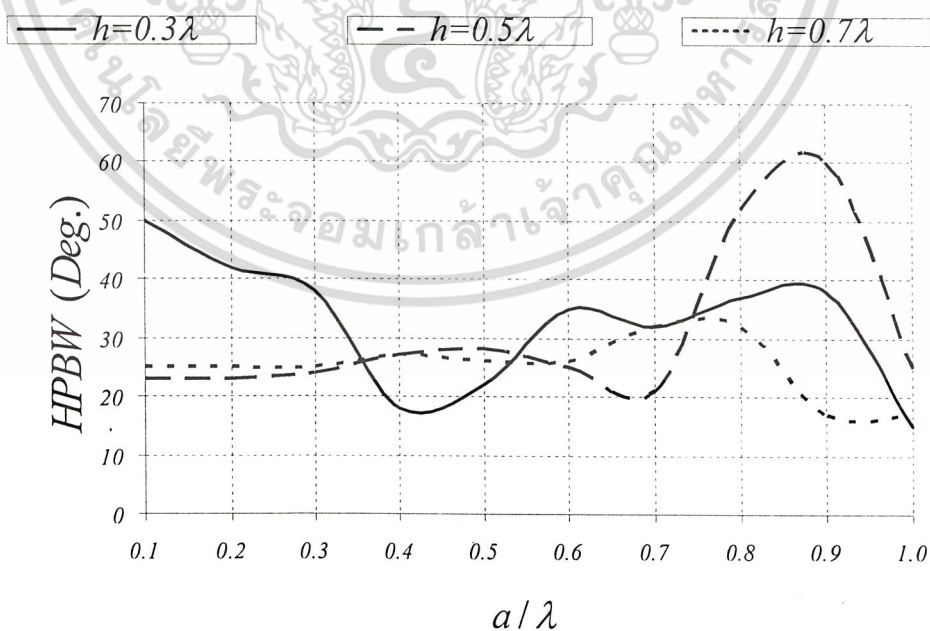
ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

$$A = 0.75\lambda$$



รูปที่ 3.37 กราฟค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ

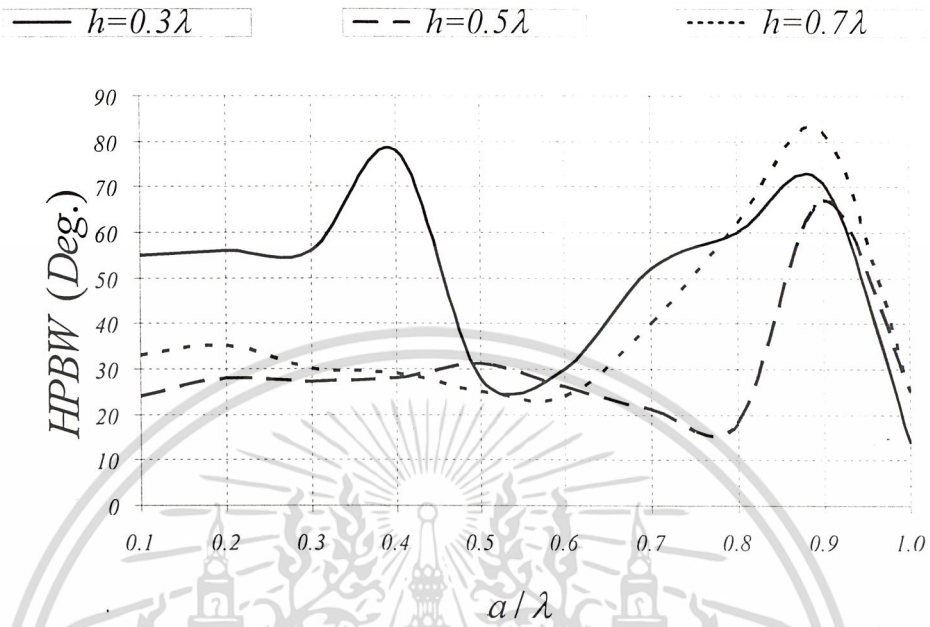
$$A = 1\lambda$$



รูปที่ 3.38 กราฟค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

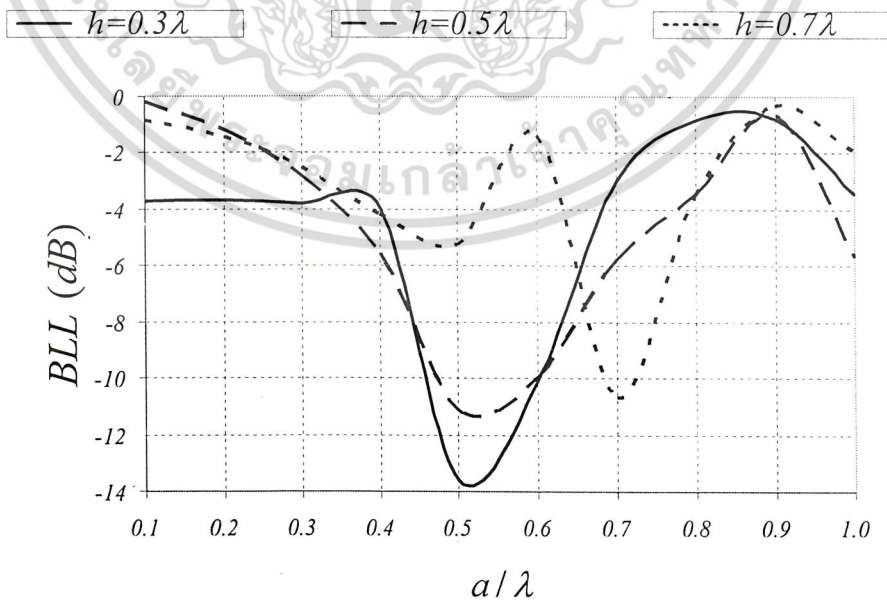
$A = 1.25\lambda$



รูปที่ 3.39 กราฟค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ

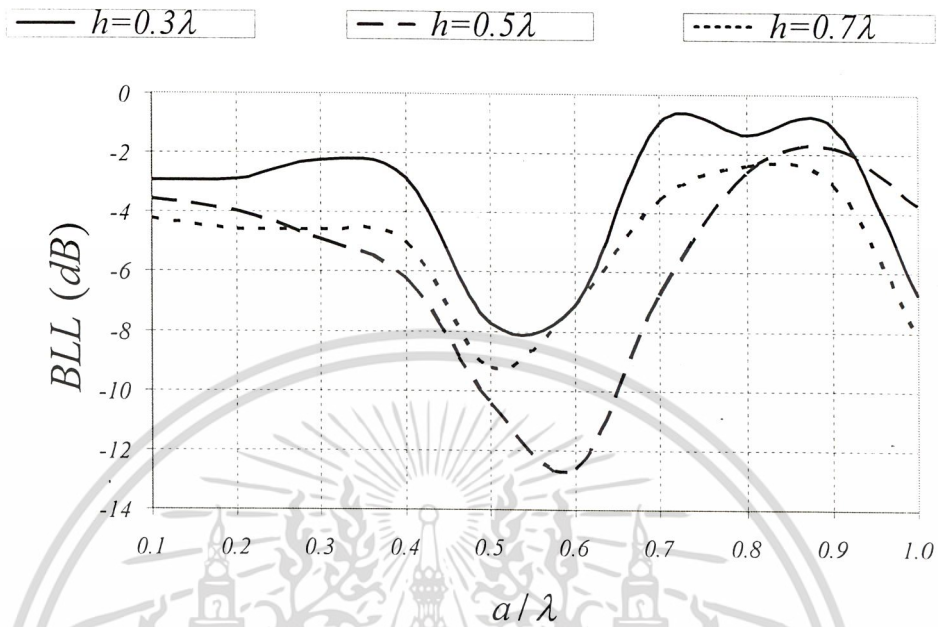
จากกราฟจะพบว่าค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะมีค่าสูงในตอนแรกจากนั้นจะลดลง แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง (เหมือนกันทั้ง a และ h) นั่นเป็นเพราะว่าเกิดลำคลื่นย่อยที่มีขนาดใกล้เคียงกันกับลำคลื่นหลัก และรัศมีของแผ่นสะท้อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมีค่าลดลง
ค่าระดับลำคลื่นด้านหลัง

$A = 0.75\lambda$

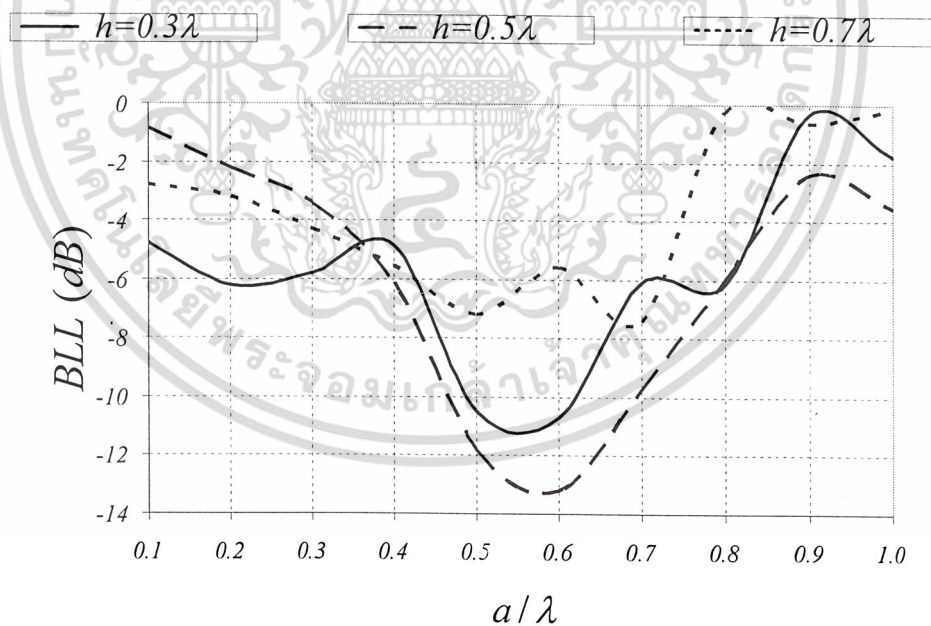


รูปที่ 3.40 กราฟค่าระดับลำคลื่นด้านหลังกับรัศมีของท่อนำคลื่นที่ความสูงต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$A = 1\lambda$


รูปที่ 3.41 กราฟค่าระดับลาคลิ้นด้านหลังกับรัศมีของท่อนาคลิ้นที่ความสูงต่างๆ

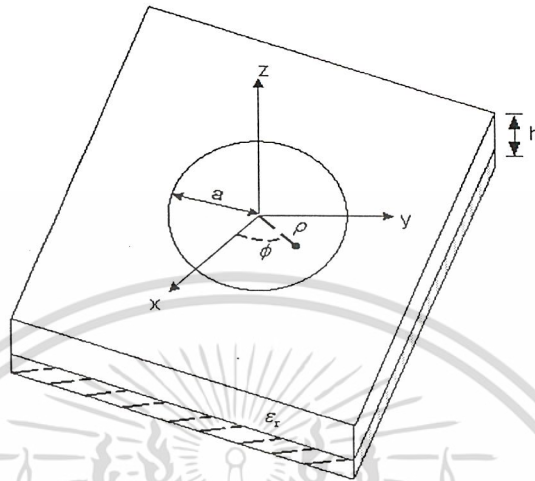
 $A = 1.25\lambda$


รูปที่ 3.42 กราฟค่าระดับลาคลิ้นด้านหลังกับรัศมีของท่อนาคลิ้นที่ความสูงต่างๆ

จากกราฟจะมีค่ารัศมีบางช่วงเท่านั้นที่ทำให้ได้ระดับคลิ้นด้านหลังมีค่าต่ำๆ ถ้าออกจากช่วงนั้นจะทำให้ได้ระดับลาคลิ้นด้านหลังที่สูง ความยาวของรัศมีแผ่นสะท้อนจะทำให้รัศมีที่ทำให้ได้ช่วงดังกล่าวกว้างขึ้นเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม



รูปที่ 3.43 โครงสร้างสายอากาศแบบไมโครสตริปแบบวงกลม

จากสมการสนามไฟฟ้า

$$E_\theta = j^n \frac{V a_e k_0}{2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos n\phi [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)] \quad (3-1)$$

$$E_\phi(\theta, \phi) = j^n \frac{V a_e k_0}{2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos \theta \sin n\phi [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)] \quad (3-2)$$

โดยที่

$$V = h E_0 J_n(k a_e)$$

$J_n(k a_e)$ = เบสเสลฟังก์ชัน อันดับที่ n

$$k = \frac{x'_{nm}}{a_e}$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

h = ความหนาของสารตัวกลางไดอิเล็กทริก

a_e = effective radius

x'_{nm} = ค่ารากของอนุพันธ์เบสเสลฟังก์ชันอันดับที่ n

จะได้สมการสนามไฟฟ้ารวมดังนี้

$$\bar{E}(\theta, \phi) = \sqrt{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2}$$

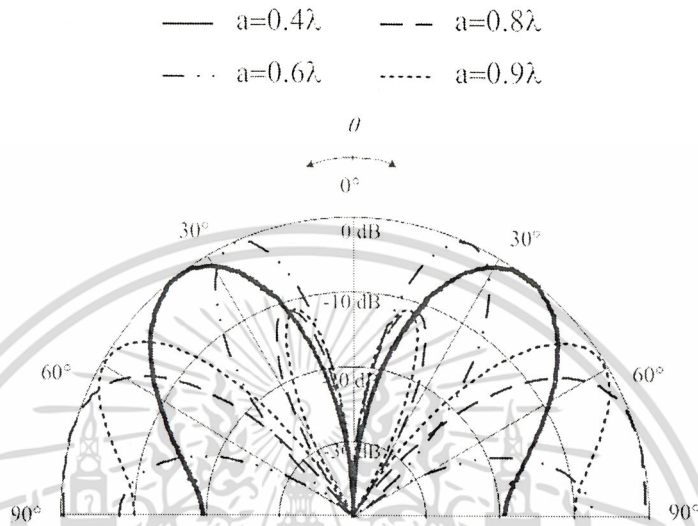
การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

- ใช้งานที่ความถี่ 2.45GHz

- ความหนาของสารตัวกลาง(อีพ็อกซี)ประมาณ 1.5 mm(จากการทดลองวัด)

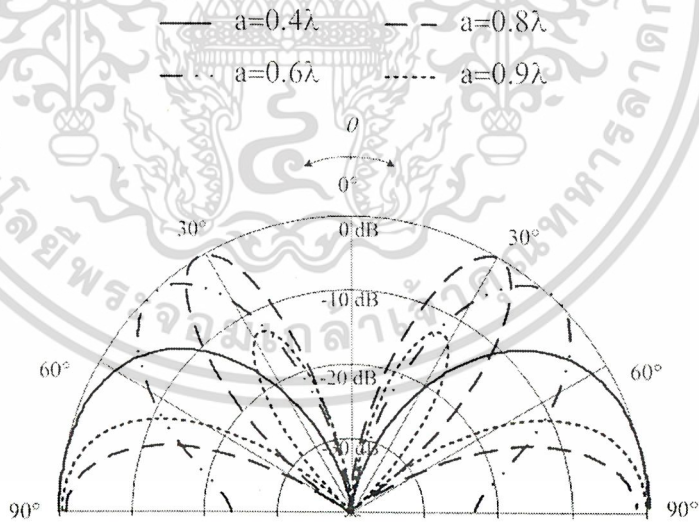
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าเพอร์มิททิวิตีของสารอีพ็อกซี (ϵ_r) ประมาณ 4.4234 (หาได้จากการทดลอง)
 โดยใช้โปรแกรม Mathcad ช่วยในการวิเคราะห์หาค่าต่างๆ



รูปที่ 3.44 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่มุม $\phi = 0^\circ$ เมื่อความยาวรัศมีต่างกันที่ TM โหมด(2,1)

จากรูปที่ จะเห็นว่าเมื่อความยาวรัศมีเพิ่มขึ้นมุมยกสูงสุดจะเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้น

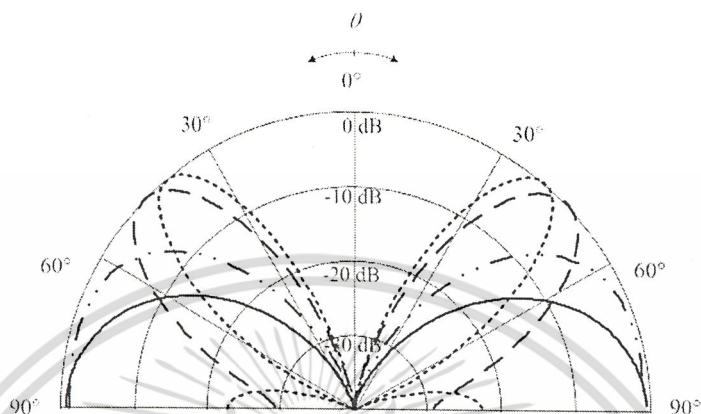


รูปที่ 3.45 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่มุม $\phi = 0^\circ$ เมื่อความยาวรัศมีต่างกันที่ TM โหมด(3,1)

จากรูปที่ 3.45 จะเห็นว่าที่ความยาวรัศมี $a = 0.4\lambda$ มุมยกสูงสุดจะอยู่ที่ช่วง 60 องศา เมื่อความยาวรัศมีเพิ่มขึ้นเป็น $a = 0.6\lambda$ มุมยกสูงสุดจะอยู่ที่ช่วง 28 องศา แต่เมื่อเพิ่มความยาวรัศมีขึ้นไปอีกมุมยกสูงสุดจะเบี่ยงเบนออกไปเพิ่มขึ้น

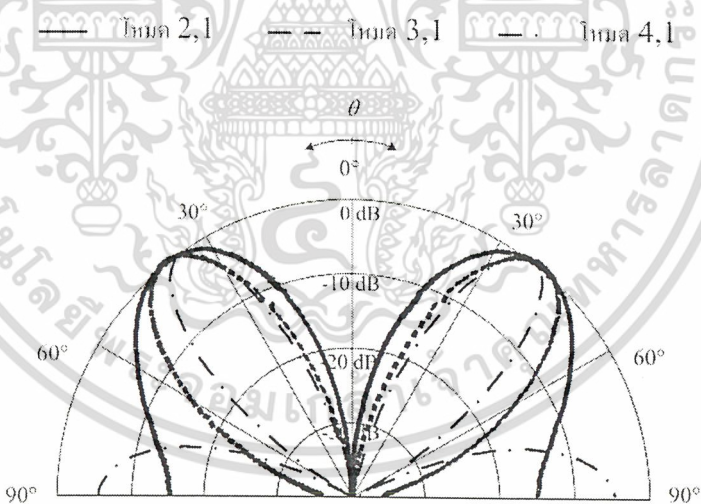
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— $a=0.4\lambda$ - - $a=0.8\lambda$
 - · · $a=0.6\lambda$ ····· $a=0.9\lambda$



รูปที่ 3.46 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่มุม $\phi = 0^\circ$ เมื่อความยาวรัศมีต่างกันที่ TM โหมด(4,1)

จากรูปที่ 3.46 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความยาวรัศมีขึ้นไปเรื่อยๆจนถึง $a = 0.8\lambda$ มุมยกสูงสุดจะค่อยๆเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความยาวรัศมีเพิ่มขึ้นเป็น $a = 0.9\lambda$ จะเริ่มมีไซด์โลบ(side lobe level)เกิดขึ้น



รูปที่ 3.47 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่มุม $\phi = 0^\circ$ ด้วย TM โหมดต่างๆที่มุม 40 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ของสารอีพ็อกซี (ϵ_r)	โหมด(n,m)	ค่ามุมยกสูงสุด (องศา)	สภาพเจาะจง ทิศทาง(dBi)	รัศมี(cm.)
4.4234	2,1	32.4	7.235	0.4630 λ
	3,1	40	7.24	0.6477 λ
	4,1	47	7.29	0.8200 λ

ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณค่าต่างๆบนแผ่นกรวดเพลนอนันต์

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า ที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากันและค่าสภาพเจาะจงทิศทางใกล้เคียงกัน เมื่อโหมดสูงขึ้นค่ารัศมีจะเพิ่มมากขึ้นค่ามุมยกสูงสุดจะเบี่ยงเบนเพิ่มมากขึ้น

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ของสารอีพ็อกซี (ϵ_r)	โหมด(n,m)	ค่ามุมยกสูงสุด (องศา)	สภาพเจาะจง ทิศทาง(dBi)	รัศมี(cm.)
4.4234	2,1	40	5.34	0.3807 λ
	3,1	40	7.24	0.6477 λ
	4,1	40	8.039	0.9600 λ

ตารางที่ 3.2 ผลการคำนวณค่าต่างๆบนแผ่นกรวดเพลนอนันต์

จากตารางจะได้ว่า ที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากัน มุมเท่ากัน เมื่อโหมดสูงขึ้นค่ารัศมีจะเพิ่มมากขึ้น ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงขึ้น

บทที่ 4

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับมาตรฐาน IEEE 802.11

4.1 บทนำ

มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกเมื่อปีพ.ศ. 2540 โดย IEEE (The Institute of Electronics and Electrical Engineers) และเป็นเทคโนโลยีสำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด คือข้อกำหนด สำหรับอุปกรณ์โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ในส่วนของ ชั้นกายภาพ (Physical Layer) และ ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Media Access Control Layer) โดยในส่วนของชั้นกายภาพมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดให้อุปกรณ์มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1, 2, 5.5, 11 และ 54 Mbps โดยมีสื่อ 3 ประเภทให้เลือกใช้ได้แก่ คลื่นวิทยุที่ความถี่สาธารณะ 2.4 และ 5 GHz, และ อินฟราเรด (Infrared) (1 และ 2 Mbps เท่านั้น) สำหรับในส่วนของชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดให้มีกลไกการทำงานที่เรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับหลักการ CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access /Collision Detection) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 อีเธอร์เน็ต ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในโครงข่ายท้องถิ่นแบบใช้สายนำสัญญาณ นอกจากนี้ในมาตรฐาน IEEE802.11 ยังกำหนดให้มีทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่าย IEEE 802.11 โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยกลไกการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) และการตรวจสอบผู้ใช้ (Authentication) ที่เรียกว่า WEP (Wired Equivalent Privacy) ด้วย

4.2 วิวัฒนาการของมาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2540 ซึ่งอุปกรณ์ตามมาตรฐานดังกล่าว จะมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1 และ 2 Mbps ด้วยสื่อ อินฟราเรด หรือคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2.4 GHz และมีกลไก WEP ซึ่งเป็นทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากมาตรฐาน IEEE 802.11 เวอร์ชันแรกเริ่มมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำและไม่มีการรองรับหลักการคุณภาพของการบริการ (Quality of Service (QoS)) ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาด อีกทั้งกลไกรักษาความปลอดภัยก็ยังมีช่องโหว่อยู่มาก IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาหลายชุดด้วยกันเพื่อทำการปรับปรุงเพิ่มเติมมาตรฐานให้มีศักยภาพสูงขึ้น โดยคณะทำงานกลุ่มที่มีผลงานที่น่าสนใจและเป็นที่รู้จักกันดี ได้แก่ IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11e, IEEE 802.11g, และ IEEE 802.11i

IEEE 802.11b

คณะทำงานชุด IEEE 802.11b ได้ตีพิมพ์มาตรฐานเพิ่มเติมเมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด มาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary

Code Keying) ผสมกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz (เป็นย่านความถี่ที่เรียกว่า ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งถูกจัดสรรไว้อย่างสากลสำหรับการใช้งานอย่างสาธารณะด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้ก็เช่น IEEE 802.11, Bluetooth, โทรศัพท์ไร้สาย, และเตาไมโครเวฟ) ส่วนใหญ่แล้วอุปกรณ์ IEEE 802.11 โคจรข่ายท้องถิ่นไร้สาย ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะเป็นอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b นี้และใช้เครื่องหมายการค้าที่รู้จักกันดีในนาม Wi-Fi ซึ่งเครื่องหมายการค้าดังกล่าวถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคม WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) โดยอุปกรณ์ที่ได้รับเครื่องหมายการค้าดังกล่าวได้ผ่านการตรวจสอบแล้วว่าเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ยี่ห้ออื่น ๆ ที่ได้รับเครื่องหมาย Wi-Fi ได้

IEEE 802.11a

คณะกรรมการชุด IEEE 802.11a ได้ตีพิมพ์มาตรฐานเพิ่มเติมเมื่อปี พ.ศ. 2542 มาตรฐาน IEEE 802.11a ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps แต่จะใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะสำหรับใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นน้อยกว่าในย่านความถี่ 2.4 GHz อย่างไรก็ตามข้อเสียหนึ่งของมาตรฐาน IEEE 802.11a ที่ใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz ก็คือในบางประเทศย่านความถี่ดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างสาธารณะ ตัวอย่างเช่น ประเทศไทยไม่อนุญาตให้มีการใช้งานอุปกรณ์ IEEE 802.11a เนื่องจากความถี่ย่าน 5 GHz ได้ถูกจัดสรรสำหรับกิจการอื่นอยู่ก่อนแล้ว นอกจากนี้ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ IEEE 802.11a โคจรข่ายท้องถิ่นไร้สาย ก็คือรัศมีของสัญญาณมีขนาดค่อนข้างสั้น (ประมาณ 30 เมตร ซึ่งสั้นกว่ารัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11b โคจรข่ายท้องถิ่นไร้สาย ที่มีขนาดประมาณ 100 เมตร สำหรับการใช้งานภายในอาคาร) อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11a โคจรข่ายท้องถิ่นไร้สาย ยังมีราคาสูงกว่า IEEE 802.11b โคจรข่ายท้องถิ่นไร้สาย ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a โคจรข่ายท้องถิ่นไร้สาย จึงได้รับความนิยมน้อยกว่า IEEE 802.11b โคจรข่ายท้องถิ่นไร้สาย มาก

IEEE 802.11g

คณะกรรมการชุด IEEE 802.11g ได้ใช้นาเทคโนโลยี OFDM มาประยุกต์ใช้ในช่องสัญญาณวิทยุความถี่ 2.4 GHz ซึ่งอุปกรณ์ IEEE 802.11g โคจรข่ายท้องถิ่นไร้สาย มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps ส่วนรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11g โคจรข่ายท้องถิ่นไร้สาย จะอยู่ระหว่างรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11a และ IEEE 802.11b เนื่องจากความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่สาธารณะสากล อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11g โคจรข่ายท้องถิ่นไร้สาย สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ IEEE 802.11b โคจรข่ายท้องถิ่นไร้สาย ได้ (backward-compatible) ดังนั้นจึงมีแนวโน้มสูงกว่าอุปกรณ์ IEEE 802.11g โคจรข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท้องถิ่นไร้สาย จะได้รับความนิยมน้อยกว่าหลายหากมีราคาไม่แพงจนเกินไปและน่าจะมาแทนที่ IEEE 802.11b ในที่สุด ตามแผนการแล้วมาตรฐาน IEEE 802.11g จะได้รับการตีพิมพ์ประมาณช่วงกลางปี พ.ศ. 2546

IEEE 802.11e

คณะกรรมการชุดนี้ได้รับมอบหมายให้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานหลักการ Quality of Service สำหรับ application เกี่ยวกับมัลติมีเดีย (Multimedia) เนื่องจาก IEEE 802.11e เป็นการปรับปรุง MAC Layer ดังนั้นมาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ทุกเวอร์ชันได้ อย่างไรก็ตามการทำงานของคณะกรรมการชุดนี้ยังไม่แล้วเสร็จ

IEEE 802.11i

คณะกรรมการชุดนี้ได้รับมอบหมายให้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 ในด้านความปลอดภัย เนื่องจากเครือข่าย IEEE 802.11 โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย มีช่องโหว่อยู่มากโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) ด้วย key ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง คณะทำงานชุด IEEE 802.11i จะนำเอาเทคนิคขั้นสูงมาใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลด้วย key ที่มีการเปลี่ยนค่าอยู่เสมอและการตรวจสอบผู้ใช้ที่มีความปลอดภัยสูง มาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ทุกเวอร์ชันได้ แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของคณะกรรมการชุดนี้ยังไม่แล้วเสร็จในขณะนี้

4.4 โทโปโลยี (Topology)

IEEE 802.11 ประกอบด้วยกลุ่มสื่อสารได้แก่ สถานีฐาน (Access Point) และลูกข่าย (Client) กลุ่มสื่อสารนี้เรียกว่ากลุ่มบริการพื้นฐาน (Basic Service Set : BSS) โปรโตคอลชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การรวมตัวแบบแอดฮอค (Ad-Hoc) หมายถึงการติดต่อสื่อสารระหว่างลูกข่ายโดยไม่ต้องใช้สถานีฐาน และการรวมตัวแบบโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) คือการติดต่อสื่อสารโดยใช้สถานีฐานเป็นศูนย์กลางการควบคุม

ค่ากำลังงานทางด้านการรับ

เป็นค่ากำลังงานที่รับได้ ซึ่งจะรับค่านี้ต้องมากกว่าระดับความไวที่กำหนดไว้ และระดับค่านี้เรียกว่า ความไวเครื่องรับ (Received Sensitivity)

ค่าวิสัยสามารถ (Throughput)

ค่าวิสัยสามารถ เป็น จำนวนของบิตที่สามารถส่งผ่านจุดหนึ่งๆ ได้ภายใน 1 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

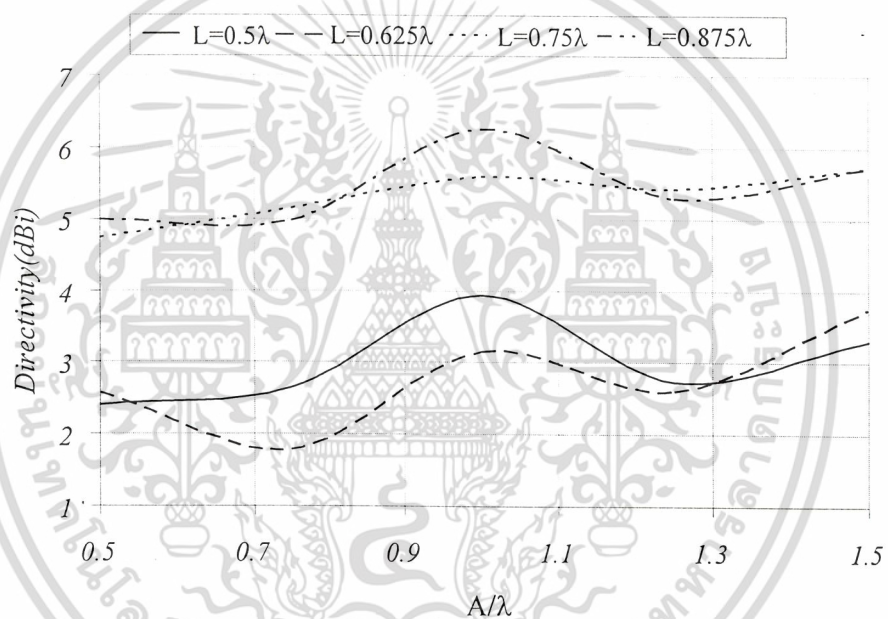
บทที่ 5

การออกแบบสร้างและทดสอบ

5.1 การออกแบบและการสร้างสายอากาศ

5.1.1 สายอากาศโมโนโพลบนระนาบตัวนำ

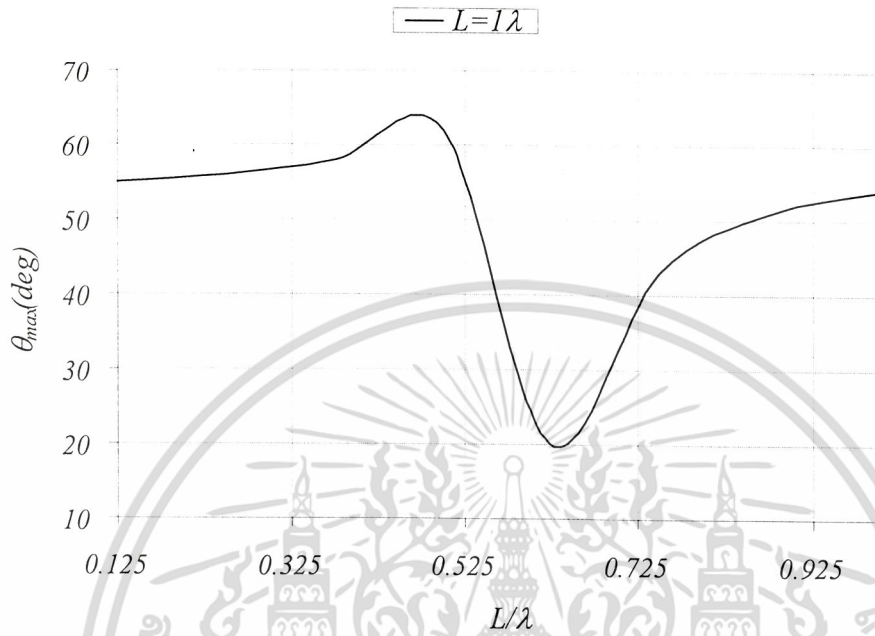
การออกแบบสายอากาศเราจะทำการเลือกสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ตรงกับความต้องการของเรา โดยจะใช้สายอากาศที่มีค่าไดเรกทิวิตีสูงและมีค่ามุมยกสูงสุดที่ต้องการ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดเรกทิวิตีและรัศมีของระนาบตัวนำ



รูปที่ 5.1 ค่าไดเรกทิวิตีเทียบกับรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำ

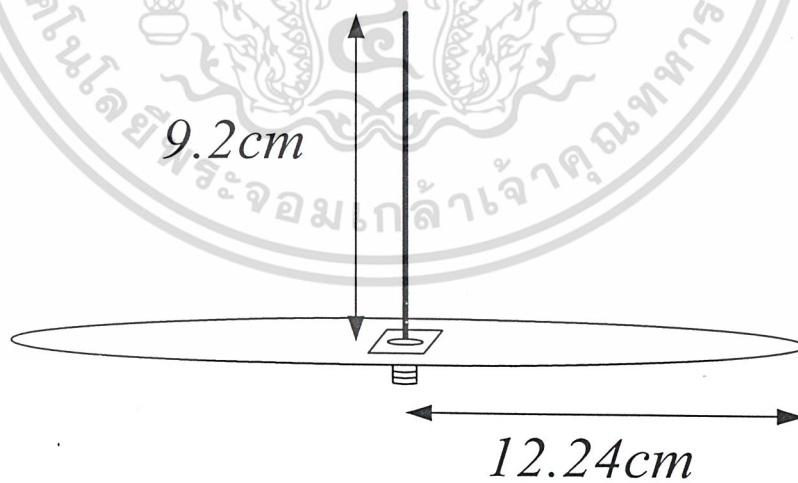
จากรูปจะเห็นว่าค่าไดเรกทิวิตีที่สูงกว่า 4 dBi อยู่ที่ค่าความยาวสายอากาศ 0.75λ และ 0.875λ โดยค่าไดเรกทิวิตีสูงสุดอยู่ที่ค่ารัศมีของแผ่นตัวนำมีค่า 1λ ดังนั้นเราจะเลือกรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำที่มีค่า 1λ

เมื่อใช้แผ่นระนาบตัวนำที่มีรัศมี 1λ และพลอตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมยกสูงสุดและความยาวสายอากาศ



รูปที่ 5.2 ค่ามุมยกสูงสุดเทียบกับความยาวสายอากาศ

เมื่อต้องการค่ามุมสูงสุดประมาณ 40 องศา จะเลือกใช้ความยาวสายอากาศ $0.75\lambda = 9.2$ เซนติเมตร ดังนั้นเมื่อทำการสร้างสายอากาศจะได้สายอากาศดังรูป



รูปที่ 5.3 สายอากาศโมโนโพลบนระนาบตัวนำ

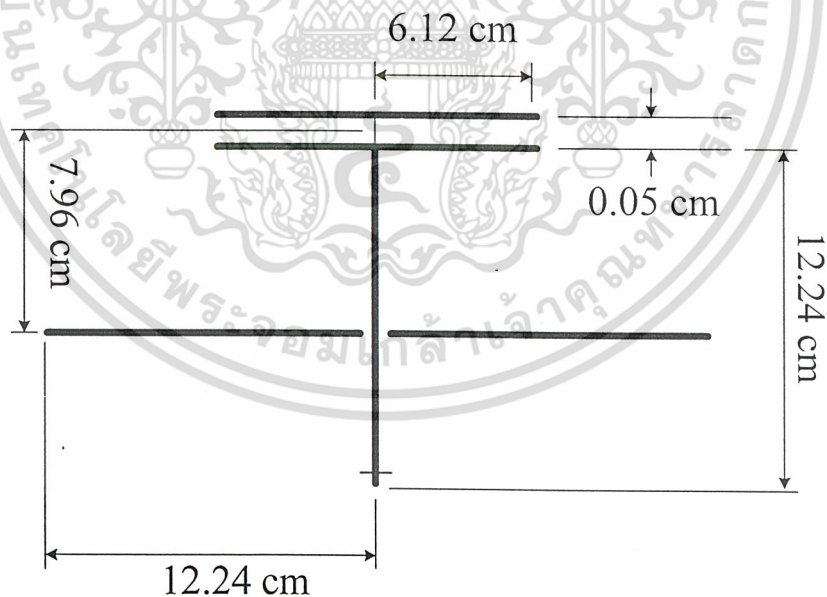
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี

ในการสร้างสายอากาศที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้งานของระบบสื่อสาร โครงข่าย ท้องถิ่นไร้สาย

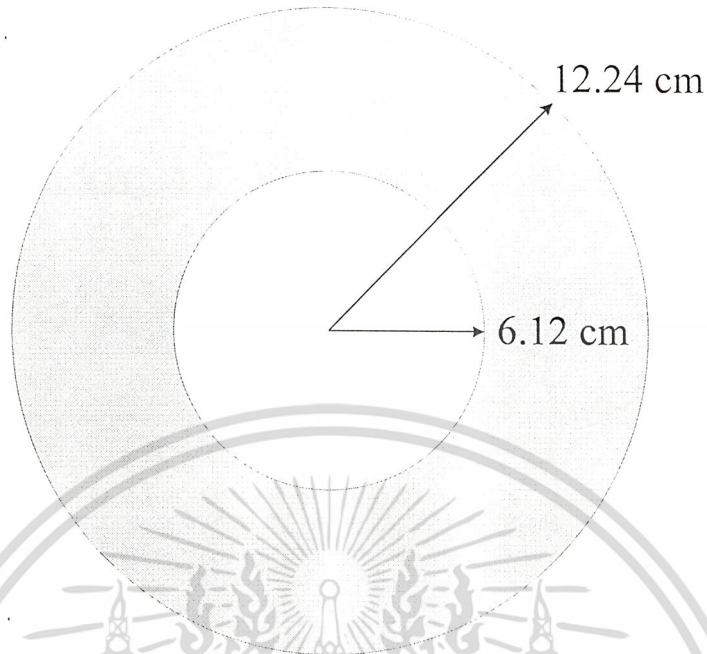
จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 จะได้ว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการสร้างสายอากาศคือ รัศมีของท่อนำคลื่นเชิงรัศมี ความสูงที่สายอากาศอยู่สูงเหนือระนาบตัวนำ และ ความยาวรัศมีของแผ่นระนาบตัวนำ โดยสายอากาศต้นแบบใช้ รัศมีของท่อนำคลื่นเชิงรัศมี (a) ยาว 0.5λ หรือประมาณ 6.12 เซนติเมตร สายอากาศอยู่เหนือระนาบตัวนำ (b) 0.65λ หรือประมาณ 7.96 เซนติเมตร รัศมีแผ่นระนาบตัวนำ(A) 1λ หรือประมาณ 12.24 เซนติเมตร ส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำที่เป็นท่อนำคลื่นเชิงรัศมี (b) ใช้ 0.04λ หรือประมาณ 0.5 เซนติเมตร เนื่องจากผลการวิเคราะห์จะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นรูปกรวย และมีค่ามุมสนามสูงสุด ในระนาบมุมยกประมาณ 40° และมีค่าสภาพแฉะจกทิศทางประมาณ 7.2 dBi ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นสายอากาศในระบบสื่อสารท้องถิ่นไร้สายภายในอาคาร

สัญญาณป้อนจากสายสัญญาณจะผ่านมาจากใต้ระนาบตัวสะท้อน โดยสายนำสัญญาณจะต้องมีความยาวเป็นจำนวนเท่าของ $\lambda/2$ ดังนั้นจึงเลือกยาว 2เท่า หรือยาว 1λ หรือประมาณ 12.24 เซนติเมตร เพราะว่าจะต้องมากกว่าความสูงของสายอากาศที่ลอยอยู่ (0.65λ) แต่หากสายยังยาวจะยังมีการลดทอนในสายนำสัญญาณ



รูปที่ 5.4 สายอากาศต้นแบบเมื่อมองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 สายอากาศต้นแบบเมื่อมองจากด้านบน

5.1.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz ค่ามุมยกสูงสุดมีค่า 40 องศา ความหนาของสารตัวกลาง(อีพ็อกซี)ประมาณ 1.5 mm ค่าเพอร์มิททิวิตีของสารอีพ็อกซี(ϵ_r)ประมาณ 4.4234 (หาได้จากตารางทดลอง) โดยใช้โปรแกรม Mathcad ช่วยในการคำนวณหาค่าต่างๆดังนี้

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9} = 12.24 \text{ cm}$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{12.24 \times 10^{-2}} = 51.33321329$$

จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบทที่ 3 เพื่อให้ที่ค่ามุมยกสูงสุดมีค่า 40 องศา จะเลือกออกแบบที่ TM_{nm} (Transverse Magnetic Mode) โหมด $n = 3$ $m = 1$ โดยใช้ค่ารัศมี $a = 0.6477\lambda = 0.0793m$ จากสมการ

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{\pi a}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (5-1-3-1)$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะได้

$$a_e = 0.0793 \left\{ 1 + \frac{2 \times 1.5 \times 10^{-3}}{\pi \times 0.0793 \times 4.4234} \left[\ln \left(\frac{\pi \times 0.0793}{2 \times 1.5 \times 10^{-3}} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}$$

$$a_e = 7.998 \times 10^{-2} \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการสนามไฟฟ้า

$$E_\theta(\theta, \phi) = j^n \frac{V a_e k_0}{2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos n\phi [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)] \quad (5-1-3-2)$$

$$E_\phi(\theta, \phi) = j^n \frac{V a_e k_0}{2} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos \theta \sin n\phi [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)] \quad (5-1-3-3)$$

จะได้สมการสนามไฟฟ้ารวมดังนี้

$$\bar{E}(\theta, \phi) = \sqrt{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2} \quad (5-1-3-4)$$

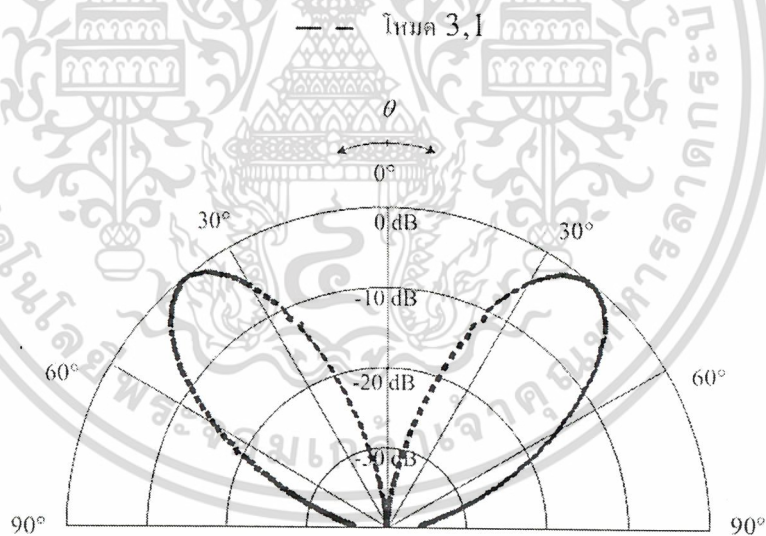
ที่มุม $\theta = 40$ องศา และมุม $\phi = 0$ องศา จะได้

$$E_\theta(\theta, \phi) = -j \frac{1.5 \times 10^{-3} \times 7.998 \times 10^{-2} \times 51.33321329 \times J_3(4.2012)}{2}$$

$$\times \begin{bmatrix} J_4(51.33321329 \times 7.998 \times 10^{-2} \times \sin 40^\circ) \\ -J_2(51.33321329 \times 7.998 \times 10^{-2} \times \sin 40^\circ) \end{bmatrix}$$

$$E_\phi(\theta, \phi) = 0$$

เมื่อใช้โปรแกรม Mathcad คำนวณสนามไฟฟ้ารวมจะได้



รูปที่ 5.6 สนามไฟฟ้าที่โหมด (3,1)

สมการความเข้มการแพร่กระจายคลื่น

$$U(\theta, \phi) = \left(\frac{j^n V a_e k_0}{960\pi} \right)^2 \left\{ \begin{array}{l} \cos^2 n\phi [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \\ + \cos^2 \theta \sin^2 n\phi [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \end{array} \right\} \quad (5-1-3-5)$$

$$U(\theta, \phi) = \left(\frac{j^n V a_e k_0}{960\pi} \right)^2 \left\{ \begin{array}{l} (1 - \sin^2 n\phi) [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \\ + \cos^2 \theta \sin^2 n\phi [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \end{array} \right\} \quad (5-1-3-6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการกำลังงานการแพร่กระจายคลื่น

$$P_{rad} = \frac{(j^n V a_e k_0)^2}{960} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \begin{aligned} & [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \\ & + \cos^2 \theta [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \end{aligned} \right\} \sin \theta d\theta \quad (5-1-3-7)$$

จากสมการที่ (4-36) และ (4-3-7) จะได้สมการของค่าสภาพเจาะจงทิศทางว่า

$$D = \frac{4 \left\{ \cos^2 \theta [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \right\}}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \begin{aligned} & [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \\ & + \cos^2 \theta [J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \end{aligned} \right\} \sin \theta d\theta} \quad (5-1-3-8)$$

ที่โหมด (3,1)

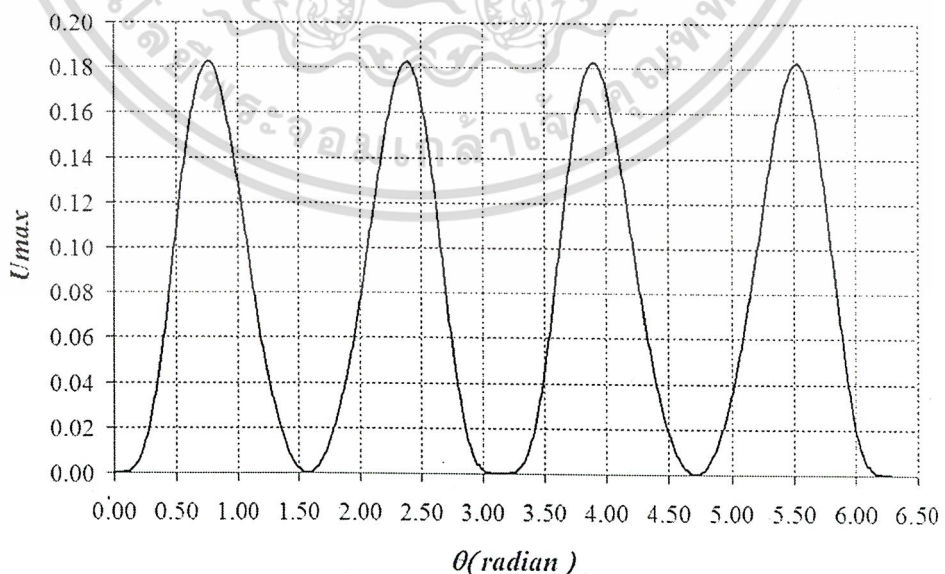
$$D = \frac{4 \left\{ \cos^2 \theta [J_4(k_0 a_e \sin \theta) - J_2(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \right\}}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \begin{aligned} & [J_4(k_0 a_e \sin \theta) - J_2(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \\ & + \cos^2 \theta [J_4(k_0 a_e \sin \theta) - J_2(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \end{aligned} \right\} \sin \theta d\theta} \quad (5-1-3-9)$$

ดังนั้นจะหาสมการ U_{max} ที่มุม $\phi = 90$ องศา ได้

$$U_{max} = \left\{ \cos^2 \theta [J_4(k_0 a_e \sin \theta) - J_2(k_0 a_e \sin \theta)]^2 \right\}$$

$$U_{max} = \left\{ \cos^2 \theta \left[\begin{aligned} & J_4(7.998 \times 10^{-2} \times 51.33321329 \times \sin \theta) \\ & - J_2(7.998 \times 10^{-2} \times 51.33321329 \times \sin \theta) \end{aligned} \right]^2 \right\} \quad (5-1-3-10)$$

นำสมการ (5-1-3-10) ไปพล็อตกราฟจะได้



รูปที่ 5.7 การหาค่าความเข้มการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะได้ $U_{\max} = 0.1825$ เมื่อแทนค่าในสมการที่ (5-1-3-9) จะได้

$$D = \frac{4 \times 0.1825}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \left[J_4(k_0 a_e \sin \theta) - J_2(k_0 a_e \sin \theta) \right]^2 + \cos^2 \theta \left[J_4(k_0 a_e \sin \theta) - J_2(k_0 a_e \sin \theta) \right]^2 \right\} \sin \theta d\theta} \quad (5-1-3-11)$$

คำนวณ โดยใช้โปรแกรม Mathcad จะได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางดังนี้

$$D = 7.241 \text{ dBi}$$

จากสมการแอดมิตแทนซ์เนื่องจากความสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่น

$$G_{\text{rad}} = \frac{(a_e k_0)^2}{480} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \left[J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta) \right]^2 + \cos^2 \theta \left[J_{n+1}(k_0 a_e \sin \theta) + J_{n-1}(k_0 a_e \sin \theta) \right]^2 \right\} \sin \theta d\theta$$

จะได้

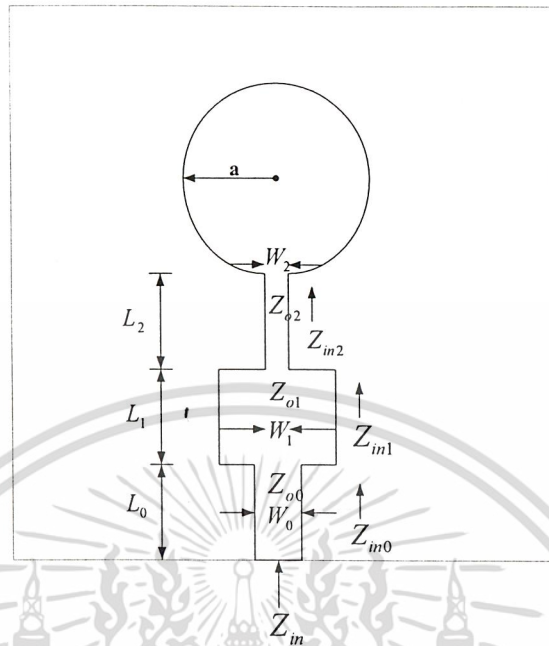
$$G_{\text{rad}} = \frac{(7.998 \times 10^{-2} \times 51.33321329 \times)^2}{480} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \left[J_4(7.998 \times 10^{-2} \times 51.33321329 \times \sin \theta) - J_2(7.998 \times 10^{-2} \times 51.33321329 \times \sin \theta) \right]^2 + \cos^2 \theta \left[J_4(7.998 \times 10^{-2} \times 51.33321329 \times \sin \theta) + J_2(7.998 \times 10^{-2} \times 51.33321329 \times \sin \theta) \right]^2 \right\} \sin \theta d\theta$$

$$G_{\text{rad}} = 4.835 \times 10^{-3}$$

สายส่งไมโครสตริปแบบสามตอน

ให้ตอนแรกและตอนที่สองมีความยาวประมาณ $\frac{\lambda_g}{4}$ ส่วนตอนสุดท้ายมีความยาวประมาณ $\frac{\lambda_g}{2}$ (เมื่อ

λ_g คือ ความยาวของคลื่นที่อยู่ในสารตัวกลาง) ซึ่งการทำเป็นสามตอนแบบนี้ จะเป็นการปรับค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ให้มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม พร้อมทั้งปรับค่า VSWR ไปพร้อมกันด้วย



รูปที่ 5.8 การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริปสามตอน

จากรูปที่ 5.8 กำหนดให้ความยาว L_2 เท่ากับ L_1 และทั้งคู่ยาว $\frac{\lambda_g}{4}$ และให้ L_0 มีความยาว $\frac{\lambda_g}{2}$ ซึ่ง

จากสมการของสายส่งสัญญาณจะได้

$$Z_{in} = Z_o \frac{Z_r + jZ_o \tan(\beta_g L)}{Z_o + jZ_r \tan(\beta_g L)} \quad (5-1-3-12)$$

- เมื่อ $L_1 = \frac{\lambda_g}{4}$ และ $\beta_g = \frac{2\pi}{\lambda_g}$ ดังนั้น

$$Z_{in0} = Z_{o1} \frac{Z_{in1} + jZ_{o1} \tan\left(\frac{\pi}{2}\right)}{Z_{o1} + jZ_{in1} \tan\left(\frac{\pi}{2}\right)} \quad (5-1-3-13)$$

โดย $\tan\left(\frac{\pi}{2}\right) = \infty$

$$\text{ดังนั้น } Z_{in0} = \frac{Z_{o1}^2}{Z_{in1}} \quad (5-1-3-14)$$

- เมื่อ $L_2 = \frac{\lambda_g}{4}$ และ $\beta_g = \frac{2\pi}{\lambda_g}$ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{in1} = Z_{o2} \frac{Z_{in2} + jZ_{o2} \tan\left(\frac{\pi}{2}\right)}{Z_{o2} + jZ_{in2} \tan\left(\frac{\pi}{2}\right)} \quad (5-1-3-15)$$

โดย $\tan\left(\frac{\pi}{2}\right) = \infty$

ดังนั้น $Z_{in1} = \frac{Z_{o2}^2}{Z_{in2}} \quad (5-1-3-16)$

- เมื่อ $L_0 = \frac{\lambda_g}{2}$ และ $\beta_g = \frac{2\pi}{\lambda_g}$ ดังนั้น

$$Z_{in} = Z_{o0} \frac{Z_{in0} + jZ_{o0} \tan(\pi)}{Z_{o0} + jZ_{in0} \tan(\pi)} \quad (5-1-3-17)$$

โดย $\tan(\pi) = 0$

ดังนั้น $Z_{in} = Z_{in0}$

เราต้องการให้ $Z_{in} = 50$ โอห์ม ดังนั้นต้องใช้ $Z_{in0} = 50$ โอห์ม ด้วย

จะได้ว่า $Z_{in} = Z_{in0} = 50$

จาก $G_{rad} = 4.835 \times 10^{-3}$ จะได้อินพุทอิมพีแดนซ์เท่ากับ 206.8252327 โอห์ม นั่นคือ

$$Z_{in2} = 206.8252327 \text{ โอห์ม}$$

จาก $Z_{in0} = \frac{Z_{o1}^2}{Z_{in1}}$ และ $Z_{in1} = \frac{Z_{o2}^2}{Z_{in2}}$ จะได้ว่า

$$Z_{in0} = \frac{Z_{o1}^2}{Z_{in1}} = 50 \text{ และ } Z_{in1} = \frac{Z_{o2}^2}{206.8252327}$$

และเมื่อนำทั้งสองสมการมารวมกันจะได้

$$\frac{Z_{o1}^2}{Z_{o2}^2} = 50$$

$$206.8252327$$

$$\frac{Z_{o1}}{Z_{o2}} = \sqrt{\frac{50}{206.8252327}} = 0.49168$$

จะเห็นว่าเราสามารถปรับค่า Z_{o1} และ Z_{o2} ให้มีค่าตามที่ต้องการได้ เพื่อให้ความกว้างของแต่ละช่วงมีค่าที่พอเหมาะ

เมื่อให้ $Z_{o2} = 55$ โอห์ม จะได้ $Z_{o1} = 27.0424$ โอห์ม

การหาความกว้างจะหาจาก

$$A = \frac{Z_o}{60} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \right) + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (5-1-3-18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_o\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5-1-3-19)$$

เมื่อ A มีค่ามากกว่า 1.52 และ $Z_o\sqrt{\epsilon_r}$ มีค่ามากกว่า 89.91

$$W = h \frac{8 \times e^A}{e^{2A} - 2} \quad (5-1-3-20)$$

เมื่อ A มีค่าน้อยกว่า 1.52 และ $Z_o\sqrt{\epsilon_r}$ มีค่าน้อยกว่า 89.91

$$W = \frac{2h}{\pi} (B - 1 - \ln(2B - 1)) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} (\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r}) \quad (5-1-3-21)$$

- หา W_2

จากสมการ (4-1-3-18) จะได้

$$A = \frac{55}{60} \left(\sqrt{\frac{4.4234 + 1}{2}} \right) + \frac{4.4234 - 1}{4.4234 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.4234} \right)$$

$$A = 1.670376587 \text{ มากกว่า } 1.52$$

ดังนั้น $W_2 = \frac{(1.5 \times 10^{-3})(8 \times e^{1.67})}{e^{2 \times 1.67} - 2} = 2.431279054 \times 10^{-3} \text{ เมตร}$

- หา W_1

จากสมการ (5-1-3-18) จะได้

$$A = \frac{27.0424}{60} \left(\sqrt{\frac{4.4234 + 1}{2}} \right) + \frac{4.4234 - 1}{4.4234 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.4234} \right)$$

$$A = 0.9030690627 \text{ น้อยกว่า } 1.52$$

$$B = \frac{60\pi^2}{27.0424\sqrt{4.4234}} = 10.4118441$$

ดังนั้น

$$W_1 = \frac{2 \times 1.5 \times 10^{-3}}{\pi} (10.4118441 - 1 - \ln(2 \times 10.4118441 - 1)) + \frac{4.4234 - 1}{2 \times 4.4234} (\ln(10.4118441 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{4.4234})$$

$$W_1 = \frac{3 \times 10^{-3}}{\pi} (6.42496650 + 0.9651156717)$$

$$W_1 = 7.057008649 \times 10^{-3} \text{ เมตร}$$

และเพื่อให้ VSWR ที่ดี ต้องทำให้ $Z_{o0} = 50$ โอห์ม ด้วย

- หา W_0

จากสมการ (4-1-3-18) จะได้

$$A = \frac{50}{60} \left(\sqrt{\frac{4.4234 + 1}{2}} \right) + \frac{4.4234 - 1}{4.4234 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.4234} \right)$$

$$A = 1.533 \text{ มากกว่า } 1.52$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น $W_0 = \frac{(1.5 \times 10^{-3})(8 \times e^{1.533})}{e^{2 \times 1.533} - 2} = 2.856953694 \times 10^{-3}$ เมตร

และเนื่องจากคลื่นที่เดินทางเข้ามายังไมโครสตริปจะมีความยาวคลื่นเท่ากับ

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (5-1-3-22)$$

เมื่อ $w = \frac{\lambda_0}{2} \left(\frac{2}{\epsilon_r + 1} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{0.12245}{2} \left(\frac{2}{4.4234 + 1} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.0743597582$ เมตร

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\epsilon_{re} = \frac{4.4234 + 1}{2} + \frac{4.4234 - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{1.5 \times 10^{-3}}{0.0743597582} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

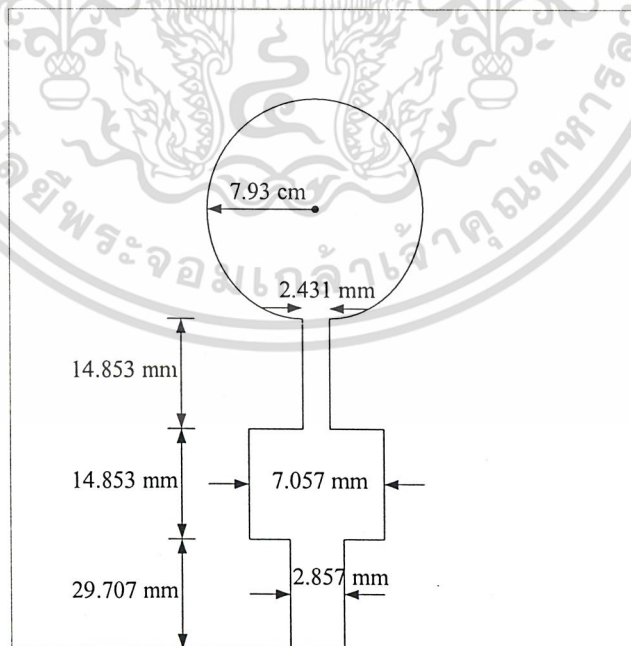
$$\epsilon_{re} = 4.247572773$$

ดังนั้น จะได้ว่า $\lambda_g = \frac{0.12245}{\sqrt{4.247572773}} = 0.0594139$ เมตร

จาก $L_1 = L_2 = \frac{\lambda_g}{4} = 14.85348575 \times 10^{-3}$ เมตร

และ $L_0 = \frac{\lambda_g}{2} = 29.7069715 \times 10^{-3}$ เมตร

ดังนั้น จะได้ขนาดของสายอากาศดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ขนาดของไมโครสตริปรูปร่างกลมโดยใช้สายส่งสามตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดสอบสายอากาศ

5.2.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์

นำสายอากาศต้นแบบที่สร้างมาวัดคุณสมบัติโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) จากนั้นทำการคาร์ริเบรตแล้วทำการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอินพุทอิมพีแดนซ์

5.2.2 การทดสอบแบบรูปสายอากาศ

ทำการป้อนกระแสผ่านตัวเชื่อมต่อที่อยู่ด้านหลังของแผ่นระนาบตัวนำ จากนั้นทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยนำสายอากาศส่งและรับไปติดตั้งในห้องทดสอบโดยวางห่างกันที่ระยะสนามระยะไกลซึ่งมีค่า $= 2D^2 / \lambda$

เมื่อ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศทั้งตัวส่งและรับรวมกัน
 λ เป็นความยาวคลื่น

ในที่นี้เราจะใช้

สายอากาศส่งที่มีค่า $D_t = 12.2$ เซนติเมตร

สายอากาศรับที่มีค่า $D_r = 24.48$ เซนติเมตร

ความยาวคลื่นที่ใช้มีค่า 12.2 เซนติเมตร

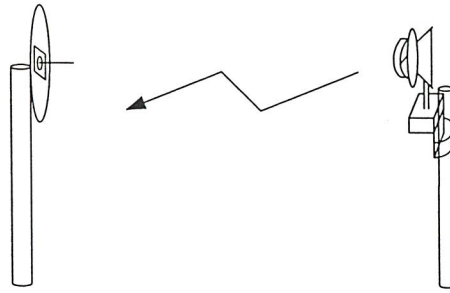
ดังนั้นจะได้บริเวณสนามระยะไกลที่ระยะ 2.198 เมตร

นำไปใช้ในการทดสอบดังรูป



รูปที่ 5.10 การทดสอบแบบรูปของสายอากาศในระนาบมุมกวาด

จากรูปเป็นการทดสอบหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด ถ้าต้องการหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกต้องเก็บค่าโดยการกำหนดค่ามุมกวาดไว้ 2 ค่าคือ 0 องศาและ 90 องศา ดังรูป



รูปที่ 5.11 การทดสอบแบบรูปของสายอากาศในระนาบมุมยก

ทำการทดสอบโดยใช้รีโมตควบคุมการหมุนของฐานสายอากาศรับให้หมุนครั้งละ 5 องศา วัดค่าแล้วนำมาพล็อตแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

จากนั้นทำการเปลี่ยนสายอากาศเป็นสายอากาศที่เหลื่อ แล้วคำนวณค่าบริเวณสนามระยะไกลใหม่ แล้วหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยวิธีดังกล่าวข้างต้นจนครบ

5.3 การวัดค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

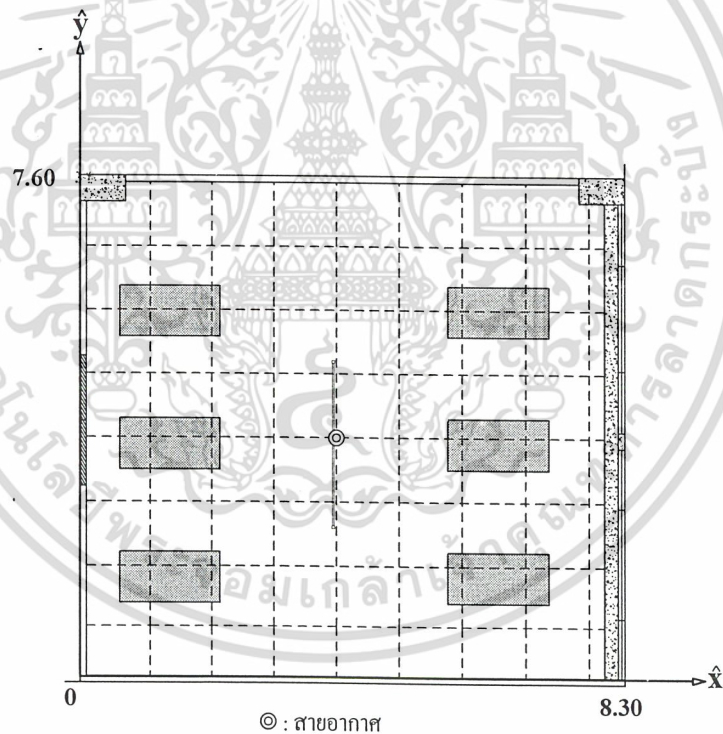
ซึ่งในการทดสอบนั้นจะให้เส้นทางส่งนั้นมองเห็นกันโดยไม่มีสิ่งกีดขวางเพื่อลดการสะท้อน และใช้ระยะทางในการทดสอบเป็นระยะสนามระยะไกล โดยมีการขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. จำนวนระยะที่ใช้ทดสอบ
2. วัดความสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณ โดยการนำสายสัญญาณด้านหนึ่งต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณแล้วอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับเครื่องวัดสเปคตรัม แล้วส่งสัญญาณความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ที่มีขนาดเป็น 0 ดีบีเอ็ม ออกไป แล้วทำการวัดค่ากำลังงานทางด้านรับก็จะได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณ
3. ติดตั้งสายอากาศที่จะทดสอบ ได้แก่สายอากาศโมโนโพลบนระนาบตัวนำสองตัวซึ่งได้สร้างโดยข้อสมมุติให้มีคุณสมบัติที่เหมือนกันทุกประการ นำไปติดตั้งโดยหันลำคลื่นที่มีความแรงสูงสุดเข้าหากัน
4. ส่งสัญญาณที่สายอากาศทางด้านส่งและบันทึกค่าความเข้มสัญญาณที่สายอากาศด้านรับ
5. ค้นหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศโมโนโพล
6. เปลี่ยนสายอากาศรับเป็นสายอากาศที่เหลื่อ แล้วทำลักษณะเดียวกับข้อ 3 ถึง 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

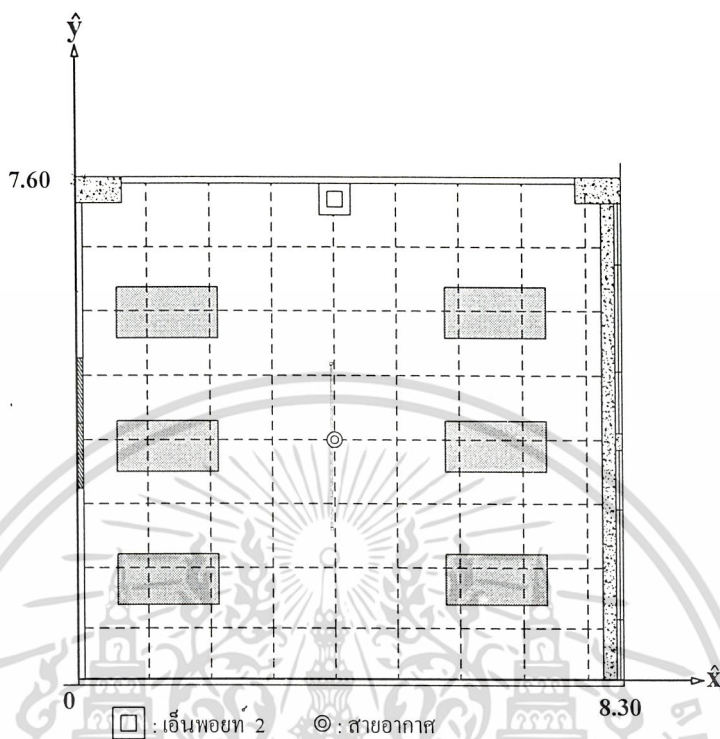
5.4 การทดสอบประสิทธิภาพ

สถานที่ทดสอบคือ ห้องสัมมนาที่ 2 ชั้นที่ 9 อาคารกรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์ ซึ่งเป็นห้องโล่ง สามารถเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ภายในห้องและสิ่งที่เป็นต่อการทดสอบเข้าและออกห้องดังกล่าวได้อย่างสะดวก การวัดเริ่มจากจุดมุมขวาบนของห้องโล่งมาจนไปสุดที่มุมซ้ายบนของห้อง โดยที่แต่ละจุดห่างกัน 1 เมตร โดยจะทำการวัดทั้งหมด 56 จุดทั่วห้อง อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.12 สำหรับการทดสอบการวัดกำลังงานรับ และดังรูปที่ 5.13 สำหรับการทดสอบการวัดค่าวิสัยสามารถ โปรแกรมที่ใช้วัดกำลังงานรับ คือ โปรแกรม NetStumBler ซึ่งวัดกำลังงานรับจากการ์ดโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายมีหน่วยเป็น คีบีเอ็ม แต่ละจุด โปรแกรมจะทำการบันทึกค่า 60 ตัวอย่างซึ่งบันทึกระยะเวลาต่างกัน 1 วินาที ค่าวิสัยสามารถสามารถวัดโดย โปรแกรม Chariot ขั้นตอนการทำงานเริ่มจาก ลูกข่ายส่งไฟล์คำสั่งไปยังคอมพิวเตอร์อีกเครื่องโดยผ่านสถานีฐานเพื่อเตรียมพร้อม จากนั้นลูกข่ายส่งไฟล์ขนาด 100,000 ไบต์ผ่านสถานีฐานไปยังคอมพิวเตอร์อีกตัวเพื่อคำนวณค่าวิสัยสามารถ แต่ละจุดทำการวัดมากกว่า 20 ครั้ง



รูปที่ 5.12 การทดสอบการวัดกำลังงานด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 การทดสอบการวัดค่าวิสัยสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

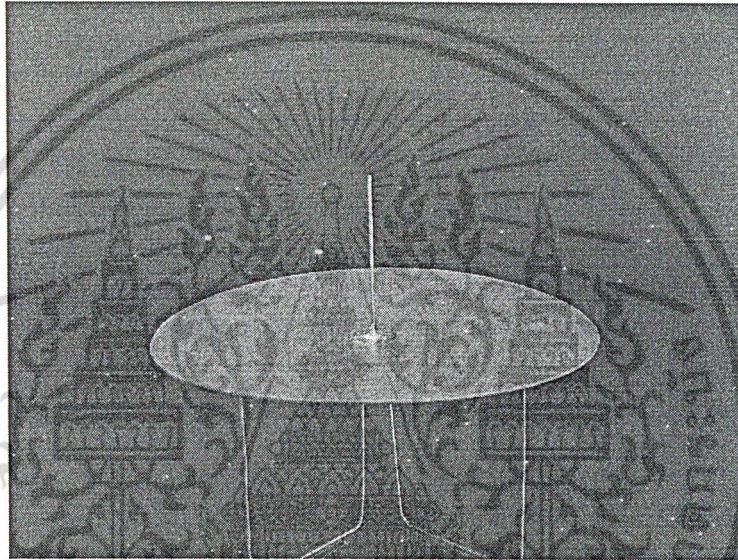
บทที่ 6

ผลการทดลอง

6.1 สายอากาศต้นแบบ

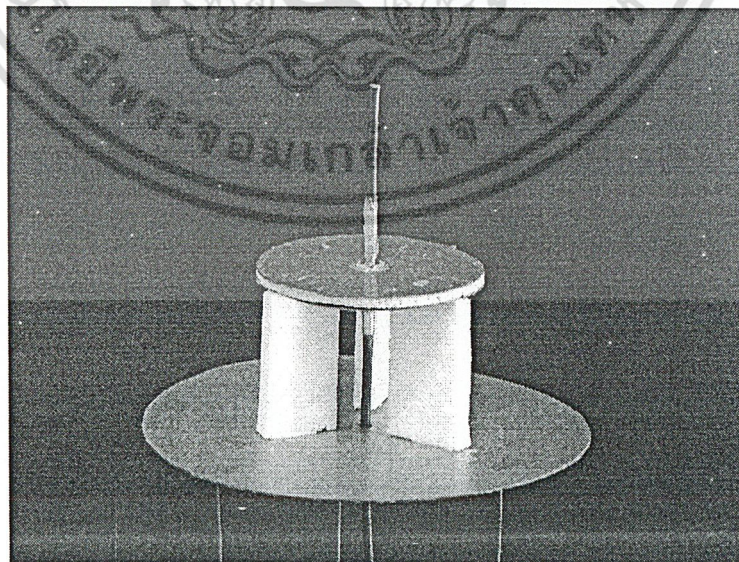
จากการวิเคราะห์และออกแบบในบทที่ผ่านมาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ ได้ดังรูป

6.1.1 สายอากาศโมโนโพล



รูปที่ 6.1 สายอากาศโมโนโพลต้นแบบ

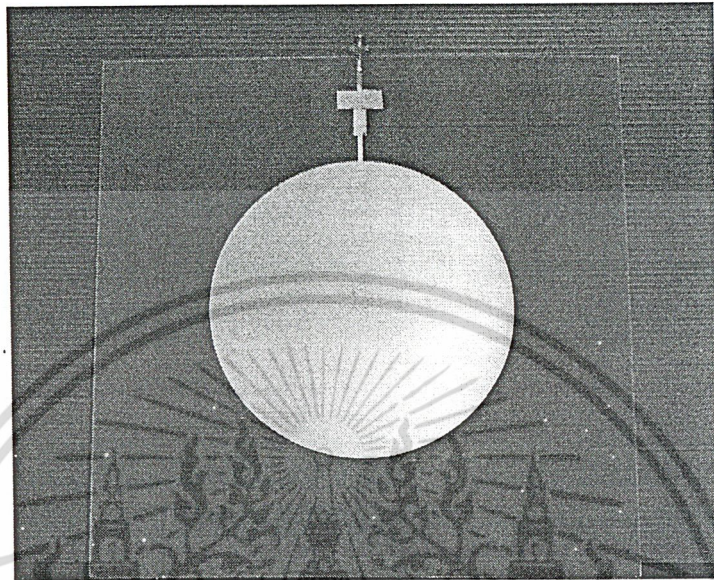
6.1.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี



รูปที่ 6.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมีต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม



รูปที่ 6.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมต้นแบบด้านหน้า



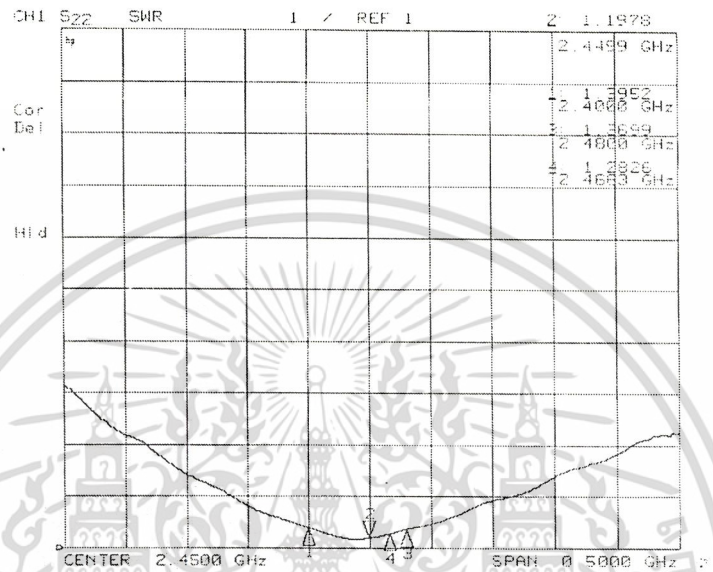
รูปที่ 6.4 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมต้นแบบด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

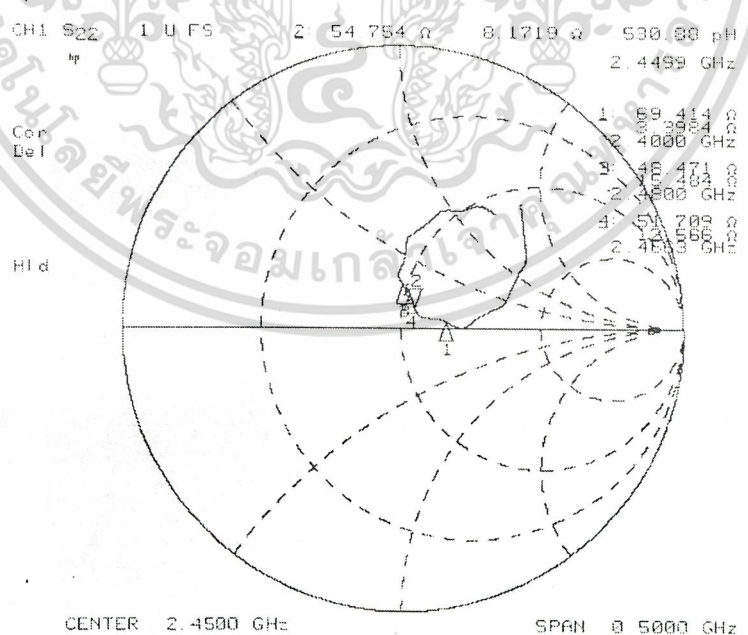
6.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์

6.2.1 สายอากาศโมนโพล

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์จะได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและอินพุทอิมพีแดนซ์ดังรูป



รูปที่ 6.5 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

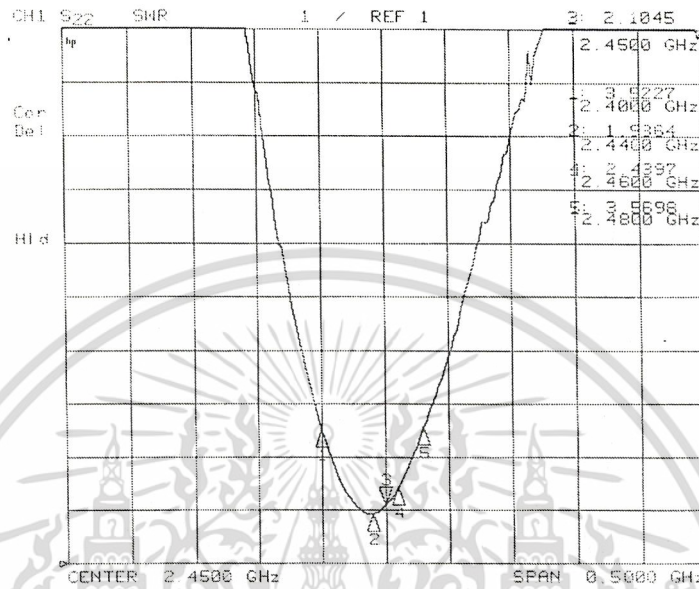


รูปที่ 6.6 อินพุทอิมพีแดนซ์

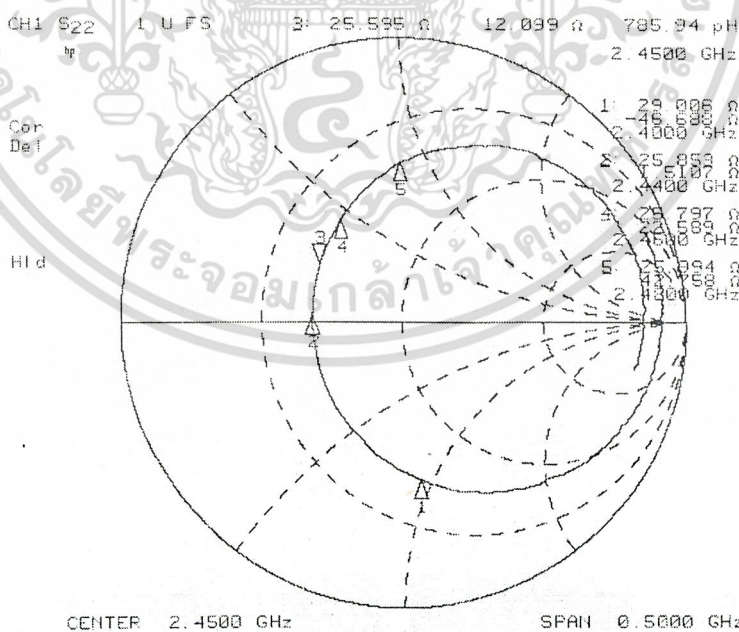
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์จะได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและอินพุทอิมพีแดนซ์ดังรูป



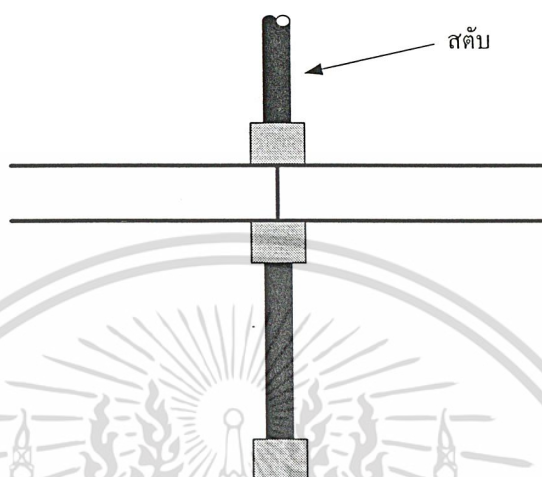
รูปที่ 6.7 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง



รูปที่ 6.8 อินพุทอิมพีแดนซ์

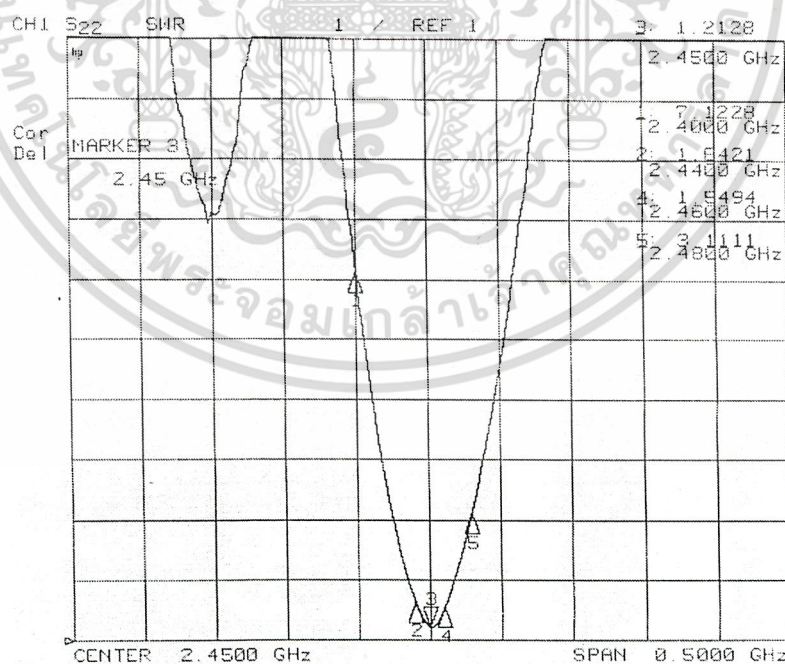
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าในช่วงความถี่ที่ใช้งานยังคงมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่สูงมาก ดังนั้นจึงได้ทำการแมทซ์ซิ่ง โดยใช้สตัด ซึ่งสตัดเป็นส่วนหนึ่งของสายนำสัญญาณที่นำมาต่อเพื่อปรับค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ โดยมีลักษณะการต่อดังภาพ



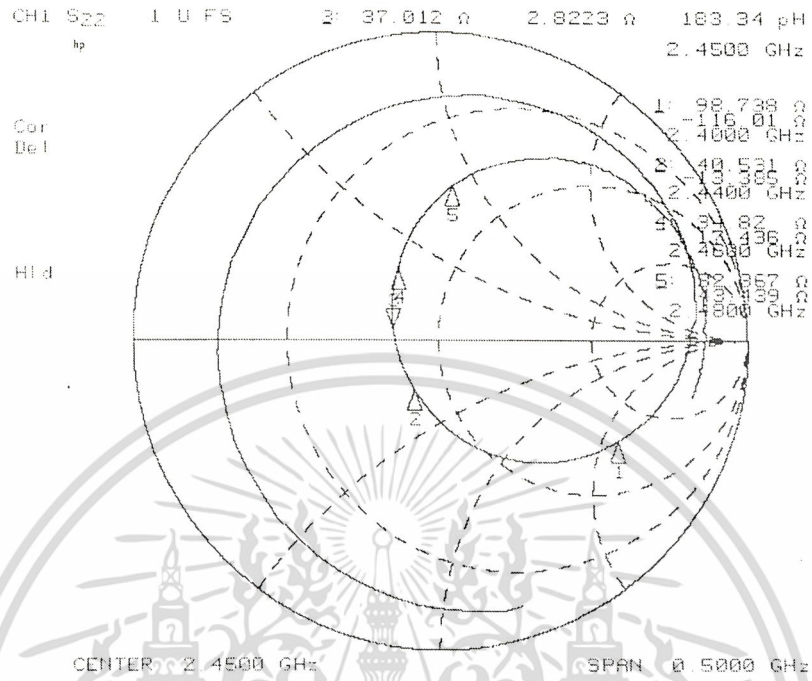
รูปที่ 6.9 การต่อสตัดเข้ากับสายอากาศต้นแบบ

จากนั้นจึงทำการปรับความยาวของสตัดจนได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต้องการ แล้วทำการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าใหม่อีกครั้ง ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังภาพ



รูปที่ 6.10 อัตราส่วนคลื่นนิ่งหลังการแมทซ์ซิ่ง

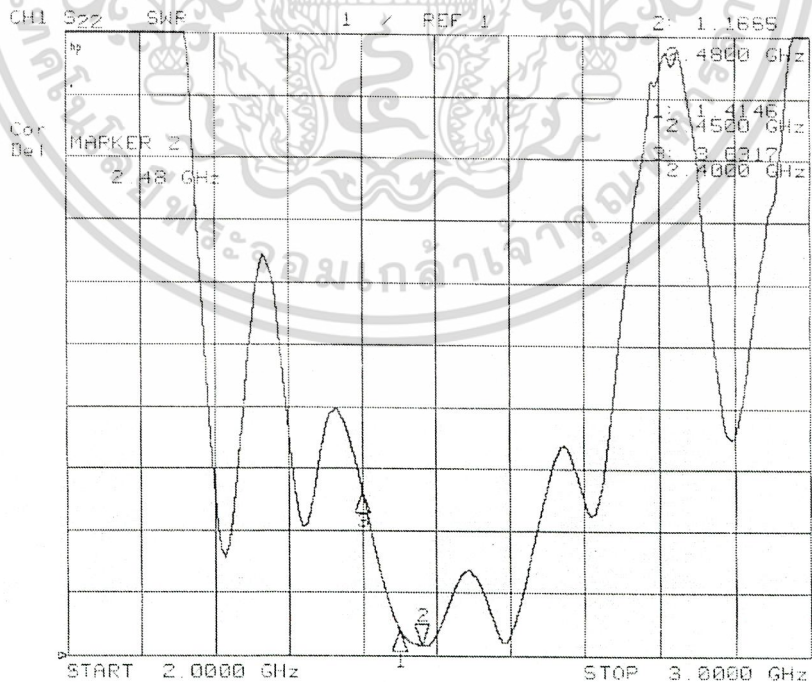
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.11 อินพุทอิมพีแดนซ์หลังการแมทซ์ริง

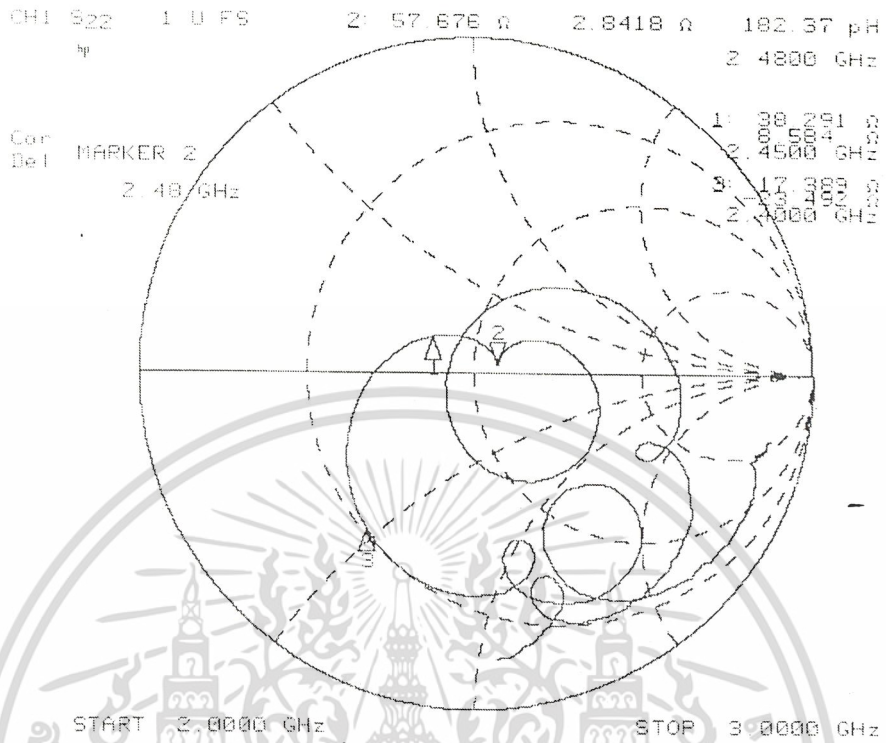
6.2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์จะได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและอินพุทอิมพีแดนซ์ดังรูป



รูปที่ 6.12 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

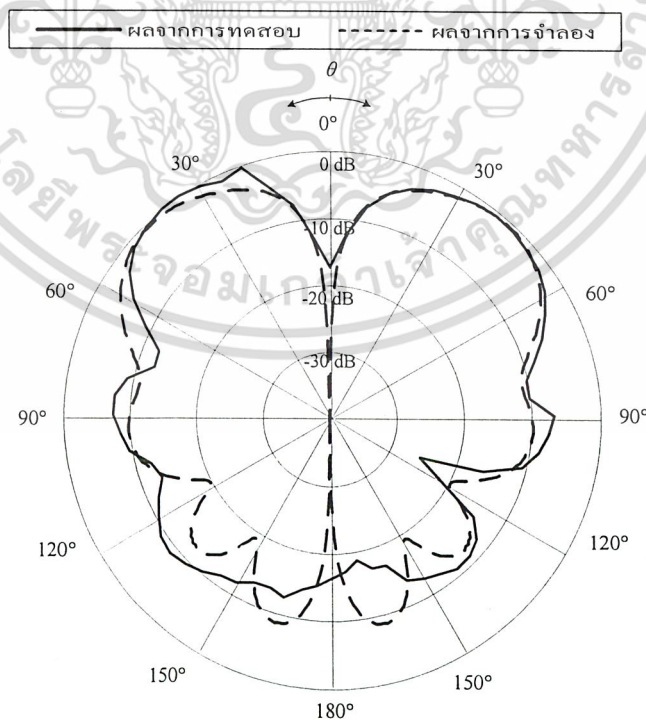
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 อินพุทอิมพีแดนซ์

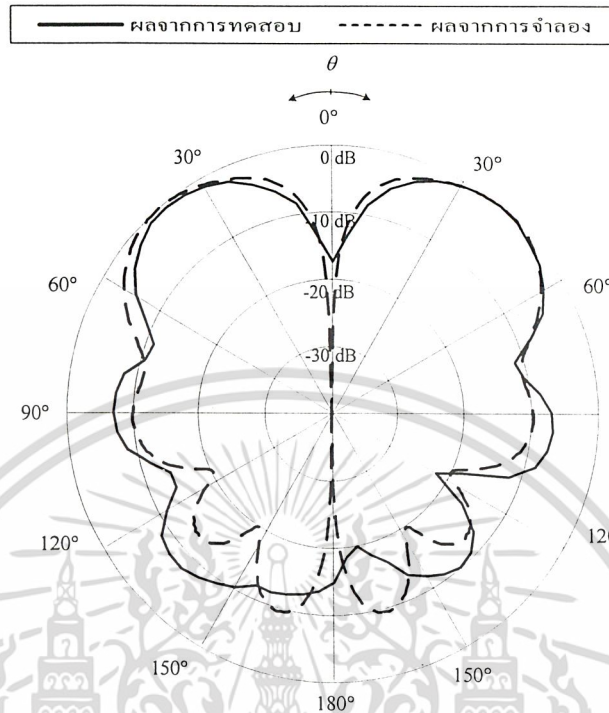
6.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

6.3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโมโนโพล

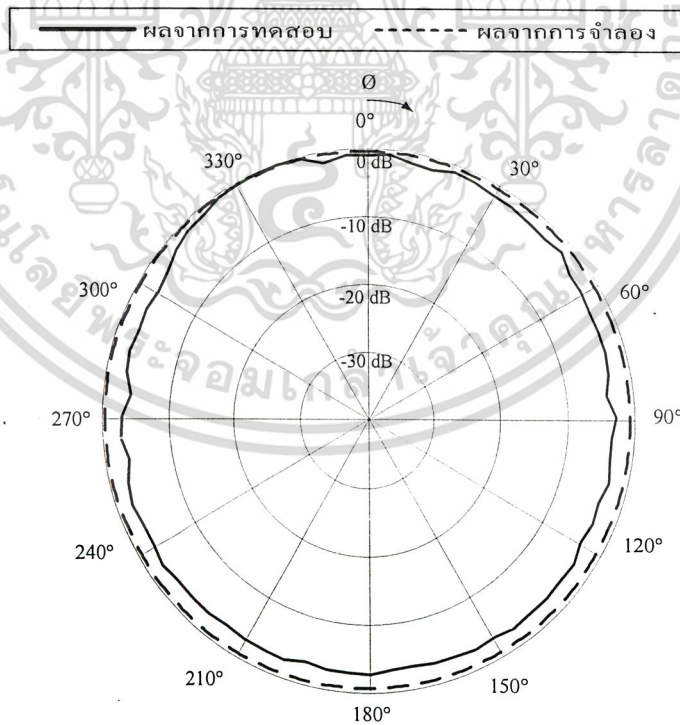


รูปที่ 6.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกขณะที่มีมุมกวาดมีค่า 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกขณะที่มีมุมกวาดมีค่า 90 องศา

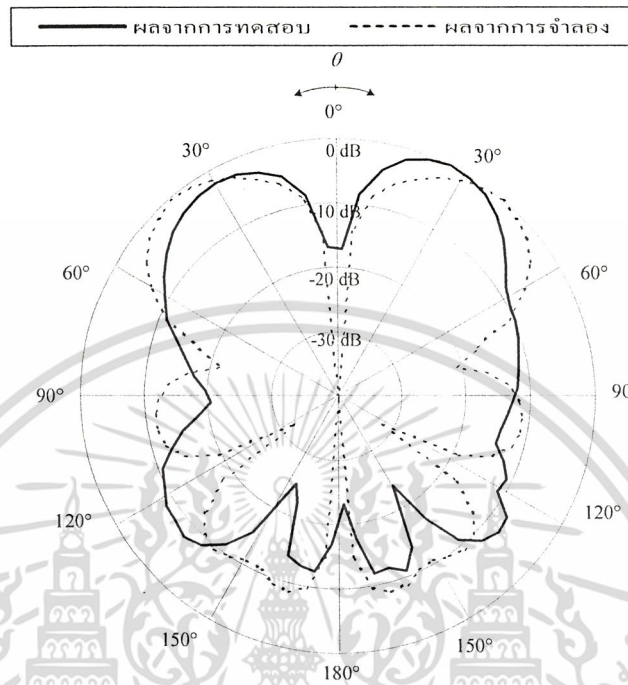


รูปที่ 6.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาด

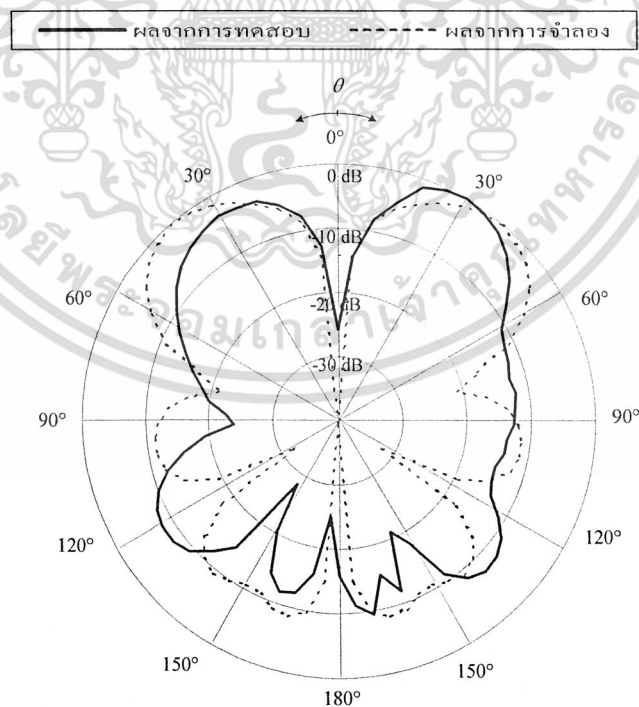
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2 สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี

จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศก่อนการแมทซ์จึง จะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นดังนี้

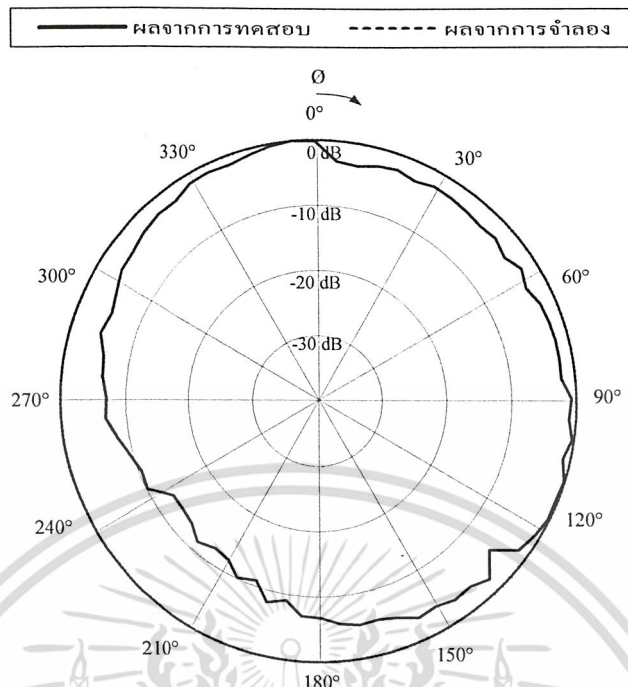


รูปที่ 6.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกขณะที่มีมุมกวาดมีค่า 0 องศา

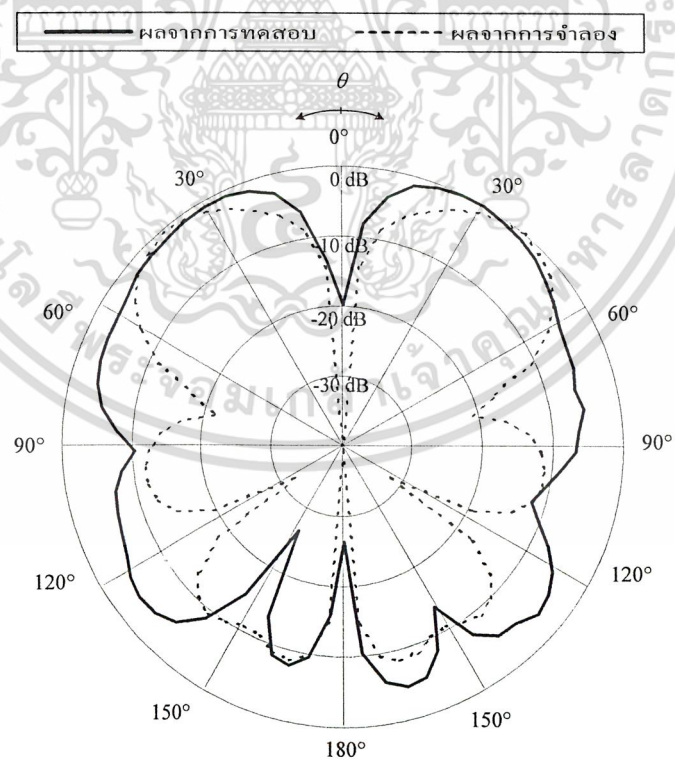


รูปที่ 6.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกขณะที่มีมุมกวาดมีค่า 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

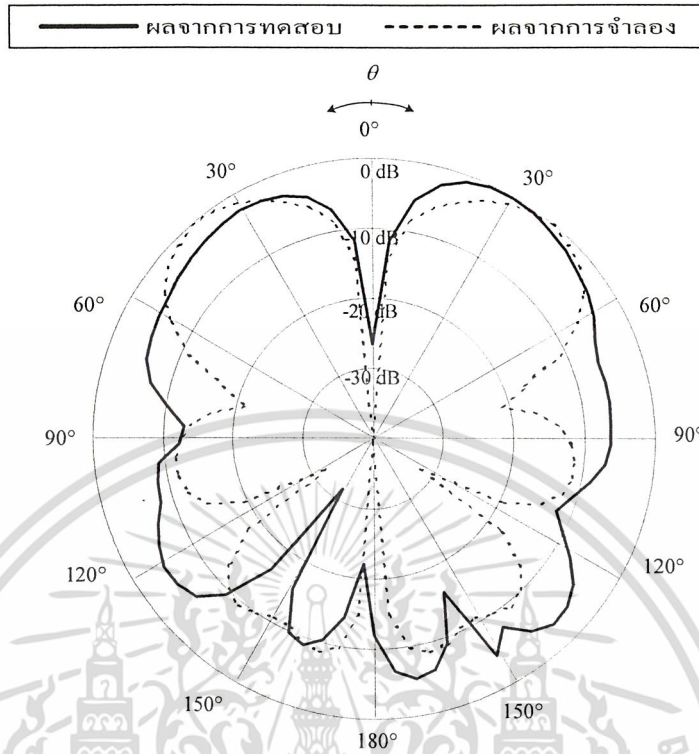


รูปที่ 6.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดขณะที่มีมุมยกมีค่า 90 องศา จากนั้นนำสายอากาศตัวเดิมนั้นไปแมตซ์ซิ่งโดยใช้วิธีสลับแมตซ์ซิ่ง แล้ววัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเหมือนเดิมจะได้

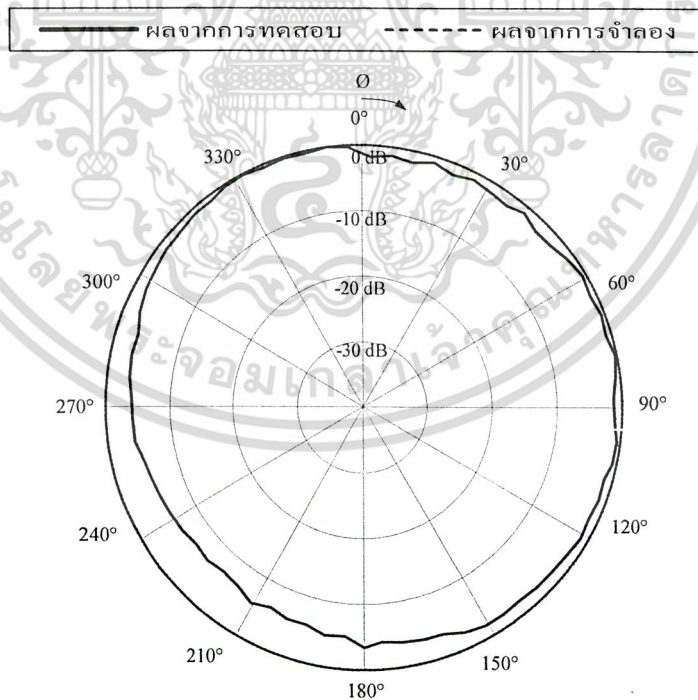


รูปที่ 6.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกขณะที่มีมุมกวาดมีค่า 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกขณะที่มีมุมกวาดมีค่า 90 องศา

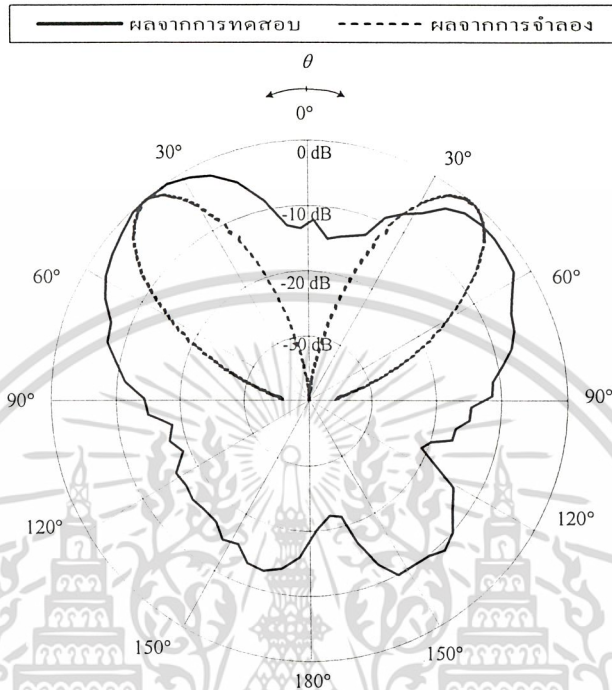


รูปที่ 6.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดขณะที่มีมุมยกมีค่า 90 องศา ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าสายอากาศหลังแมทซ์ซึ่งแล้วมีลำคลื่นที่กว้างออกกว่าก่อนการแมทซ์ซึ่ง

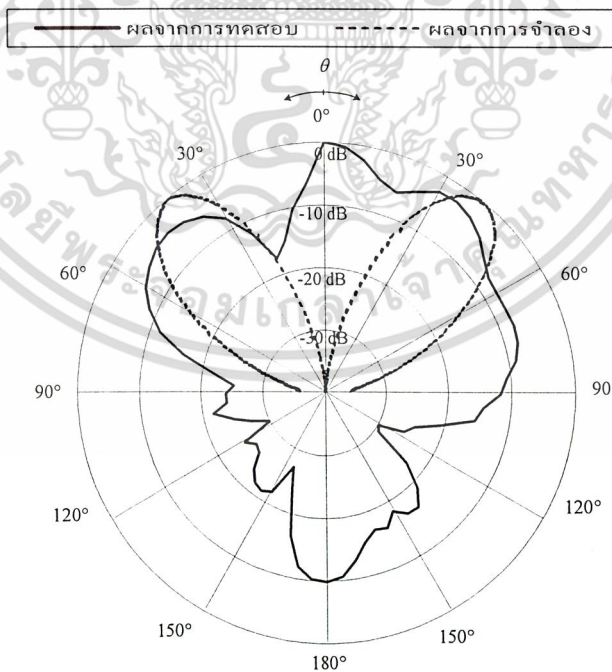
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

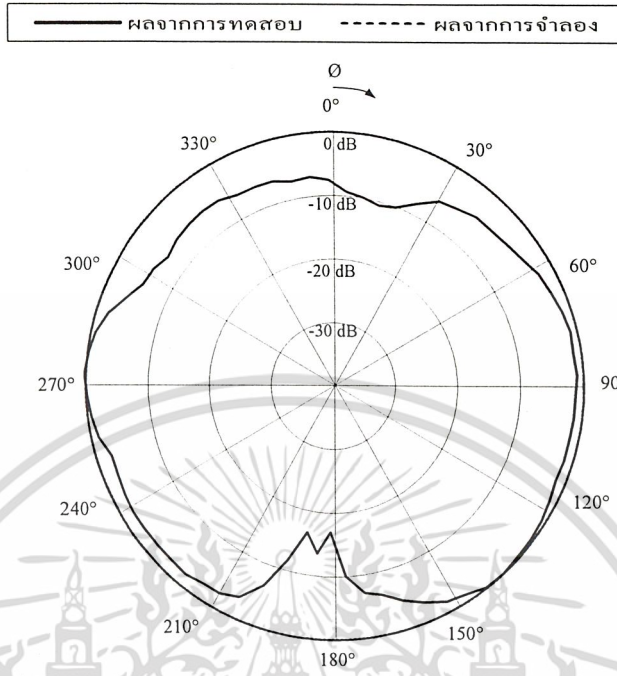


รูปที่ 6.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกขณะที่มีมุมกวาดมีค่า 0 องศา



รูปที่ 6.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมยกขณะที่มีมุมกวาดมีค่า 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบมุมกวาดขณะที่มุมยกมีค่า 90 องศา

6.4 การวัดค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

จากสมการของฟรีสส์ (Friss)

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 20 \log \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) - L_{tt} - L_{rr} \quad \dots(\text{dB})$$

- โดยที่ P_r คือ กำลังงานทางด้านรับ
- P_t คือ กำลังงานทางด้านส่ง
- G_t คือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศส่ง
- G_r คือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศรับ
- r คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่ง
- L_{tt} คือ ความสูญเสียเนื่องจากความยาวของสายนำสัญญาณทางด้านส่ง
- L_{rr} คือ ความสูญเสียเนื่องจากความยาวของสายนำสัญญาณทางด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในการทดสอบนั้นจะให้เส้นทางส่งนั้นมองเห็นกันโดยไม่มีสิ่งกีดขวางเพื่อลดการสะท้อน และใช้ระยะทางในการทดสอบเป็นระยะสนามระยะไกล โดยมีการขึ้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดระยะที่ใช้ทดสอบ

$$r; 2\frac{D^2}{\lambda}$$

โดยในที่นี้ $D = D_t + D_r = 4\lambda$

ดังนั้น $r = 3.9184; 4$

ซึ่งจะได้ $20\log\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right) = 52.2663$

2. วัดความสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณ

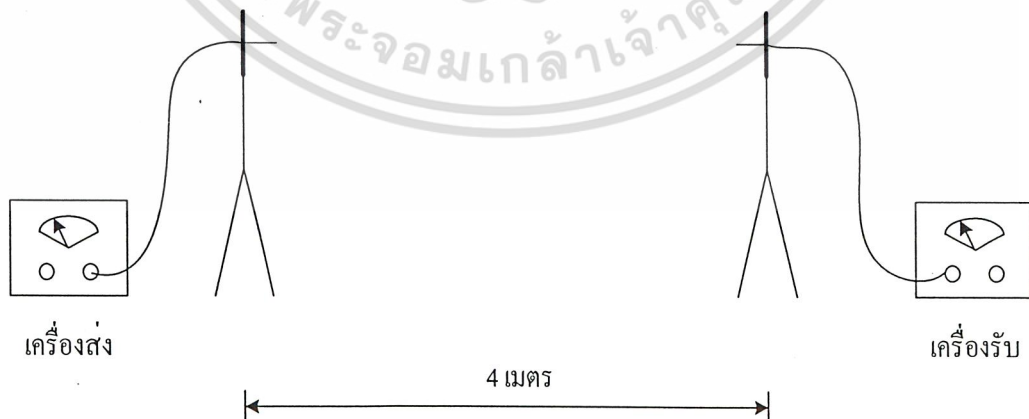
โดยการนำสายสัญญาณด้านหนึ่งต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณ แล้วอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับเครื่องวัดสเปคตรัม แล้วส่งสัญญาณความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ที่มีขนาดเป็น 0 ดีบีเอ็ม ออกไป แล้วทำการวัดค่ากำลังงานทางด้านรับก็จะได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณ ซึ่งคือ

$$L_{\text{r}} = 0.82 \text{ dB}$$

$$L_{\text{tr}} = 4.62 \text{ dB}$$

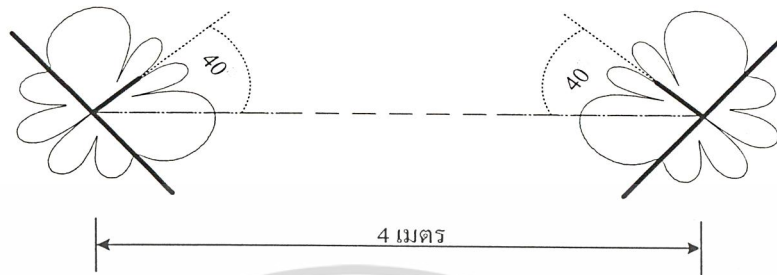
3. ติดตั้งสายอากาศที่จะทดสอบ

นำสายอากาศโมโนโพลบนระนาบตัวนำสองตัว ซึ่งได้สร้างโดยข้อสมมุติให้มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ นำไปติดตั้งโดยหันลำคลื่นที่มีความแรงสูงสุดเข้าหากัน



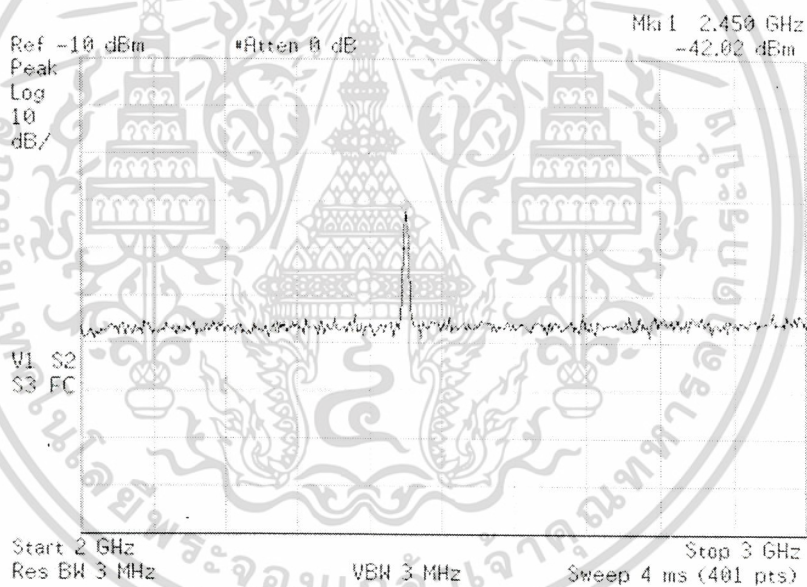
รูปที่ 6.26 การติดตั้งสายอากาศมองทางด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.27 การติดตั้งสายอากาศมองทางด้านบน

4. ส่งสัญญาณที่สายอากาศทางด้านส่งและบันทึกค่าความเข้มสัญญาณที่สายอากาศด้านรับ



รูปที่ 6.28 ความเข้มสัญญาณด้านรับของสายอากาศโมโนโพล

5. คำนวณหาค่าสภาพเงาจริงทิศทางของสายอากาศโมโนโพล

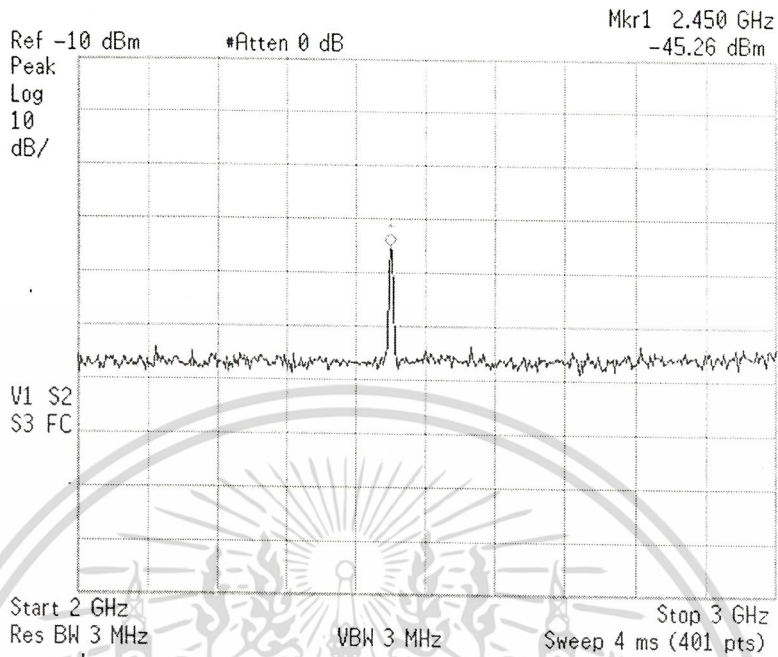
จากข้อ 4 เมื่อสมมุติให้ $G_t = G_r$ แล้วแทนค่าต่างๆ จะได้ว่า

$$-42.02 = 0 + 2G_r - 52.2663 - 5.44$$

$$G_r = 7.8431 \text{ dBi}$$

6. เปลี่ยนสายอากาศเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี แล้วทำลักษณะเดียวกับข้อ 3 ถึง 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



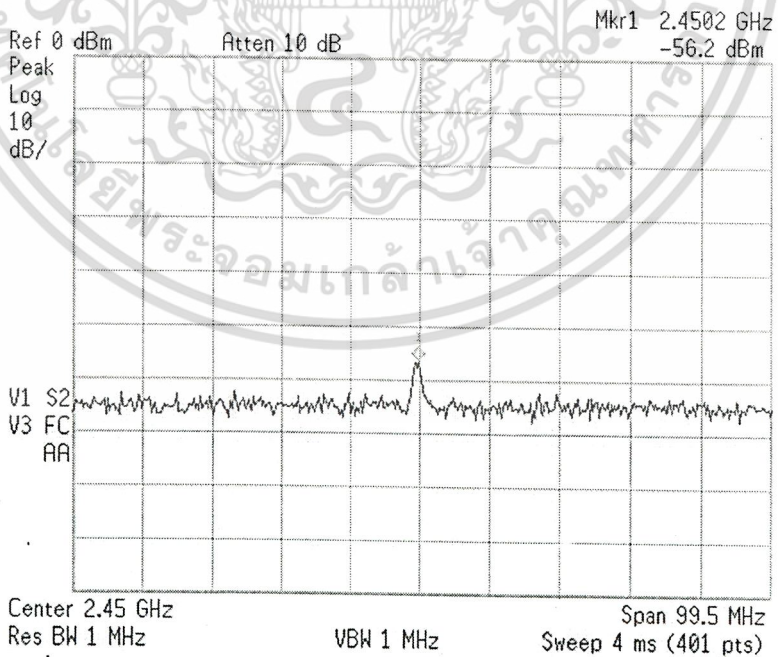
รูปที่ 6.29 ความเข้มสัญญาณด้านรับของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรีซีมี

และจากการแทนค่า $G_r = 7.8431$ dBi จะได้ว่า

$$-45.26 = 0 + 7.8431 + G_r - 52.2663 - 5.44$$

$$G_r = 4.6032 \text{ dBi}$$

7. ในทำนองเดียวกัน สำหรับสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมจะได้ว่า



รูปที่ 6.30 ความเข้มสัญญาณด้านรับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

ซึ่งจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

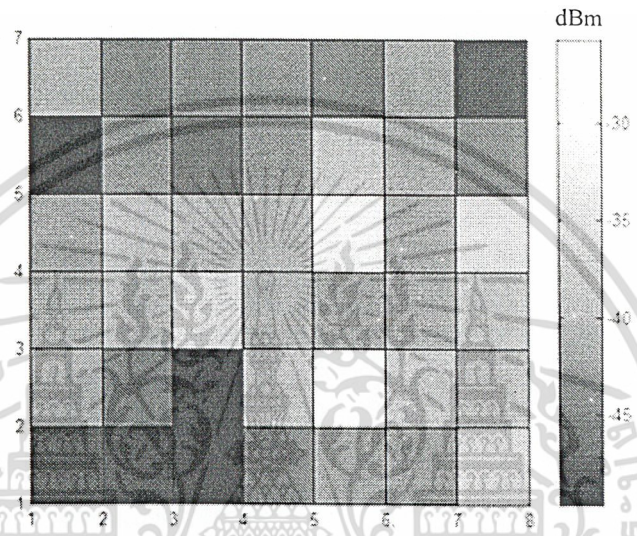
$$-56.2 = 0 + 7.8431 + G_r - 55.7881 - 9.626 - 5.83$$

$$G_r = 7.02 \text{ dBi}$$

6.5 การทดสอบประสิทธิภาพ

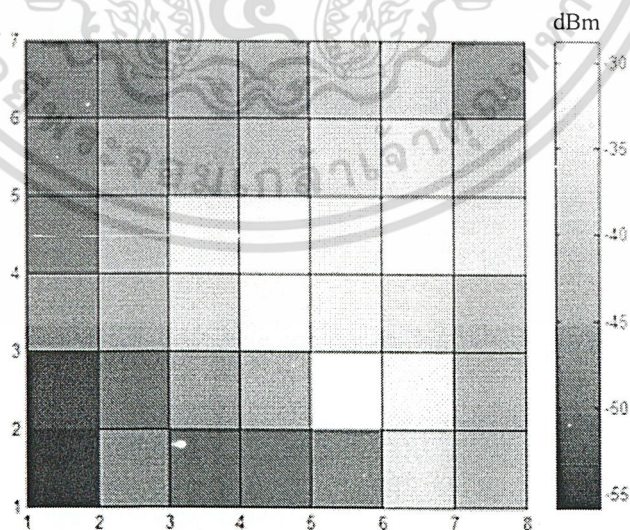
6.5.1 กำลังงานทางด้านรับ

6.5.1.1 กำลังงานทางด้านรับของสายอากาศไดโพล



รูปที่ 6.31 กำลังงานทางด้านรับของสายอากาศไดโพล

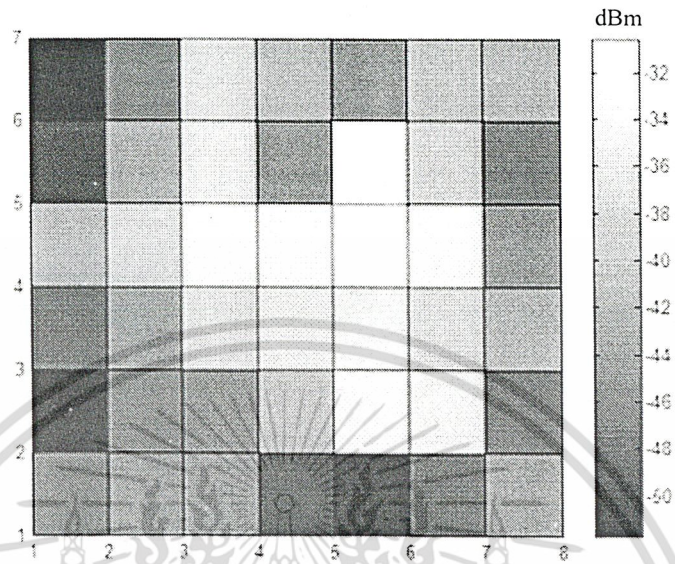
6.5.1.2 กำลังงานทางด้านรับของสายอากาศโมนโพล



รูปที่ 6.32 กำลังงานทางด้านรับของสายอากาศโมนโพล

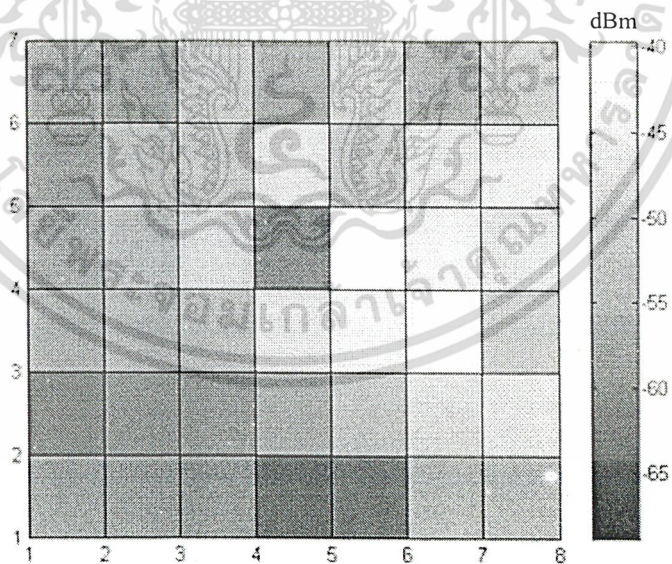
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5.1.3 กำลังงานทางด้วนรับของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี



รูปที่ 6.33 กำลังงานทางด้วนรับของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี

6.5.1.4 กำลังงานทางด้วนรับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

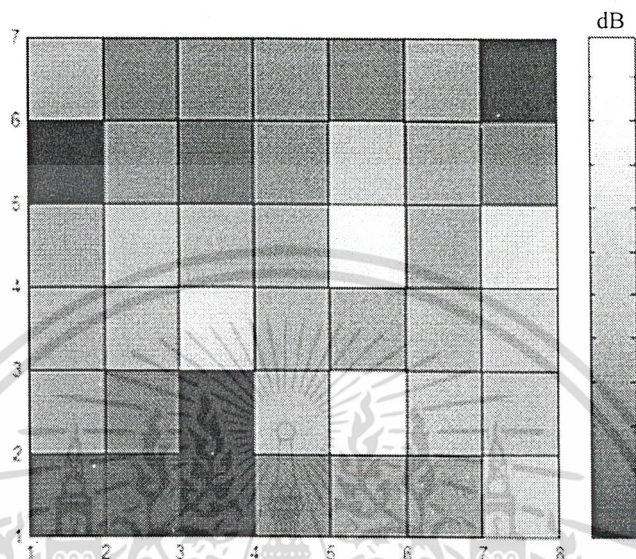


รูปที่ 6.34 กำลังงานทางด้วนรับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

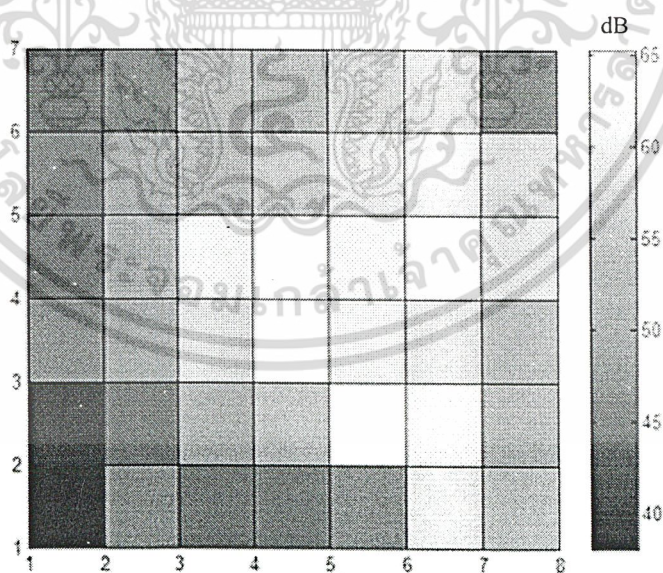
6.5.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

6.5.2.1 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศไดโพล



รูปที่ 6.35 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศไดโพล

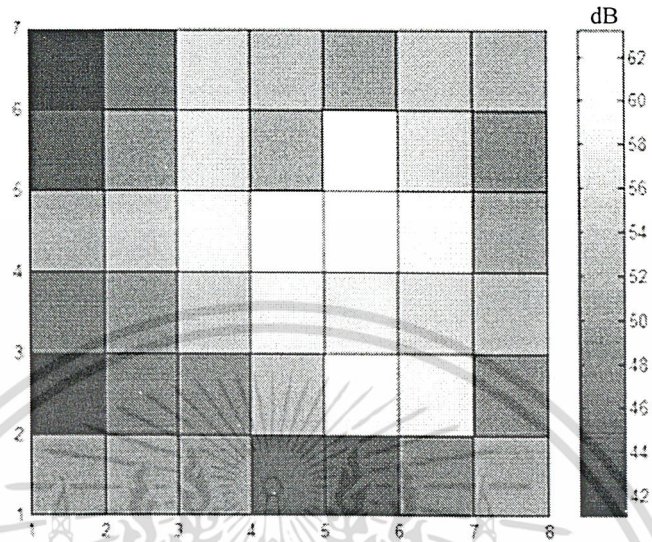
6.5.2.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศโมนโพล



รูปที่ 6.36 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศโมนโพล

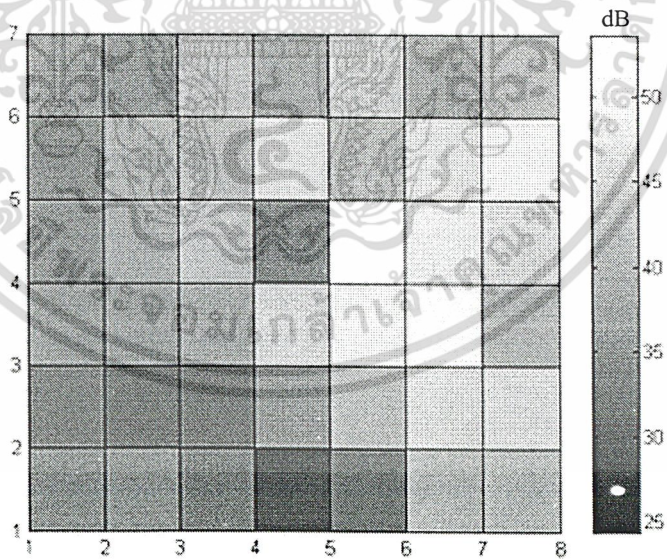
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5.2.3 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศที่หน้าคลื่นเชิงระตมี



รูปที่ 6.37 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศที่หน้าคลื่นเชิงระตมี

6.5.2.4 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

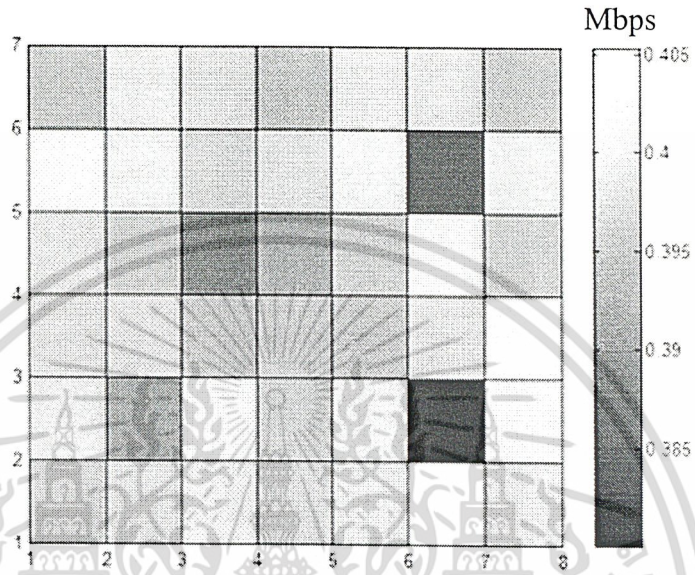


รูปที่ 6.38 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

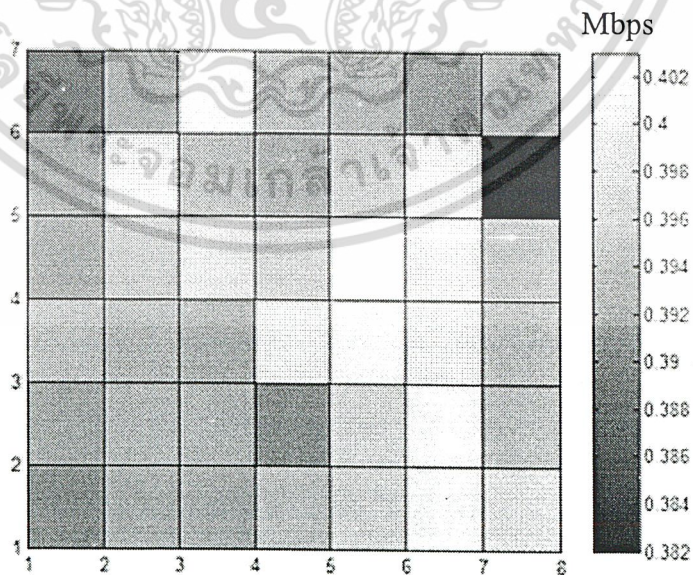
6.5.3 ค่าวิสัยสามารถ (Throughput)

6.5.3.1 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไดโพล



รูปที่ 6.39 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไดโพล

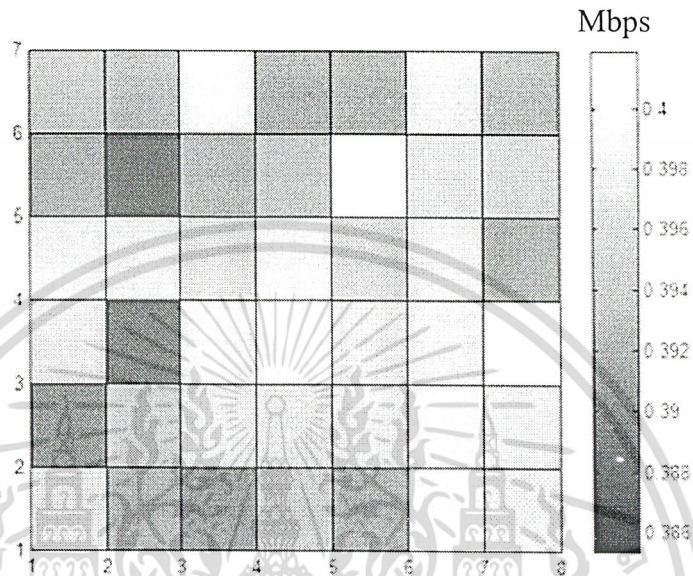
6.5.3.2 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศโมนโพล



รูปที่ 6.40 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศโมนโพล

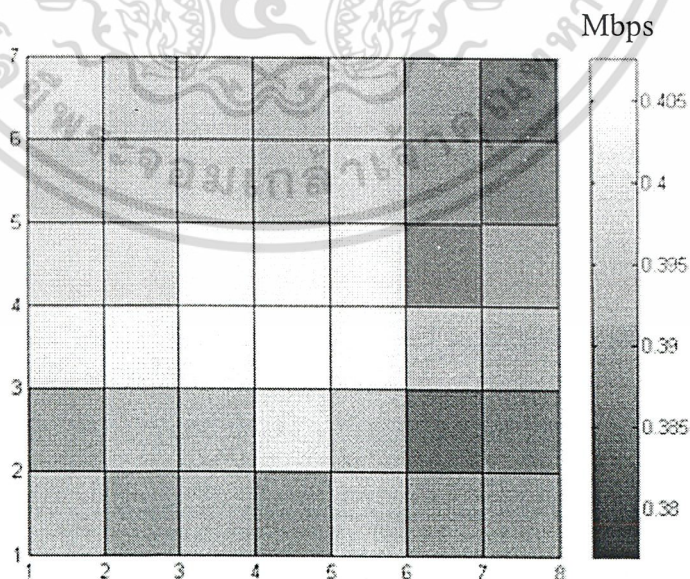
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5.3.3 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี



รูปที่ 6.41 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี

6.5.3.4 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไมโครสตริป

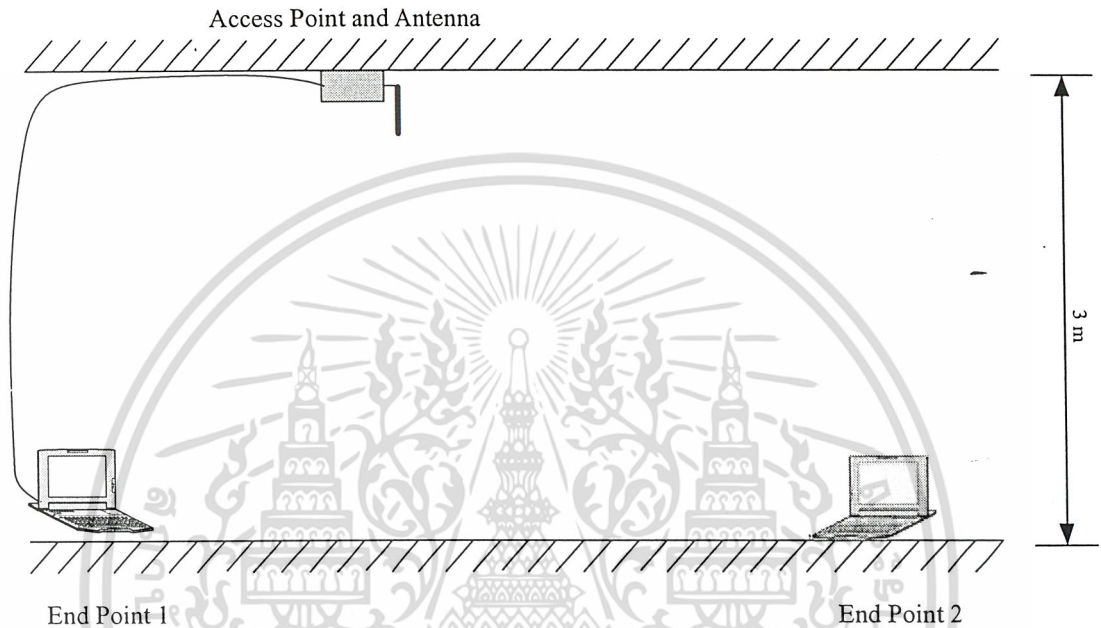


รูปที่ 6.42 ค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

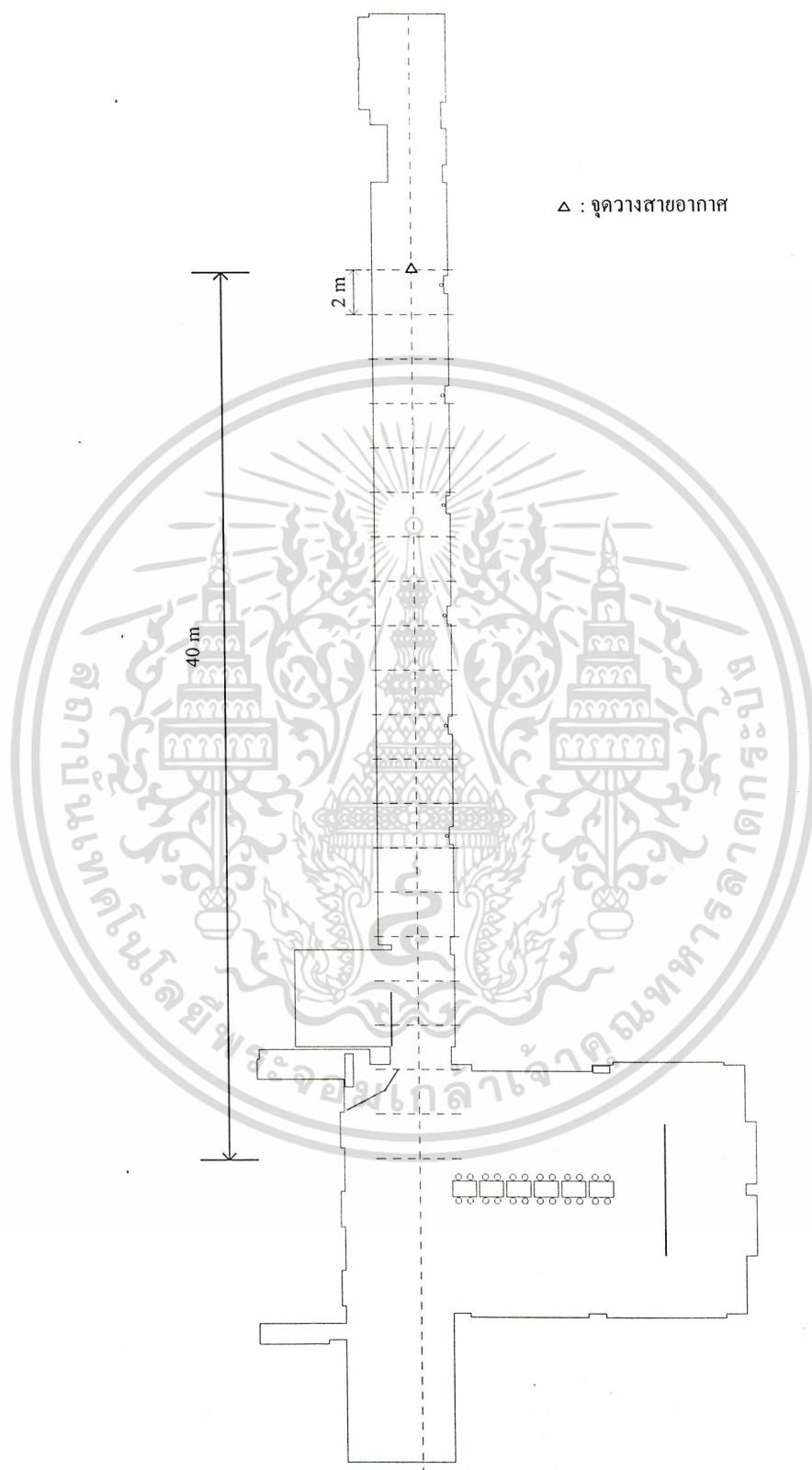
6.6 การทดสอบค่ากำลังงานทางด้านรับ

นำสายอากาศต้นแบบไปทดสอบติดตั้งบนเพดานภายในอาคารที่ความสูง 3 เมตร ทำการวัดกำลังงานทางด้านรับทุกๆ 2 เมตร เริ่มจากใต้สายอากาศ โดยใช้โปรแกรม Netstumbler



รูปที่ 6.43 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ

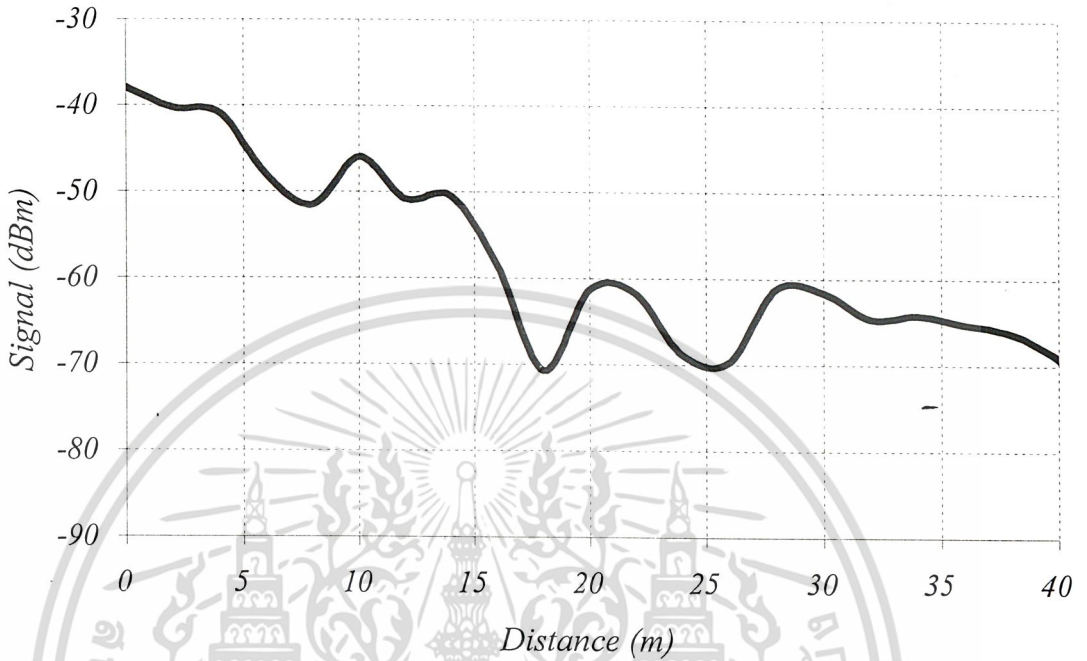
โดยทดสอบที่ระเบียงทางเดินชั้น 2 ตึก 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ซึ่งมีลักษณะดังรูป



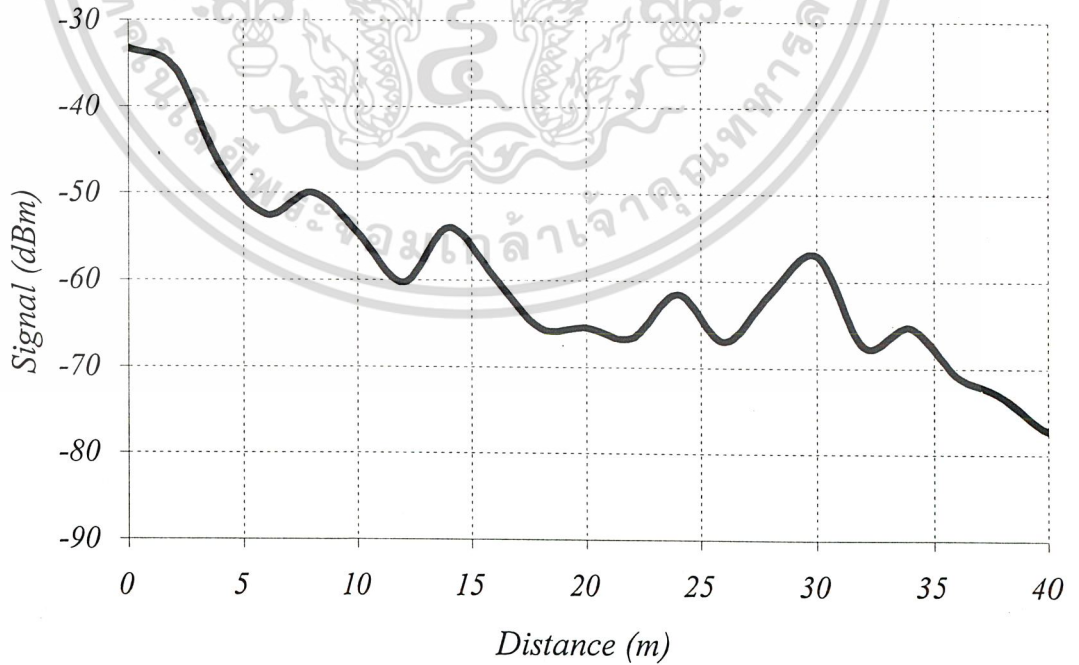
รูปที่ 6.44 แผนผังบริเวณที่ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังนี้

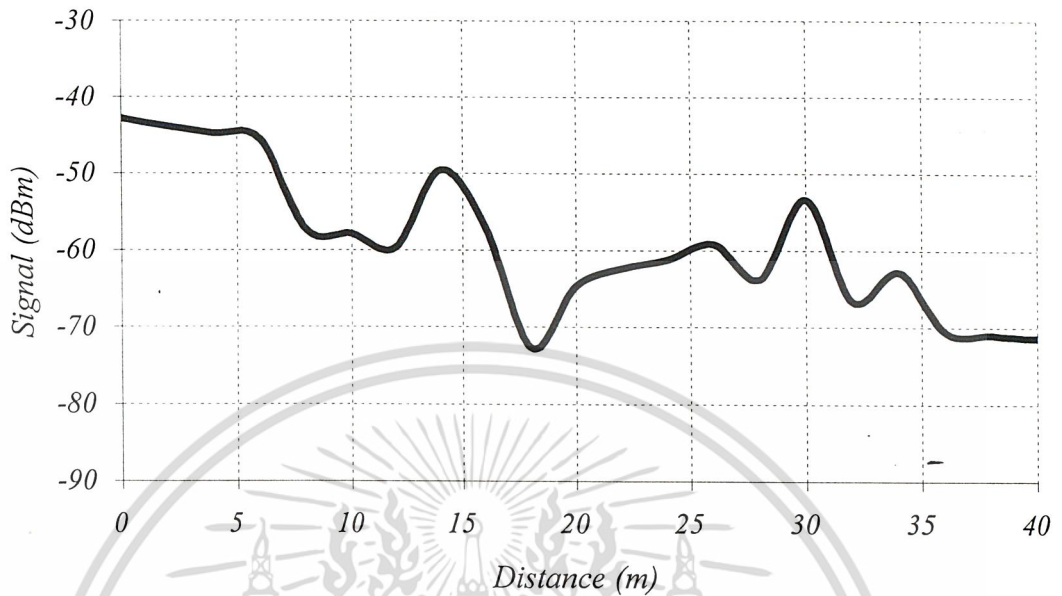


รูปที่ 6.45 ผลการทดสอบกำลังงานทางด้านรับของสายอากาศไดโพล

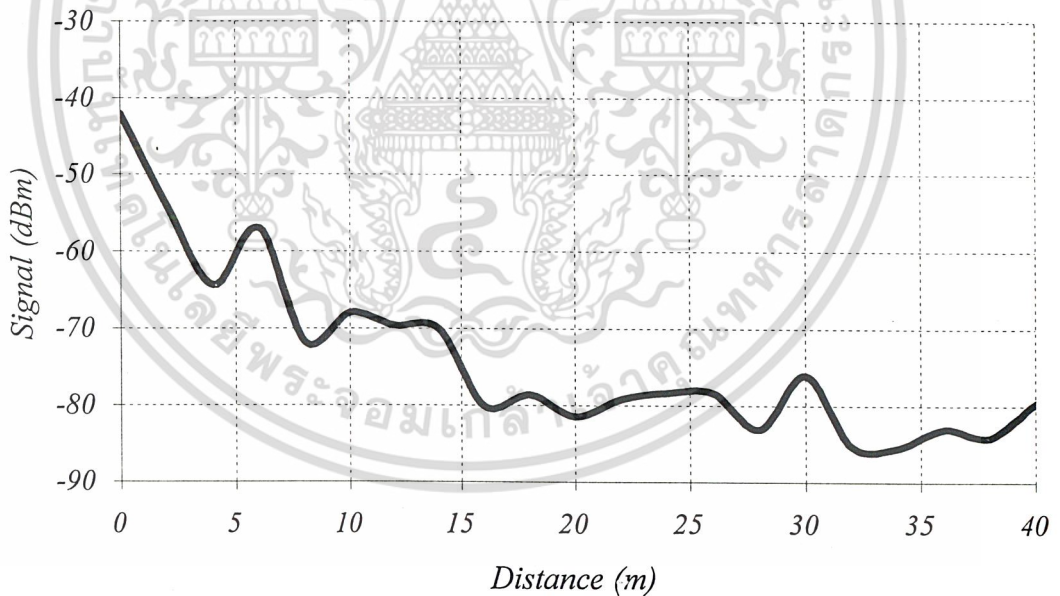


รูปที่ 6.46 ผลการทดสอบกำลังงานทางด้านรับของสายอากาศโมนโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.47 ผลการทดสอบกำลังงานทางด้านรับของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี

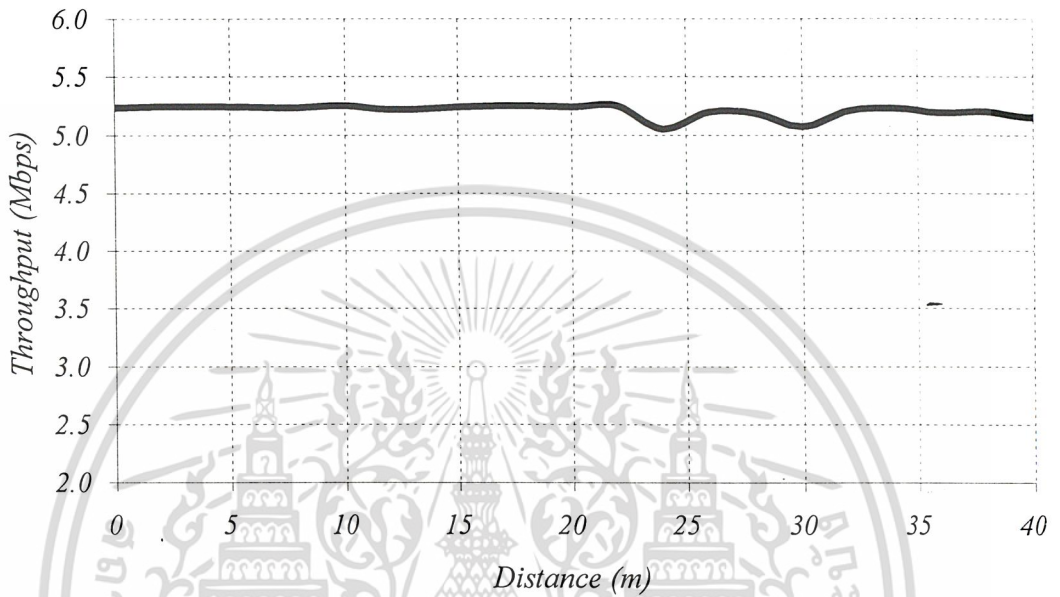


รูปที่ 6.48 ผลการทดสอบกำลังงานทางด้านรับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม จะเห็นว่าเมื่อระยะทางมากขึ้นกำลังงานที่รับได้มีแนวโน้มลดลง ซึ่งในระยะที่ 50 เมตรจะสามารถรับได้ทั้งหมด

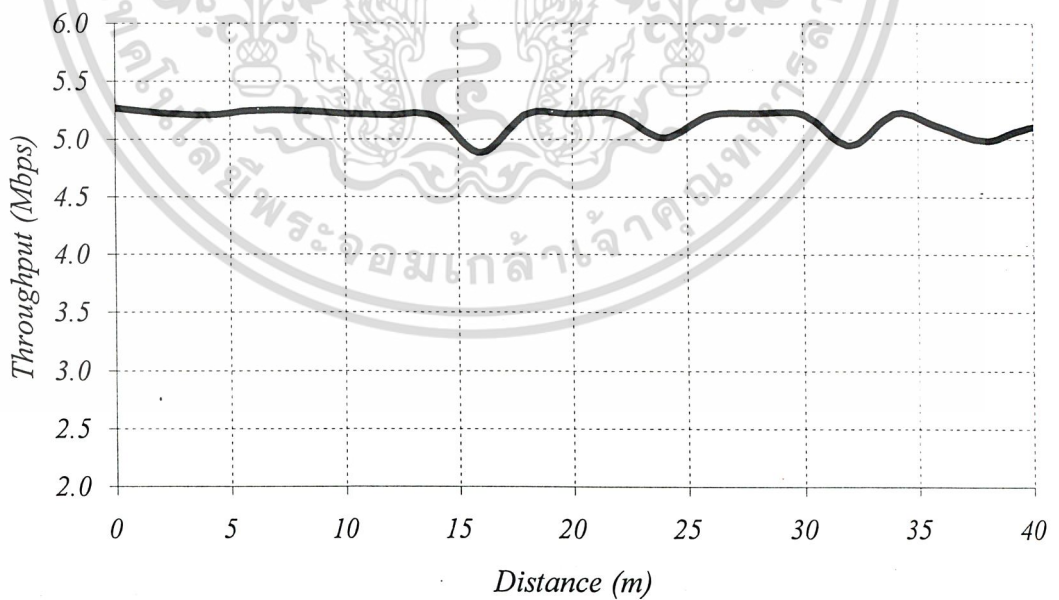
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.7 การทดสอบค่าวิสัยสามารถ (Throughput)

นำสายอากาศต้นแบบไปทดสอบติดตั้งบนเพดานภายในอาคารที่ความสูง 3 เมตร ทำการวัดค่าวิสัยสามารถ ทุกๆ 2 เมตร โดยใช้โปรแกรม Chariot

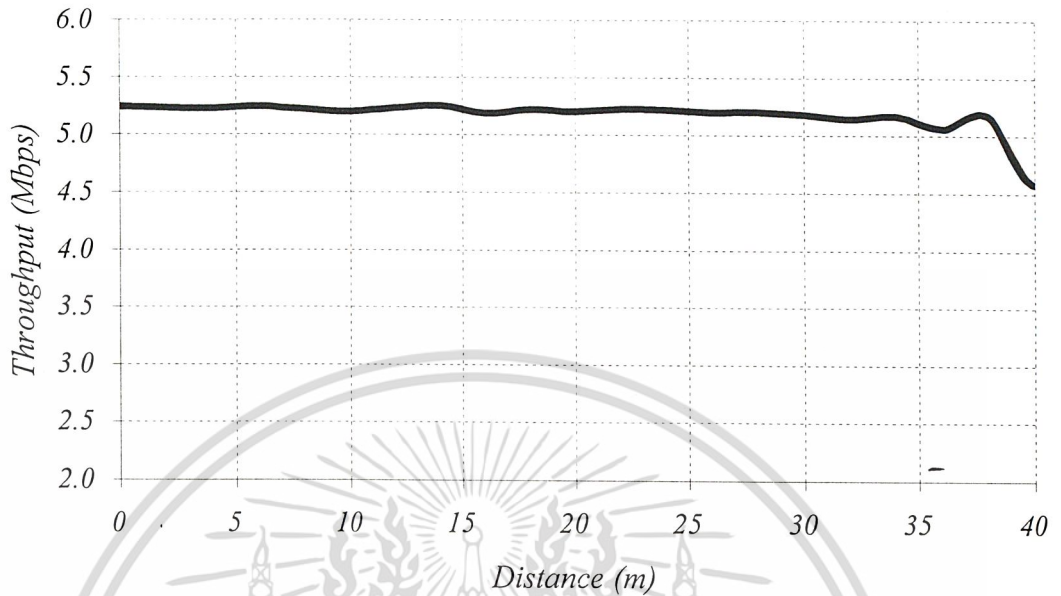


รูปที่ 6.49 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไดโพล

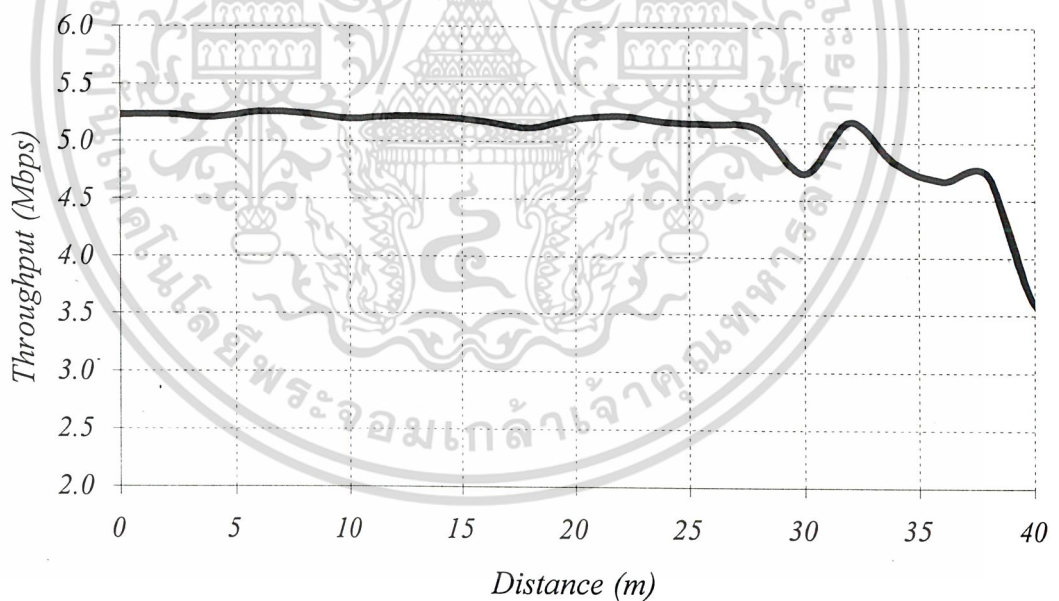


รูปที่ 6.50 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศโมนอโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.51 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี



รูปที่ 6.52 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

จะเห็นว่าค่าวิสัยสามารถ(Throughput) จะมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดระยะทางที่วัด

วิจารณ์

คุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์

พบว่าสายอากาศโมโนโพลมีช่วงความถี่ที่ใช้งานกว้างที่สุด ตามด้วยสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม ส่วนสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมีมีช่วงความถี่ที่ใช้งานแคบที่สุด

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

จากการทดลองพบว่า ค่ามุมสนามสูงสุดในระนาบมุมยกของสายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมีมีค่าแคบที่สุด ส่วนสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมและสายอากาศโมโนโพลมีค่าใกล้เคียงกัน

ส่วนความกว้างลำคลื่นหลักพบว่า สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมีมีความกว้างลำคลื่นหลักกว้างที่สุด ตามด้วยสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม และสายอากาศโมโนโพล

อัตราขยาย

พบว่าสายอากาศทั้งสามมีค่าอัตราขยายสูงกว่าสายอากาศไดโพล ดังนี้

- สายอากาศโมโนโพล 7.84 dBi
- สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมี 4.60 dBi
- สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม 7.02 dBi

กำลังงานทางค้ำรับ

การทดสอบอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจะพบว่า สายอากาศไดโพลจะครอบคลุมพื้นที่ได้ค่อนข้างจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศอื่นๆ ค่ากำลังงานค้ำรับสูงสุดของสายอากาศไดโพลกับโมโนโพลจะใกล้เคียงกัน และมากกว่า สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมีนิดหน่อย แต่มากกว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมพอควร

คำวิสัยสามารถ

คำวิสัยสามารถนั้นพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เป็นเพราะระยะที่ใช้วัดเป็นเพียงระยะใกล้ๆ

จากการทดลองพบว่าเกิดความผิดพลาดที่เกิดในขั้นตอนการทดลองอยู่ ได้แก่ ข้อจำกัดของเครื่องมือวัดที่ไม่ละเอียดพอ การปรับแมทซ์เชิงอิมพีแดนซ์ทำให้ตัวสายอากาศเปลี่ยนรูปร่างไป

บทที่ 7

สรุป

สรุปเนื้อหาโดยรวม

โครงการนี้ได้นำเสนอสายอากาศที่ใช้ในระบบโครงข่ายการสื่อสารท้องถิ่นไร้สายภายในอาคาร โดยใช้สายอากาศ 3 ชนิด ได้แก่ สายอากาศโมโนโพลบนระนาบตัวนำ สายอากาศท่อนำคลื่นเชิงรัศมีบนระนาบตัวนำ และสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

ในขั้นตอนการออกแบบนั้น ได้ทำการจำลองสายอากาศเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับระบบ โดยสายอากาศที่ระบบต้องการนั้น ใช้งานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ควรมีค่าความกว้างแถบความถี่ประมาณ 80 เมกะเฮิรตซ์ (2.400 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.480 กิกะเฮิรตซ์) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นรูปกรวย มุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยกชี้ไปที่ผู้ใช้งาน

ขั้นตอนที่สอง เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วก็นำไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ แล้วปรับสายอากาศที่สร้างให้เกิดการแมตซ์ซึ่งที่ความถี่ที่ใช้งาน

ขั้นตอนที่สาม นำสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการสร้างมาทดสอบคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และประสิทธิภาพของสายอากาศ

ขั้นตอนที่สี่ เปรียบเทียบสายอากาศที่สร้างและสายอากาศที่ได้ออกแบบไว้

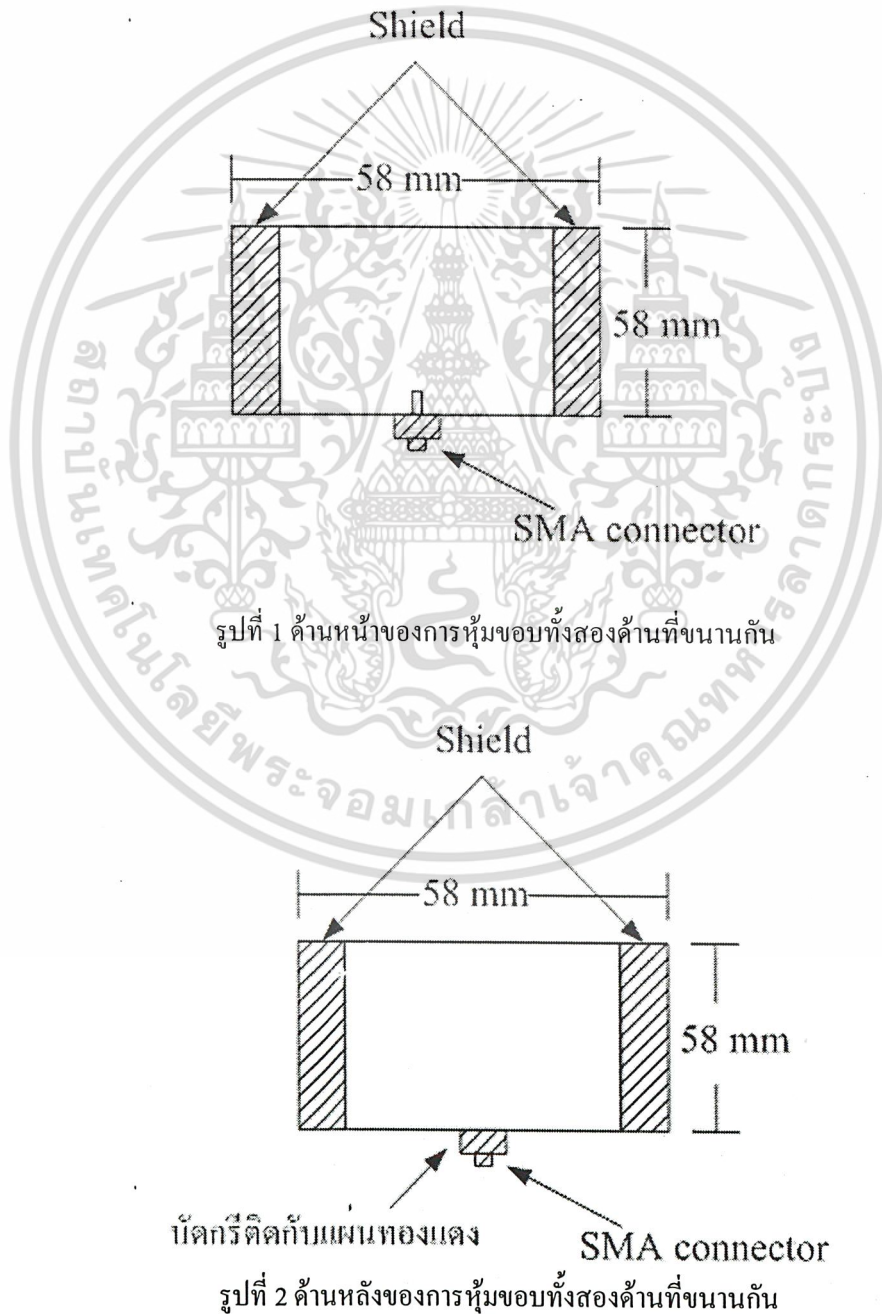


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหรือค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของแผ่นปริ้นท์

ชั้นสเตรทที่ใช้วัดในวิธีนี้จะถูกหุ้มด้วยโลหะทุกด้าน ดังนั้นจะเหมือนเรโซแนนท์คาวิตีเล็กๆและความถี่เรโซแนนท์จะหาจากการส่งผ่านหรือการสะท้อนกลับ จากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหรือค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) จะถูกคำนวณออกมาด้วยความแม่นยำกว่า 1%

ชั้นสเตรทที่ใช้เป็นอิมพีทอกซ์ที่มีความหนาประมาณ 1.50 mm. นำแผ่นปริ้นท์ที่จะทำสายอากาศนี้มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด $58 \times 58 \text{ mm}^2$ แล้วทำการหุ้ม (Shield) ขอบทั้งสองด้านที่ขนานกัน จากนั้นจึงเชื่อมต่อ SMA-Connector เข้ากับแผ่นปริ้นท์แล้วทำการวัด Return Loss (S22) จาก Network Analyzer



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการแสดงโหมดคลื่นของแผ่น ไมโครสตริป

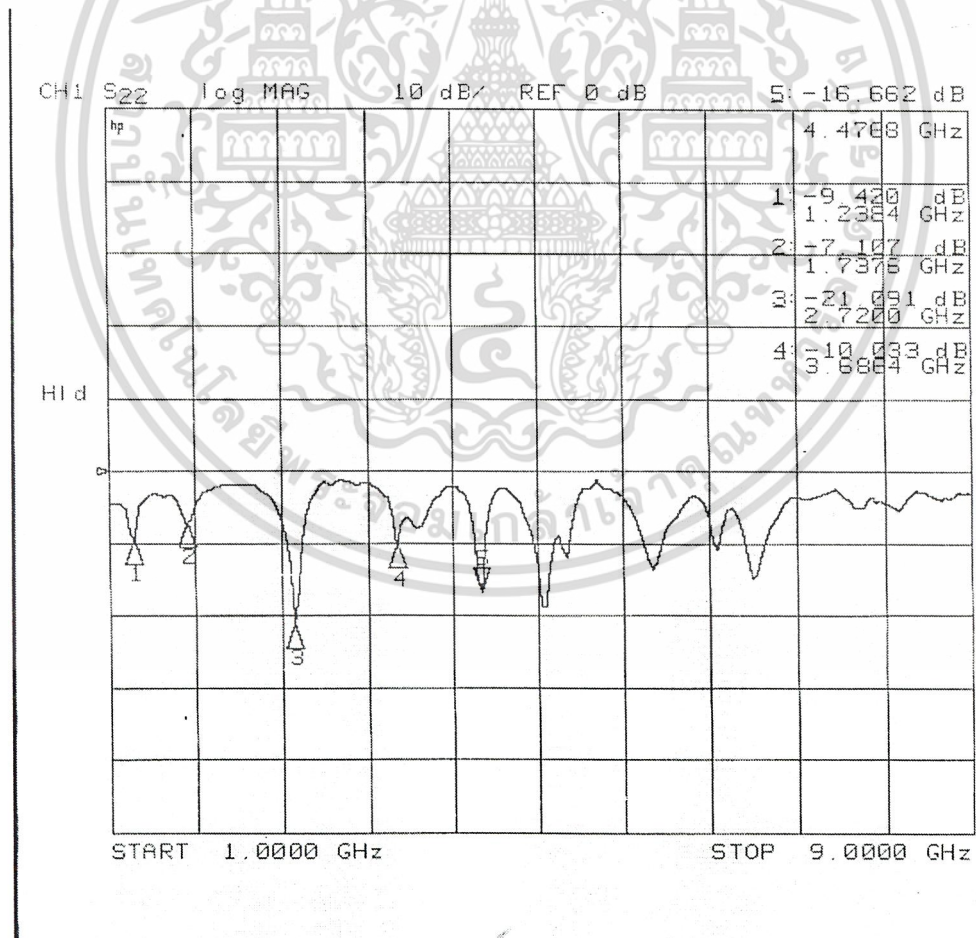
$$(f_r)_{nm} = \left[\left(\frac{1}{2\pi\sqrt{\mu_0\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{w}\right)^2} \right) \right] \quad \dots(1)$$

ลดรูปสมการเป็น

$$(f_r)_{nm} = \left[\left(\frac{c}{2l\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{n^2 + m^2} \right) \right] \quad : l = w \quad \dots(2)$$

$$\epsilon_r = \left[\left(\frac{c}{2l(f_r)_{nm}} \sqrt{n^2 + m^2} \right) \right]^2 \quad \dots(3)$$

สมการที่ (3) ใช้หาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์



รูปที่ 3 กราฟแสดง Return Loss ของแผ่นปรินขนาด 58×58mm²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

position	f_r (GHz)	Mode(n,m)	ϵ_r
1	1.2384	1,0	4.3640
2	1.7376	1,1	4.4305
3	2.7200	2,1	4.5202
4	3.6884	2,2	3.9331
5	4.4788	2,3	4.3346
6	5.0432	3,3	4.7335
7	6.0808	5,0	4.5222
8	6.6680	5,2	4.3625
9	7.0232	5,3	4.6104

ตารางที่ 1 การหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ในโหมดคลื่นต่างๆ

จากตารางที่ 1 จะหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 4.4234 ซึ่งจะนำค่านี้ไปใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

ไกรฤกษ์, โมไนย: ทฤษฎีสายอากาศ, ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2537

สุรวัฒน์ปัญญา, จเร: วิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2532

Balanis, C. A.: Advanced Electromagnetics, Wiley, 1989

Balanis, C. A.: Antenna Theory: Analysis and Design, 2 ed., Wiley, 1997

Buck, J. A, and. Hayt, W. H.: Engineering Electromagnetics, 6 ed., McGraw-Hill, 2001

Marhefka, R. J., and Kraus, J. D.: Antennas for all applications, 3 ed., McGraw-Hill, New York, 2003

Wolf, E. A.: Antenna Analysis, Antech House, 1949



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่
 ปรีกษา ผศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพานิช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ. ดร. จเร สุรวัฒน์ปัญญา และ รศ.ดร.สมผล
 โกศลวิตร สำหรับความช่วยเหลือและคำปรึกษาอย่างดีตลอดมา ขอขอบคุณ ศร.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ สำหรับ
 คำแนะนำและเอื้อเฟื้อเครื่องมือ สถานที่ให้ทดสอบสายอากาศ

ขอบคุณพี่ๆ ห้องโปรเจ็คที่ให้คำแนะนำอันมีค่าและคอยให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี โดยเฉพาะ
 คุณไพโรจน์ วุ่นชุม คุณสุธาสิณี ละมุดศรี คุณชวาลธวัช หมั่นทรัพย์ และ คุณศุภชัย เกียรติชนสาร ขอขอบคุณ
 คุณวิเชษฐ์ อ่อนรำพรรณ เป็นอย่างสูงที่สละเวลาและที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทดสอบ และขอบคุณ คุณอนุชิต
 กลางคุณเสน เป็นอย่างสูงที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำในการทดสอบสายอากาศเป็นอย่างดี รวมทั้งพี่ๆ 3T ที่ให้
 ความช่วยเหลือและแนะนำวิธีการสร้างและทดสอบสายอากาศ ขอขอบคุณเพื่อนๆ กลุ่มโปรเจ็ค 4A ที่ให้ความ
 ช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และกำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือสนับสนุนในทุกๆ ด้าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้