



สายอากาศไมโครสตริป
MICROSTRIP ANTENNA

โดย

นาย นิกสัน โชติกวณิชย์ รหัสประจำตัว 37013023

นาย วิชิต จงวัฒนานุกูล รหัสประจำตัว 37013040

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. สมผล โกศลวิตร

วัน เดือน ปี..... ๑๘ ส.ค. ๒๕๖๐

เลขทะเบียน..... ๐๓๗๓๐๓

เลขเรียกหนังสือ..... ๐๓๗๓๐๓ น. ๕๔๕ ส

ปริญญานิพนธ์ สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๖๐

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2539

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศไมโครสตริบ

(MICROSTRIP ANTENNA)

ผู้จัดทำ

- | | | |
|---------------------------|--------------|----------|
| 1. นาย นิกสัน โชติภวณิชย์ | รหัสประจำตัว | 37013023 |
| 2. นาย วิชิต จงวัฒนานุกูล | รหัสประจำตัว | 37013040 |

ลายเซ็นของอาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. สมผล โกศลวิตร)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ	สายอากาศไมโครสตริป
โดย	นาย นิกสัน โชติภวณิษฐ์ รหัสประจำตัว 37013023
	นาย วิชิต จงวัฒนานุกูล รหัสประจำตัว 37013040
ภาควิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. สมผล โกศลวิตร
ประจำปีการศึกษา	2539

บทคัดย่อ

สายอากาศไมโครสตริปจะมีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเทียบกับสายอากาศที่ใช้ในย่านไมโครเวฟแบบอื่นๆ โดยสายอากาศไมโครสตริปนี้สามารถใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz - 50 GHz

ข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดของสายอากาศไมโครสตริปคือ มีน้ำหนักเบา, ขนาดเล็ก, ราคาถูก, ทำให้เป็นแผ่นบางๆได้ และมีการโพลาไรเซชันทั้งแบบเชิงเส้นและแบบวงกลม

การแพร่กระจายของสายอากาศไมโครสตริปเกิดจากสนามโป่งจะเกิดขึ้นระหว่างขอบของแผ่นตัวนำของสายอากาศ และแผ่นกราวด์เพลน สำหรับโครงการนี้ได้ทำการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ย่านความถี่ 1.88 GHz และนำมาอาร์เรย์เป็นแบบระนาบกัน 8 เอเลเมนต์เพื่อให้เกนของสายอากาศเพิ่มขึ้นและมีการชี้ทิศทางดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Microstrip Antenna		
Name	Mr. Nickson Chotikvanich	No.	37013023
	Mr. Wichit Jongwattananukul	No.	37013040
Major Field	Telecommunication Engineering		
Thesis Advisors	Asst.Prof. Sompol Gosanvit		
Academic Year	1996		

Abstract

Microstrip antennas have several advantages when compared with conventional microwave antennas and they have many applications over the broad frequency range from 100MHz to ~50GHz.

Some of the principal advantages of microstrip antennas when compared with conventional microwave antennas are light weight ,low volume,low cost,can be made thin and linear,circular polarization.

The radiation from microstrip antennas occur from the fringing fields between the edge of the microstrip antenna conductor and the ground plane. A pair of rectangular microstrip antennas are designed to be tested at 1.88 GHz frequency and to be 8 elements planar array.

กิติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องมาจากผู้เขียนได้รับการอนุเคราะห์อย่างสูงยิ่งจาก ผศ.สมผล โกศลวิตร ที่ได้ให้การประสิทธิ์ประสาทวิชาให้คำแนะนำและคำปรึกษาในเรื่องต่างๆมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่า

ขอขอบคุณสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆตลอดจนสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่และขอบคุณเพื่อนๆที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์นี้จนสำเร็จลงอย่างสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	V
บทที่	
1. บทนำ	1
2. ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	2
2.2 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	3
2.3 รูปร่างลักษณะต่างๆของสายอากาศไมโครสตริป	3
2.4 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	6
2.5 สนามที่แพร่กระจายของสายอากาศ	7
2.6 สายอากาศอาร์เรย์	26
2.7 เทคนิคการป้อนสัญญาณสายอากาศไมโครสตริป	34
3. พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ	36
3.1 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น	36
3.2 สาร์ฟเฟสเวอริบีมิวิตซ์	38
3.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น	38
3.4 ไดเรคตีวิตี	39
3.5 เกน	40
3.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ	43
3.7 อินพุทอิมพีแดนซ์	44
3.8 แบนด์วิทซ์	46
4. การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป	47
4.1 การออกแบบแผ่นกระจายคลื่น	47
4.2 การออกแบบสายส่งไมโครสตริป	51
4.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์	53

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5. การทดลองและผลการทดลอง	56
5.1 การหาอินพุทอิมพีแดนซ์และค่า VSWR	56
5.2 การวัดการกระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์	61
5.3 การวัดเกนของสายอากาศไมโครสตริป	66
5.4 การวัดไดเรกทิวิตีของสายอากาศไมโครสตริป	67
5.5 ประสิทธิภาพของสายอากาศ	67
5.6 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์	67
5.7 การวัดเกนของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์	68
5.8 การวัดไดเรกทิวิตีของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์	79
5.9 ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์	80
6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	81
เอกสารอ้างอิง	82
ภาคผนวก	
การทดลองหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของแผ่นปรีนัท	
การสร้างสายอากาศไมโครสตริป	
การเลือกสารสับเซรท	
สัญลักษณ์	
วิธีการใช้เครื่อง NETWORK ANALYZER	
การยึดจุดต่อ BNC เข้ากับแผ่นสายอากาศไมโครสตริป	
สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์ที่ออกแบบ	
แสดงการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศไมโครสตริป	
แสดงอุปกรณ์การวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป	

สารบัญรูปภาพ

บทที่	หน้า
2. ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 แสดงรูปแบบโครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป	2
2.2 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบ Patch (MPA)	4
2.3 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบ traveling-wave	5
2.4 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบ slot	6
2.5 แสดงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	7
2.6 แสดงรูปแบบการวิเคราะห์สายอากาศในระบบพิกัดฉาก	11
2.7 แสดงรูปแพทเทอรันของสนามไฟฟ้า 1 ช่องเปิดในระบบ E-Plane	19
2.8 แสดงรูปแพทเทอรันของสนามไฟฟ้า 1 ช่องเปิดในระบบ H-Plane	20
2.9 แสดงรูปแพทเทอรันของสนามแม่เหล็ก 1 ช่องเปิดในระบบ E-Plane	21
2.10 แสดงรูปแพทเทอรันของสนามแม่เหล็ก 1 ช่องเปิดในระบบ H-Plane	22
2.11 แสดงรูปแพทเทอรันสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์	24
2.12 แสดงรูปแพทเทอรันสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์	24
2.13 แสดงการเปลี่ยนระยะห่าง (l) ของสายอากาศ	25
2.14 แสดงรูปสายอากาศอาร์เรย์ 8 เอลเมนต์	27
2.15 แสดงสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลเมนต์	28
2.16 แสดงรูปแพทเทอรันของสนามไฟฟ้า ของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลเมนต์	32
2.17 แสดงรูปแพทเทอรันของสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลเมนต์	33
2.18 แสดงการป้อนสัญญาณแบบสายส่งไมโครสตริป	34
2.19 รูปแบบการป้อนสัญญาณแบบสายส่งโคแอกเชียล	35

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3. พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ	
3.1 แสดงระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	36
3.2 แสดงแพทเทิร์นในแบบลิเนียร์	37
3.3 แสดงโลบต่างๆและมีมิติของแพทเทิร์นสายอากาศ	38
3.4 แสดงข้ออ้างอิงและการสูญเสียของสายอากาศ	42
3.5 แสดงสายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์	45
4. การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป	
4.1 แสดงการป้อนสัญญาณสายอากาศไมโครสตริปแบบสายส่งไมโครสตริป	49
4.2 แสดงโครงสร้างของสายส่งไมโครสตริป	51
4.3 แสดงรูปสายอากาศไมโครสตริปที่ออกแบบ	53
4.4 แสดงรูปสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอเลเมนต์	53
4.5 แสดงสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์ที่ออกแบบ	55
5. การทดลองและผลการทดลอง	
5.1 แสดงกราฟของ VSWR ก่อนการปรับแมทซ์ซิง	57
5.2 แสดงกราฟของอิมพีแดนซ์ก่อนการปรับแมทซ์ซิง	58
5.3 แสดงกราฟของ VSWR หลังการปรับแมทซ์ซิง	59
5.4 แสดงกราฟของอิมพีแดนซ์หลังการปรับแมทซ์ซิง	60
5.5 แสดงการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดหารูปแบบกระจายคลื่น	61
5.6 แสดงแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าในโพลาไรซ์กราฟ	62
5.7 กราฟแสดงค่า Amplitude (dB) ที่แต่ละมุม (Degree)	63
5.8 แสดงแพทเทิร์นของสนามแม่เหล็กในโพลาไรซ์กราฟ	64
5.9 กราฟแสดงค่า Amplitude (dB) ที่แต่ละมุม (Degree)	65
5.10 แสดงการจัดวางอุปกรณ์เพื่อหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่น	68
5.11 แสดงกราฟ VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์	69
5.12 แสดงกราฟอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์	70
5.13 แสดงแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าในโพลาไรซ์กราฟ ของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์	71
5.14 กราฟแสดงค่า Amplitude (dB) ที่แต่ละมุม (Degree)	72

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

	หน้า
5.15 แสดงแพทเทิร์นของสนามแม่เหล็กในโพลาร์กราฟ ของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลิเมนต์	73
5.16 กราฟแสดงค่า Amplitude (dB) ที่แต่ละมุม (Degree)	74



บทที่ 1

บทนำ

สายอากาศแผ่นไมโครสตริปได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในระยะสิบปีหลังนี้เพราะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางไฟฟ้าที่ดีหลายอย่าง เช่น เป็นแผ่นแบนเรียบ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก ง่ายต่อการแก้ไขและนอกจากนี้ยังสามารถดัดแปลงโพลารไรซ์ได้ง่ายซึ่ง สายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ใช้กันทั่วไปจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทั้งนี้ เนื่องจากขั้นตอนในการคำนวณคุณสมบัติ ต่างๆของสายอากาศสามารถทำได้ง่ายกว่าแผ่นสายอากาศรูปแบบอื่นและโดยปกติคุณสมบัติการกระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมีลักษณะโพลารไรซ์แบบเชิงเส้นแต่ในบางครั้งเราอาจต้องการโพลารไรซ์แบบวงกลม ซึ่งสามารถทำได้โดยการป้อนสัญญาณให้ต่างเฟสกัน 90 องศา ป้อนสัญญาณตรงขอบมุมของแผ่นสายอากาศ และหรือทำร่องตรงกลางแผ่นสายอากาศ

ไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ และใช้ในการเชื่อมโยงชิ้นส่วนวงจรต่างๆของวงจรไมโครเวฟ เนื่องจากไมโครสตริปมีขนาดเล็กจึงเหมาะสำหรับทำวงจรรวมของไมโครเวฟ (microwave integrated circuit ย่อว่า MIC) แต่ก็มีข้อจำกัดที่สามารถรับกำลังได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับอนาคลีนนอกจากนี้ยังมีค่าการลดทอนสัญญาณค่อนข้างสูงด้วยดังนั้นจึงใช้ในการส่งผ่านและจัดการกับสัญญาณที่มีระดับต่ำและในบริเวณจำกัด เช่น ภายในแผ่นวงจรพิมพ์อันเดียวกันเป็นต้นเนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปแสดงตัวเหมือนกับสายส่ง (Transmission Line) แทนที่จะเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นจึงพิจารณาได้ว่าเป็นสายอากาศที่มีประสิทธิภาพต่ำและมีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) แคบมาก ดังนั้นในการใช้งานจริงทั่วไปแล้วนิยมสร้างเป็นอาร์เรย์เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ

สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) ที่สร้างขึ้นมาทั้งแบบเอเลเมนต์เดียว (Single Element) และแบบอาร์เรย์ (Array) เพื่อทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของรูปแบบการกระจายคลื่น (Radiation Pattern) อัตราขยาย (Gain), VSWR, ลักษณะการโพลารไรซ์ (Polarizations), อัตราส่วนของแกน (Axial Ratio) ในสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์

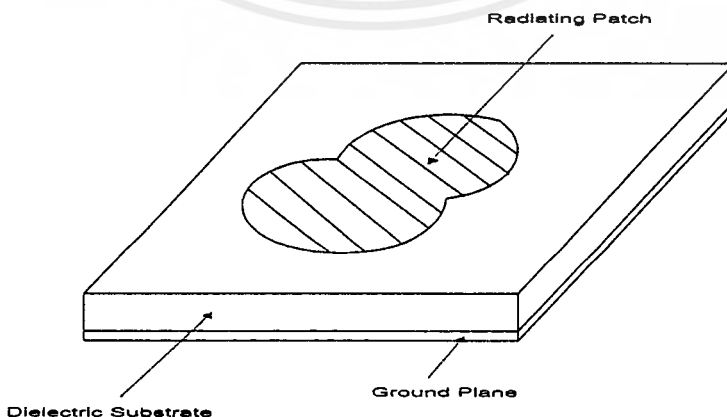
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

สายอากาศไมโครสตริป

แนวความคิดในการใช้ไมโครสตริปซึ่งมีรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก ในการแพร่กระจายคลื่นได้ถูกนำเสนอครั้งแรก โดย Deschamps ค.ศ.1953 และหลังจากนั้น 20 ปี จึงมีการสร้างเป็นสายอากาศใช้งานจริง โดยมีการพัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎี และเทคนิค photo-etch ของฐานรองที่เป็น copper หรือ gold-clad และมีความสมบัติทางอุณหภูมิ และทางกลศาสตร์ที่ดีขึ้นมีค่า loss tangent ที่ต่ำ สายอากาศไมโครสตริปถูกสร้างขึ้นมาครั้งแรกในปี ค.ศ. 1970 โดย Howell , Munsun จากนั้นก็มีการวิจัยและพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วและกว้างขวางนำไปสู่การใช้งานที่แตกต่างกัน

2.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปจะประกอบด้วย แผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกันอยู่ โดยมีแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนซึ่งจะมีรูปร่างต่างๆ เช่น รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular) ,รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square),วงกลม (Circle),วงรี (Elliptical) ฯลฯ เรียกว่า ตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiating Patch) โดยทั่วไปมักจะเป็นแผ่นทองแดงหรือทองคำ แผ่นตัวนำที่อยู่ด้านล่างจะเป็นลักษณะแผ่นตัวนำทั้งแผ่น โดยอุดมคติจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าตัวแพร่กระจายคลื่นอย่างมาก เรียกว่า แผ่นกราวด์ (Ground Plane) และมีวัสดุที่ไม่เป็นสื่อกลางทางไฟฟ้า (Dielectric Substrate) กั้นกลางระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง ขนาดของตัวแพร่กระจายคลื่นจะมีขนาดตามความเหมาะสมกับงานหรือความถี่ที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งขึ้นอยู่กับกรอกแบบตัวแพร่กระจายคลื่นให้มีขนาดตามความต้องการ แผ่นกราวด์ตามทฤษฎีจะต้องมีขนาดที่ไม่จำกัด แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะให้แผ่นกราวด์มีขนาดจนถึงอนันต์ได้ ดังนั้น ในการออกแบบจึงไม่มีข้อจำกัดของแผ่นกราวด์ว่าควรมีขนาดเท่าไร เพียงแต่จะต้องมีขนาดใหญ่กว่าตัวแพร่กระจายคลื่น ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบโครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริป จะมีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเทียบกับสายอากาศที่ใช้ในย่านไมโครเวฟแบบอื่นๆ โดยสายอากาศไมโครสตริปสามารถใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 100 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 50 จิกะเฮิรตซ์

2.2.1 ข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดของสายอากาศไมโครสตริป

- น้ำหนักเบา (lightweight) , ขนาดเล็ก (low volume)
- ทำให้เป็นแผ่นบางๆ ได้เพราะไม่มีผลทางอากาศพลศาสตร์ (aerodynamics)
- พื้นที่หน้าตัดน้อย (low profile)
- สามารถผลิตได้ง่ายและราคาถูก (low fabrication cost)
- มีความสะดวกในการติดตั้งบนวัตถุที่เคลื่อนที่ได้ เช่น จรวด, ดาวเทียม เป็นต้น
- มีการโพลาริซั้ทั้งแบบเชิงเส้นและแบบวงกลม

2.2.2 ข้อเสียเปรียบที่เห็นได้ชัดของสายอากาศไมโครสตริป

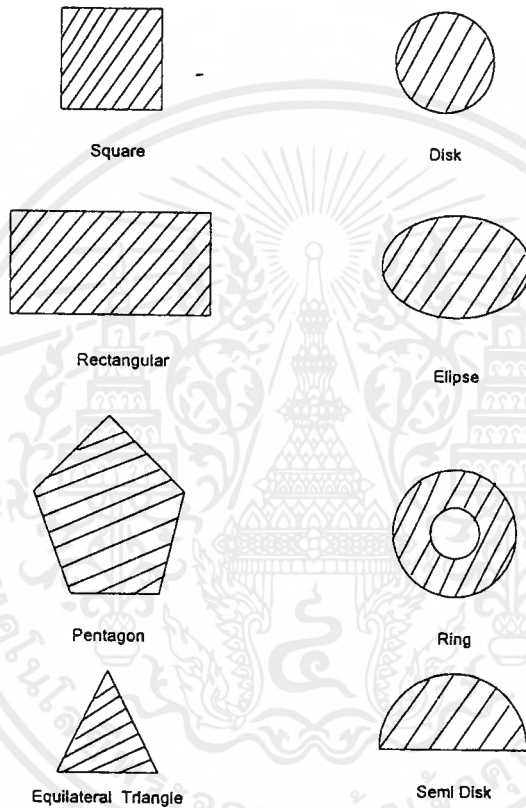
- มีช่วงความถี่ที่รับและส่งสัญญาณแคบเกินไป (narrow bandwidth)
- มีอัตราการสูญเสีย (loss)
- มีอัตราขยายค่อนข้างต่ำ
- ในทางปฏิบัติอัตราขยายสูงสุดจะถูกจำกัดประมาณ 20 db
- มีการแพร่กระจายคลื่นต่ำ

2.3 รูปร่างลักษณะต่างๆของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปจะมีพารามิเตอร์ต่างๆทางฟิสิกส์มากกว่าสายอากาศย่านไมโครเวฟทั่วไปที่เห็นได้ชัดคือ รูปร่างของสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆอย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะคือ 1. สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบแพทช์ (patch) 2. สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบสล็อต (slot) 3. สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบทราเวอริงเวฟ (traveling-wave) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

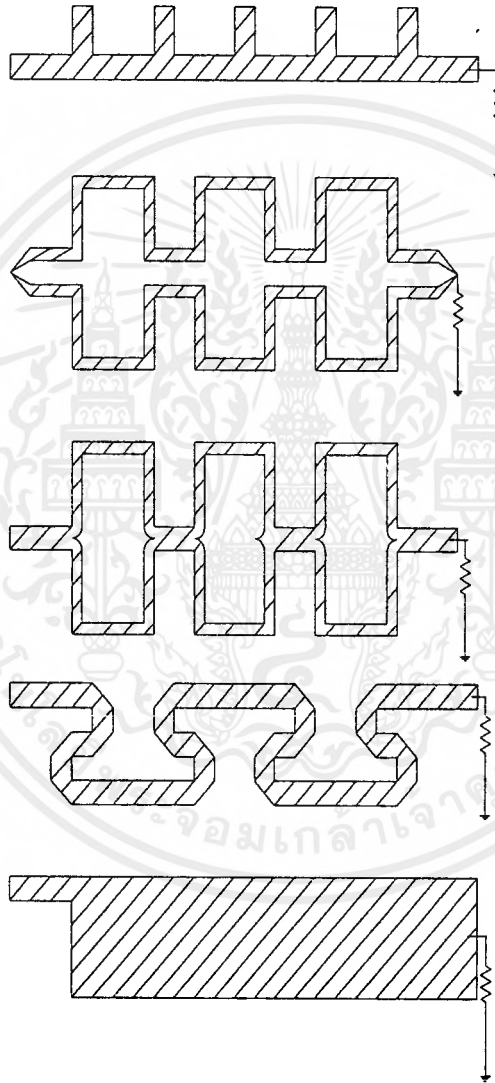
สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบต่างๆ

2.3.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ (MPA) ประกอบด้วยแผ่นตัวนำบางมีรูปทรงทางเรขาคณิตอยู่บนแผ่นไดอิเล็กตริก อีกด้านหนึ่งของไดอิเล็กตริกจะเป็นพื้นกราวด์ แผ่นตัวนำจะเป็นตัวกำหนดการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งหาได้จากการคำนวณรูปร่างลักษณะต่างๆแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบ patch (MPA)

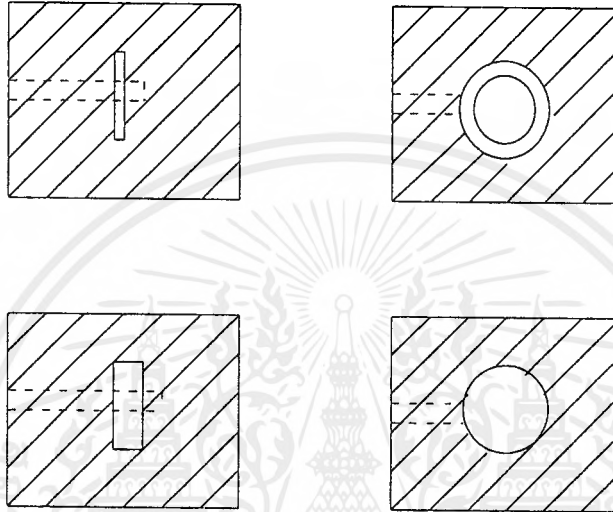
2.3.2 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบทราเวลลิงเวฟ (MTA) ประกอบด้วยตัวนำลักษณะเป็นคาบหรือมีความยาวตามเส้น TEM จะต่อกับความต้านทานที่เป็นภาระ โดยมีรูปร่างดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบ traveling-wave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบสลิตประกอบด้วยช่องซึ่งต่อกับเส้นไมโครสตริปช่องนี้จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (กว้างหรือแคบก็ได้), วงกลม หรือวงแหวนดังรูปที่ 2.4



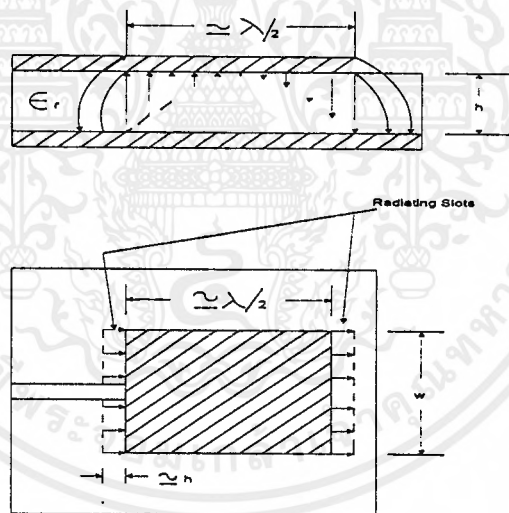
รูปที่ 2.4 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบ slot

2.4 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปเกิดจากสนามโป่งที่เกิดขึ้นระหว่างขอบของตัวนำของสายอากาศไมโครสตริปกับพื้นกราวด์ การแพร่กระจายคลื่นอย่างไม่ต่อเนื่องของสายอากาศไมโครสตริป ถูกทดสอบโดย Levin การวิเคราะห์ของเขาจะพิจารณากระแสที่ไหลในตัวนำ วิธีนี้จะใช้คำนวณหาค่า Q ของความถี่ที่สายอากาศไมโครสตริปตอบสนองถ้าพิจารณาสนามในรูปแบบของช่องเปิด (aperture form) โดยเปิดให้สายอากาศไมโครสตริปแยกจากพื้นกราวด์ ใช้ในการวิเคราะห์หาค่า Q ทั้งหมด ค่า Q นี้จะเป็นฟังก์ชันที่เกิดจากความถี่ที่สายอากาศไมโครสตริปตอบสนองค่าความเป็นฉนวนและความหนาของฐานรอง ผลลัพธ์ทั้งทางทฤษฎี และปฏิบัติจะแสดงว่าที่ความถี่สูง การสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่น จะมีค่ามากกว่าการสูญเสียเนื่องจากตัวนำ และค่าความเป็นฉนวน

2.5 สนามที่แพร่กระจายของสายอากาศ

การแพร่กระจายสนามของสายอากาศจะเกิดขึ้นที่สนามรอบนอกระหว่างขอบของแผ่นตัวนำของสายอากาศและแผ่นกราวด์เพลน (Ground Plane) ซึ่ง สายอากาศไมโครสตริปจะมีลักษณะโครงสร้างดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แผ่นตัวนำที่เป็นสายอากาศจะมีขนาดขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะใช้งานที่จะออกแบบให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ แผ่นกราวด์เพลนที่ใช้เป็นลักษณะเป็นแผ่นทองแดงกว้างทั้งแผ่น ในส่วนของตัวนำจะมองขอบของตัวนำโดยจะมองเหมือนสายอากาศปากเปิด (Aperture Antenna) ซึ่งถ้าเป็นสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมหนึ่งเอเลเมนต์จะมีสายอากาศปากเปิดสองช่องเปิด ซึ่งทั้งสองช่องเปิดนี้จะถูกแยกออกจากกันโดยความยาวของตัวสายอากาศซึ่งจะมีความยาวประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\lambda/2$) ของแผ่นไดอิเล็กตริกซึ่งทั้งสองช่องเปิดจะวางตัวเป็นแบบอาเรย์กัน



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การหาสนามรวมของสายอากาศไมโครสตริปหนึ่งเอเลเมนต์นั้นจะหาได้จากการนำเอาสนามของปากเปิดหนึ่งตัวคูณกับแฟคเตอร์ค่าหนึ่ง เรียกว่า อาร์เรย์แฟคเตอร์ (Array Factor) เพราะฉะนั้นเราสามารถหาสนามรวมของสายอากาศไมโครสตริปหนึ่งเอเลเมนต์ได้จาก

$$E(\text{รวม}) = [E(\text{ปากเปิดหนึ่งตัวที่จุดอ้างอิง})] \times [\text{อาร์เรย์แฟคเตอร์}] \quad \dots(2.1)$$

ค่าอาร์เรย์แฟคเตอร์สามารถหาได้จาก

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\varphi} \quad \dots(2.2)$$

เมื่อ

N คือ จำนวนเอเลเมนต์ของสายอากาศที่จะนำมาอาร์เรย์กัน

$$\varphi = kl \cos \gamma + \beta$$

β คือ ความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศ ในที่นี้เราจะให้เฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศเป็นเฟสเดียวกัน หรือ $\beta = 0$

สายอากาศแบบช่องเปิดสองตัววางตัวอาร์เรย์กันในแนวแกน Y ดังนั้น

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= a_y \cdot a_r = a_y \cdot (a_x \sin \theta \cos \phi + a_y \sin \theta \sin \phi + a_z \cos \theta) \\ &= \sin \theta \sin \phi \end{aligned} \quad \dots(2.3)$$

แทนสมการที่ (2.3) ลงในสมการที่ (2.2) จะได้

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)kl \sin \theta \sin \phi + \beta} \quad \dots(2.4)$$

เมื่อ

N คือ จำนวนสายอากาศปากเปิด = 2

สำหรับการคำนวณหาค่า E ของสายอากาศปากเปิดในสมการที่(2.1)จะใช้ฟังก์ชันช่วย (Auxiliary Function) ที่เรียกว่า ศักดาเวกเตอร์(Vector Potential)มาช่วยในการแก้ปัญหา โดยศักดาเวกเตอร์ที่ใช้กันมากได้แก่ศักดาเวกเตอร์แม่เหล็ก(Magnetic Vector Potential) A และศักดาเวกเตอร์ไฟฟ้า(Electric Vector Potential) F สำหรับการคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า E และความเข้มสนามแม่เหล็ก H มักจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ จะหาฟังก์ชันช่วยจากความหนาแน่นกระแสต้นกำเนิด (Source Current Density) ก่อนซึ่งจะเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M จากนั้นจะคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า E และ ความเข้มสนามแม่เหล็ก H ตามลำดับ

สนามไฟฟ้าในแนวแกน Y ที่ ช่องเปิด สามารถสมมติให้เป็นค่าคงที่และมีค่าเท่ากับ

$$E_a = a_y E_o \begin{cases} -h/2 \leq x' \leq h/2 \\ -w/2 \leq y' \leq w/2 \end{cases} \quad \dots(2.5)$$

โดยใช้หลักการสนามสมมูลซึ่งจะคำนวณหาความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กเชิงผิว (M_s) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเชิงผิว (J_s) อันเป็นแหล่งจ่ายสมมูลซึ่งเป็นต้นกำเนิดสนามออกมาดังนี้

$$M_s = -2n \times E_a = -2a_z \times a_y E_o = 2E_o a_x \begin{cases} -h/2 \leq x' \leq h/2 \\ -w/2 \leq y' \leq w/2 \end{cases} \quad \dots(2.6)$$

$$= 0 \quad \text{สำหรับบริเวณอื่นๆ}$$

และ

$$J_s = 0 \quad \text{สำหรับบริเวณอื่นๆ} \quad \dots(2.7)$$

เมื่อเราทราบต้นกำเนิดของสนามไฟฟ้า (J) และสนามแม่เหล็ก (M) แล้วโดยอาศัยศักดาเวกเตอร์ไฟฟ้า (F) และศักดาเวกเตอร์แม่เหล็ก (A) สามารถที่จะนำมาคำนวณหาสนามแม่เหล็ก (H) และสนามไฟฟ้า (E) ในบริเวณระยะไกล (Far-Field) อันเป็นรูปแบบในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปได้ดังนี้

1. กำหนดแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก M และกระแสไฟฟ้า J
2. หา F เนื่องจาก M_s เมื่อ $J_s = 0$ โดยใช้

$$F = \frac{\epsilon}{4\pi} \iint_s M_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad \dots(2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบจะพิจารณาในบริเวณระยะไกล (Far field) สามารถประมาณค่า R ได้ดังนี้

$$R \cong r - r' \cos \varphi \quad \text{สำหรับการแปรผันทางเฟส} \quad \dots(2.9)$$

$$R \cong r \quad \text{สำหรับการแปรผันทางแอมพลิจูด} \quad \dots(2.10)$$

เมื่อ

r คือ ระยะห่างจากจุดโคออดิเนต (Coordinate) ไปยังจุดที่สังเกต

r' คือ ระยะห่างจากจุดโคออดิเนตไปยังจุดใดๆ บนพื้นที่

φ คือ มุมระหว่างเวกเตอร์ r และ r'

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10) ลงในสมการที่ (2.8) สามารถหาค่าเวกเตอร์ไฟฟ้าได้ดังนี้

$$F \cong \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint_s Ms \frac{e^{-jk(r-r'\cos\varphi)}}{r} ds' \quad \dots(2.11)$$

จากสมการที่ (2.11) และสามารถแยกพจน์ได้เป็น

$$F \cong \frac{\varepsilon}{4\pi r} \iint_s Ms e^{-jkr} \cdot e^{jkr' \cos \varphi} ds' \quad \dots(2.12)$$

เมื่อพิจารณาเทอม e^{jkr} ให้เป็นค่าคงที่ที่สามารถดึงมาไว้หน้าเทอมอินทิเกรต จะได้

$$F \cong \frac{\varepsilon e^{-jkr}}{4\pi r} \iint_s Ms e^{jkr' \cos \varphi} ds' \quad \dots(2.13)$$

หรือ

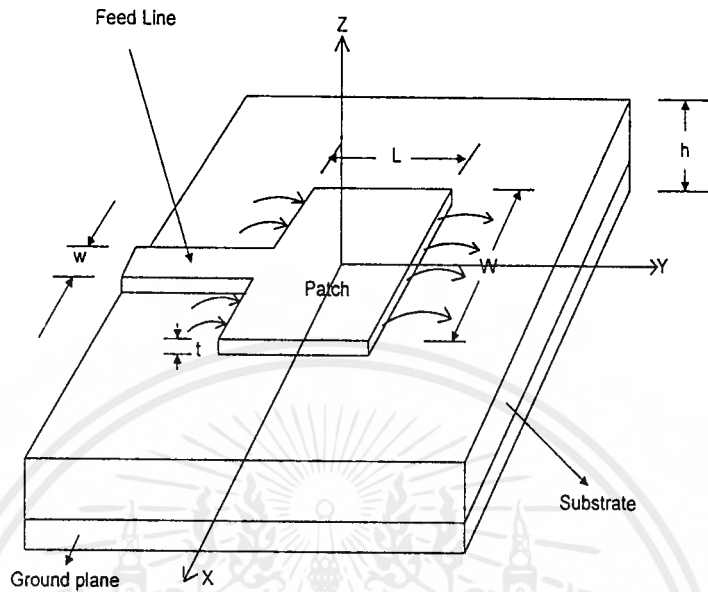
$$F \cong \frac{\varepsilon e^{-jkr}}{4\pi r} L \quad \dots(2.14)$$

เมื่อ

$$L = \iint_s Ms e^{jkr' \cos \varphi} ds' \quad \dots(2.15)$$

ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางตัวของสายอากาศที่วางตัวอยู่ในแต่ละระนาบซึ่งในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปจะพิจารณาให้สายอากาศวางตัวในระนาบ $x-y$ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบการวิเคราะห์สายอากาศในระบบพิกัดฉาก

จากการวิเคราะห์สายอากาศในระบบพิกัดฉากดังนั้นในการหาระยะทางจากจุดใดๆ บนแหล่งจ่ายไปยังจุดที่สังเกตสามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} r' \cos \phi &= r' \cdot a_r = (a_x x' + a_y y') \cdot (a_x \sin \theta \cos \phi + a_y \sin \theta \sin \phi + a_z \cos \theta) \\ &= x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi \end{aligned} \quad \dots(2.16)$$

ในระบบพิกัดฉากในการหาอนุพันธ์ของพื้นที่ (Differential Area) ที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศสามารถหาได้จาก

$$ds' = dx' dy' \quad \dots(2.17)$$

เมื่อนำค่าในสมการที่ (2.16) และสมการที่ (2.17) แทนค่าลงในสมการที่ (2.15) จะได้

$$\begin{aligned}
L &= \iint Ms. e^{jkr' \cos \varphi} ds' \\
&= \iint_s (2Eo a_x) \left(e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' a_\theta \right) \\
&= 2Eo \iint_s (a_x \cdot a_\theta) e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad \dots(2.18)
\end{aligned}$$

การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะพิจารณาในระบบพิกัดทรงกลม ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยนรูปแบบในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จากระบบพิกัดฉากเป็นระบบพิกัดทรงกลม โดยรูปแบบในการเปลี่ยนจากระบบพิกัดฉากเป็นระบบพิกัดทรงกลม (The Rectangular to Spherical Transformation Matrix) [Balanis, 1982] ดังแสดงในสมการที่ (2.15)

$$\begin{bmatrix} A_r \\ A_\theta \\ A_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \\ \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} \quad \dots(2.19)$$

จากรูปแบบในการเปลี่ยนระบบพิกัดฉากเป็นระบบพิกัดทรงกลม เมื่อทำการคูณเมตริกจะได้

$$a_r = a_x \cdot \sin \theta \cos \phi + a_y \sin \theta \sin \phi + a_z \cos \theta \quad \dots(2.20)$$

$$a_\theta = a_x \cos \theta \cos \phi + a_y \cos \theta \sin \phi - a_z \sin \theta \quad \dots(2.21)$$

$$a_\phi = -a_x \sin \phi + a_y \cos \phi \quad \dots(2.22)$$

เมื่อพิจารณา F จะพบว่ามีแต่เฉพาะทิศทาง a_x เท่านั้นเมื่อทำการ dot product ในทิศทางต่างๆได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned}
a_x \cdot a_\theta &= a_x \cdot (a_x \cos \theta \cos \phi + a_y \cos \theta \sin \phi - a_z \sin \theta) \\
&= \cos \theta \cos \phi \quad \dots(2.23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_x \cdot a_\phi &= a_x \cdot (a_x \sin \phi + a_y \cos \phi) \\
&= -\sin \phi \quad \dots(2.24)
\end{aligned}$$

$$a_r = 0 \quad \dots(2.25)$$

แทนค่าสมการที่ (2.23) และแทนค่าขอบเขตของ x' และ y' แทนค่าลงในสมการที่ (2.18) จะได้ L ในทิศทาง a_θ

$$L_\theta = 2E_0 \cos \theta \cos \phi \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad \dots(2.26)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.26) ซึ่งเทอมอินทิเกรตสามารถที่จะแยกการอินทิเกรตโดยใช้หลักการการอินทิเกรตตั้งสมการที่ (2.27)

$$\int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} e^{j\alpha z} dz = c \left[\frac{\sin \frac{\alpha}{2} c}{\frac{\alpha}{2} c} \right] \quad \dots(2.27)$$

เมื่อใช้หลักการการอินทิเกรตตั้งสมการที่ (2.27) ซึ่งสามารถแยกการพิจารณาการอินทิเกรตโดยพิจารณาแยกการอินทิเกรตของแต่ละเทอมได้ดังนี้

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} e^{jkx' \sin \theta \cos \phi} dx' \quad \dots(2.28)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.28) ซึ่งแยกเทอมการอินทิเกรตมาจากสมการที่ (2.26) เปรียบเทียบกับสมการที่ (2.27) จะพบว่า

$$\alpha = k \sin \theta \cos \phi \quad \dots(2.29)$$

แทนสมการที่ (2.29) ในสมการที่ (2.27) จะได้

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} e^{jkx' \sin \theta \cos \phi} dx' = h \left[\frac{\sin \left(\frac{kh}{2} \sin \theta \cos \phi \right)}{\frac{kh}{2} \sin \theta \cos \phi} \right] \quad \dots(2.30)$$

และเทอมอินทิเกรต

$$\int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} e^{jky' \sin \theta \sin \phi} dy' \quad \dots(2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.31) เปรียบเทียบกับสมการที่ (2.27) จะพบว่า

$$\alpha = k \sin \theta \sin \phi \quad \dots(2.32)$$

แทนสมการที่ (2.32) ในสมการที่ (2.27) จะได้

$$\int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} e^{jky' \sin \theta \sin \phi} dy' = w \left[\frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \sin \theta \sin \phi\right)}{\frac{kw}{2} \sin \theta \sin \phi} \right] \quad \dots(2.33)$$

ผลที่ได้จากการอินทิเกรตในแต่ละเทอมในสมการที่ (2.30) และสมการที่ (2.33) แทนค่าลงในสมการที่ (2.26) จะได้

$$L_{\theta} = 2whE_o \cos \theta \cos \phi \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin \theta \cos \phi\right)}{\frac{kh}{2} \sin \theta \cos \phi} \right] \left[\frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \sin \theta \sin \phi\right)}{\frac{kw}{2} \sin \theta \sin \phi} \right] \quad \dots(2.34)$$

หรือสมการที่ (2.34) สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของ $f(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ ได้เป็น

$$L_{\theta} = 2whE_o \cos \theta \cos \phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.35)$$

เมื่อ

$$X = \frac{kh}{2} \sin \theta \cos \phi \quad \dots(2.36)$$

$$Y = \frac{kw}{2} \sin \theta \sin \phi \quad \dots(2.37)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณา L ในทิศทาง a_{ϕ} จะได้ว่า

$$L_{\phi} = \iint_S (2E_o \cdot a_x) e^{-jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \cdot a_{\phi} \quad \dots(2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปลี่ยนระบบพิกัดจากเป็นระบบพิกัดทรงกลม และพิจารณาในทิศทาง a_ϕ เมื่อทำการ dot product กันในทิศทาง a_x และ a_ϕ จะได้ดังสมการที่ (2.20) และแทนค่าขอบเขตของ x' และ y' แทนค่าลงในสมการที่ (2.38)

$$L_\phi = -2Eo.\sin\phi \int_{\frac{-w}{2}}^{\frac{w}{2}} \int_{\frac{-h}{2}}^{\frac{h}{2}} e^{jk(x'\sin\theta\cos\phi+y'\sin\theta\sin\phi)} \dots(2.39)$$

พิจารณาการอินทิเกรต สามารถแยกการพิจารณาเทอมอินทิเกรต โดยพิจารณาแยกแต่ละเทอมดังสมการที่ (2.27) โดยผลของการอินทิเกรตเทอมแรกจะได้

$$\int_{\frac{-h}{2}}^{\frac{h}{2}} e^{jkx'\sin\theta\cos\phi} dx' = h \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2}\sin\theta\cos\phi\right)}{\frac{kh}{2}\sin\theta\cos\phi} \right] \dots(2.40)$$

และผลของการอินทิเกรตเทอมหลังจะได้

$$\int_{\frac{-w}{2}}^{\frac{w}{2}} e^{jky'\sin\theta\sin\phi} dy' = w \left[\frac{\sin\left(\frac{kw}{2}\sin\theta\sin\phi\right)}{\frac{kw}{2}\sin\theta\sin\phi} \right] \dots(2.41)$$

ผลที่ได้จากการแยกอินทิเกรตในแต่ละเทอมในสมการที่ (2.40) และสมการที่ (2.41) เมื่อแทนค่าลงในสมการที่(2.39) จะได้ค่า L ในทิศทาง a_ϕ

$$L_\phi = -2whEo.\sin\phi \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2}\sin\theta\cos\phi\right)}{\frac{kh}{2}\sin\theta\cos\phi} \right] \left[\frac{\sin\left(\frac{kw}{2}\sin\theta\sin\phi\right)}{\frac{kw}{2}\sin\theta\sin\phi} \right] \dots(2.42)$$

หรือสมการที่ (2.42) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$L_\phi = -2Eo.w.h\sin\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \dots(2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน L กับ ศักดาเวกเตอร์ไฟฟ้า F สามารถที่จะหาค่าศักดาเวกเตอร์ไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ โดยการแทนค่าฟังก์ชัน L ที่ได้ในแต่ละทิศทางที่หาได้จากสมการที่ (2.35) และสมการที่ (2.43) ลงในสมการที่ (2.14) จะได้ ศักดาเวกเตอร์ไฟฟ้า F ดังสมการที่ (2.44) และสมการที่ (2.45) ตามลำดับ

$$F_{\theta} = \frac{\epsilon e^{-jkr}}{4\pi r} 2whE_0 \cos\theta \cos\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.44)$$

$$F_{\phi} = -\frac{\epsilon e^{-jkr}}{4\pi r} 2whE_0 \sin\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.45)$$

ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะพิจารณาในสนามระยะไกล(Far Field) โดยสนาม H สามารถที่จะประมาณได้จาก

$$H_F \cong -j\omega F \quad \dots(2.46)$$

และสนาม E สามารถที่จะหาได้จาก

$$E_F = -\eta \mathbf{a}_r \times H_F = j\omega\eta \mathbf{a}_r \times F \quad \dots(2.47)$$

เมื่อ

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \dots(2.48)$$

η เป็นอินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง เมื่อพิจารณาสนาม E ในองค์ประกอบต่างๆ โดยพิจารณาในทิศทาง \mathbf{a}_{θ} ก่อน

$$E_F = j\omega\eta \mathbf{a}_r \times F_{\theta} \mathbf{a}_{\theta} \quad \dots(2.49)$$

$$E_F = j\omega\eta F_{\theta} \mathbf{a}_{\phi} \quad \dots(2.50)$$

แทนค่าสมการที่ (2.40) ลงในสมการที่ (2.46) จะได้สนาม E ในทิศทาง \mathbf{a}_{ϕ}

$$E_{\phi} = j\omega\eta \frac{\epsilon e^{-jkr}}{4\pi r} 2E_0wh \cos\theta \cos\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$E_\phi = jk \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} whE_0 \cos\theta \cos\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.52)$$

และพิจารณา E ในทิศทาง a_ϕ

$$E_F = j\omega\eta \cdot a_r \times F_\phi \cdot a_\phi \quad \dots(2.53)$$

เมื่อทำการ Cross Product สมการที่ (2.53) จะได้

$$E_F = -j\omega\eta F_\phi \cdot a_\theta \quad \dots(2.54)$$

แทนค่าสมการที่ (2.44) ลงในสมการที่ (2.54) จะได้สนาม E ในทิศทาง a_θ

$$E_\theta = j\omega\eta \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} 2E_0wh \sin\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.55)$$

สามารถที่จะจัดสมการที่ (2.55) ใหม่ได้เป็น

$$E_\theta = jk \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} whE_0 \sin\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.56)$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อพิจารณาสนาม H ในองค์ประกอบต่างๆ โดยพิจารณาในทิศทาง a_θ ก่อน

$$H_\theta \cong -j\omega F_\theta \quad \dots(2.57)$$

แทนสมการที่ (2.44) ลงในสมการที่ (2.57) จะได้สนาม H ในทิศทาง a_θ

$$H_\theta \cong -j\omega \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} whE_0 \cos\theta \cos\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.58)$$

หรือ

$$H_\theta \cong -jk \frac{e^{-jkr}}{2\pi r\eta} whE_0 \cos\theta \cos\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.52) และสมการที่ (2.59) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสนาม E และ H โดยทั้งสองค่าจะสัมพันธ์กันด้วยค่า η

$$H_\theta = \frac{-E_\phi}{\eta} \quad \dots(2.60)$$

และพิจารณา H ในทิศทาง a_ϕ

$$H_\phi \cong -j\omega F_\phi \quad \dots(2.61)$$

แทนสมการที่ (2.45) ในสมการที่ (2.61) จะได้สนาม H ในทิศทาง a_ϕ

$$H_\phi \cong j\omega\epsilon \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} whE_o \sin\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.62)$$

หรือ

$$H_\phi \cong jk \frac{e^{-jkr}}{2\pi r \eta} whE_o \sin\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.63)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.56) และสมการที่ (2.63) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสนาม E และ H

$$H_\phi = \frac{E_\theta}{\eta} \quad \dots(2.64)$$

ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าจะวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงของสนามในทิศทางของ θ และ ϕ ดังนั้นสมการที่ (2.56) เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$E_\theta = \sin\phi \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin\theta \cos\phi\right)}{\frac{kh}{2} \sin\theta \cos\phi} \right] \left[\frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \sin\theta \sin\phi\right)}{\frac{kw}{2} \sin\theta \sin\phi} \right] \quad \dots(2.65)$$



และสมการที่ (2.52) สามารถที่จะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$E_\phi = \cos\theta \cos\phi \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin\theta \cos\phi\right)}{\frac{kh}{2} \sin\theta \cos\phi} \right] \left[\frac{\sin\left(\frac{kx}{2} \sin\theta \sin\phi\right)}{\frac{kx}{2} \sin\theta \sin\phi} \right] \quad \dots(2.66)$$

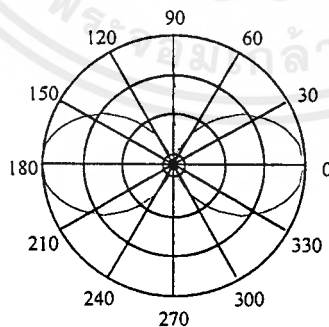
ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะสามารถวิเคราะห์ได้ในระนาบ E-Plane ($\phi = \pi/2$) และ H-Plane ($\phi = 0$)

E - Plane ($\phi = \frac{\pi}{2}$)

$$E_r = E_\phi = 0 \quad \dots(2.67)$$

$$E_\theta = \left[\frac{\sin\left(\frac{kx}{2} \sin\theta\right)}{\frac{kx}{2} \sin\theta} \right] \quad \dots(2.68)$$

เมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 6.0 วิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าในระนาบ E-Plane โดยใช้สมการที่ (2.68) จะได้ดังรูปที่ 2.7



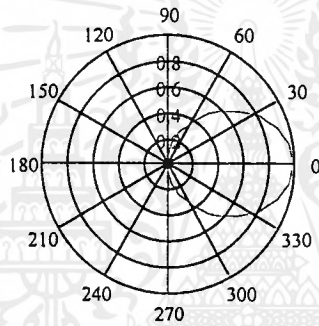
รูปที่ 2.7 แสดงรูปแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้า 1 ช่องเปิดในระนาบ E-Plane

H -Plane ($\phi = 0$)

$$E_r = E_\theta = 0 \quad \dots(2.69)$$

$$E_\phi = \cos \theta \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin \theta\right)}{\frac{kh}{2} \sin \theta} \right] \quad \dots(2.70)$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อใช้โปรแกรมMathcad 6.0 วิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าในระนาบ H -Plane โดยใช้สมการที่ (2.70) จะได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงรูปแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้า 1 ช่องเปิดในระนาบ H -Plane

ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็ก H จะใช้วิธีการเดียวกันกับการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า ดังนั้นสมการที่ (2.59) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$H_\theta = \cos \theta \cos \phi \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin \theta \cos \phi\right)}{\frac{kh}{2} \sin \theta \cos \phi} \right] \left[\frac{\sin\left(\frac{kx}{2} \sin \theta \sin \phi\right)}{\frac{kx}{2} \sin \theta \sin \phi} \right] \quad \dots(2.71)$$

และสมการที่ (2.63) สามารถที่จะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$H_\phi = \sin \phi \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin \theta \cos \phi\right)}{\frac{kh}{2} \sin \theta \cos \phi} \right] \left[\frac{\sin\left(\frac{kx}{2} \sin \theta \sin \phi\right)}{\frac{kx}{2} \sin \theta \sin \phi} \right] \quad \dots(2.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

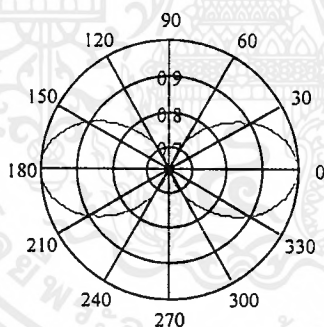
ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กสามารถที่จะวิเคราะห์ในระนาบ E-Plane และ H-Plane ได้เหมือนกับการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า

$$E - \text{Plane} \left(\phi = \frac{\pi}{2} \right)$$

$$H_r = H_\theta = 0 \quad \dots(2.73)$$

$$H_\phi = \left[\frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \sin\theta\right)}{\frac{kw}{2} \sin\theta} \right] \quad \dots(2.74)$$

เมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 6.0 วิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กในระนาบ E-Plane โดยใช้สมการที่ (2.74) จะได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แพทเทิร์นของสนามแม่เหล็ก 1 ช่องเปิดในระนาบ E-Plane

เมื่อพิจารณาในระนาบ H-Plane

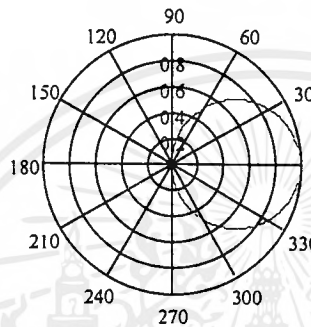
$$H - \text{Plane} (\phi = 0)$$

$$H_r = H_\theta = 0 \quad \dots(2.75)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_\theta = \cos\theta \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin\theta\right)}{\frac{kh}{2} \sin\theta} \right] \quad \dots(2.76)$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 6.0 ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กในระนาบ H-Plane โดยใช้สมการที่ (2.76) จะได้ดังรูป



รูปที่ 2.10 แพทเทิร์นของสนามแม่เหล็ก 1 ช่องเปิดในระนาบ H-Plane

ในการหาสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอเลเมนต์สามารถที่จะหาได้จากสนามไฟฟ้าของหนึ่งช่องเปิดคูณกับค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์ ดังสมการที่ (2.1)

$$E - Plane \left(\phi = \frac{\pi}{2} \right)$$

$$E_r = E_\phi = 0 \quad \dots(2.77)$$

$$E_\alpha = \left[\frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \sin\theta\right)}{\frac{kw}{2} \sin\theta} \right] \sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)kl \sin\theta \sin\phi} \quad \dots(2.78)$$

ในการทำงานเดียวกันในระนาบ H-Plane สามารถที่จะหาสนามไฟฟ้ารวมได้จาก

$H-Plane(\phi = 0)$

$$E_r = E_\theta = 0 \quad \dots(2.79)$$

$$E_\phi = \cos\theta \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin\theta\right)}{\frac{kh}{2} \sin\theta} \right] \sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)kl \sin\theta \sin\phi} \quad \dots(2.80)$$

ในการหาสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์สามารถที่จะหาได้เช่นเดียวกับการหาสนามไฟฟ้ารวม

$E-Plane\left(\phi = \frac{\pi}{2}\right)$

$$H_r = H_\theta = 0 \quad \dots(2.81)$$

$$H_\phi = \left[\frac{\sin\left(\frac{kx}{2} \sin\theta\right)}{\frac{kx}{2} \sin\theta} \right] \sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)kl \sin\theta \sin\phi} \quad \dots(2.82)$$

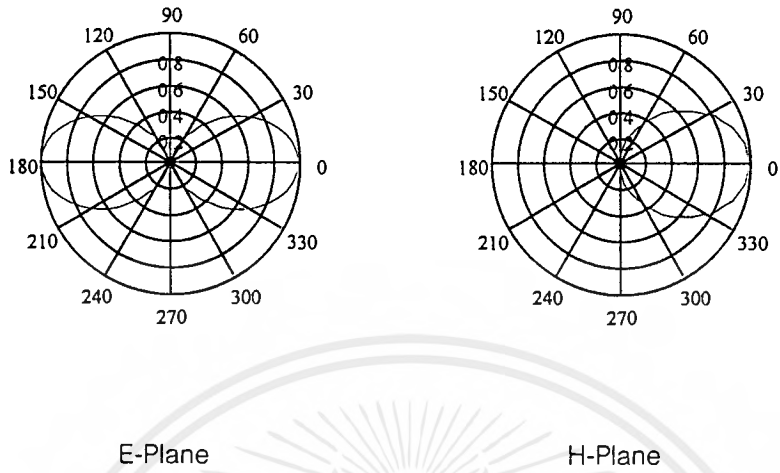
$H-Plane(\phi = 0)$

$$H_r = H_\phi = 0 \quad \dots(2.83)$$

$$H_\theta = \cos\theta \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin\theta\right)}{\frac{kh}{2} \sin\theta} \right] \sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)kl \sin\theta \sin\phi} \quad \dots(2.84)$$

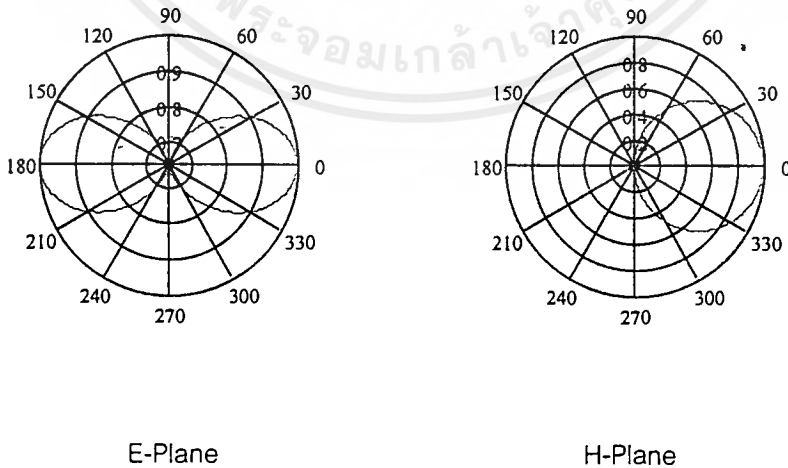
เมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 6.0 วิเคราะห์สนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์ โดยใช้สมการที่ (2.78) และ สมการที่ (2.80) จะได้แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-Plane และ ระนาบ H-Plane ดังรูปที่ 2.11 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แพทเทิร์นสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลิเมนต์โดยใช้สมการที่ (2.82) และ สมการที่ (2.84) จะได้แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-Plane และ ระนาบ H-Plane ดังรูปที่ 2.12 ตามลำดับ

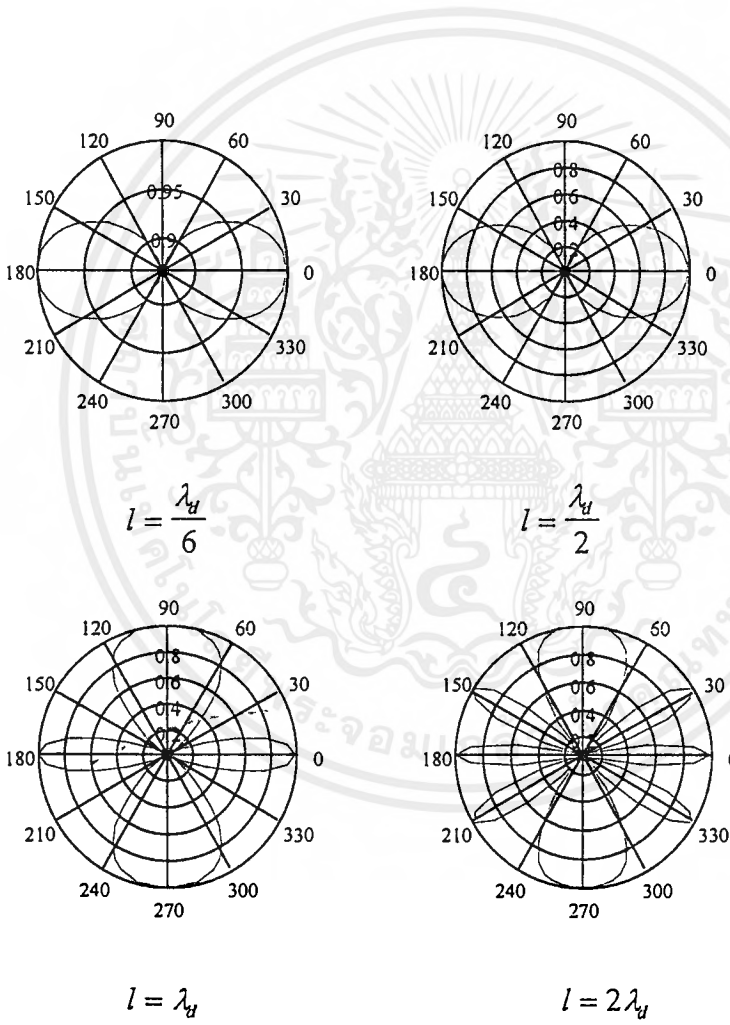


รูปที่ 2.12 แพทเทิร์นสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.11 และ รูปที่ 2.12 จะพบว่าอาร์เรย์เฟคเตอร์จะมีผลเฉพาะแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระนาบ E-Plane เท่านั้น แต่จะไม่มีผลกับแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระนาบ H-Plane เลย

เมื่อสนามรวมของอาร์เรย์จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าของระยะห่างระหว่างเอเลเมนต์(l) เมื่อกำหนดให้ l มีค่าประมาณ $\lambda_g / 2$ แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสนามจะมีทิศทางการแพร่กระจายของสนามไปในสองทิศทาง คือ 0° และ 180° เท่านั้น เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างเอเลเมนต์(l) จะทำให้แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสนามจะมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางอื่นด้วย



รูปที่ 2.13 รูปแสดงการเปลี่ยนระยะห่าง(l) ของสายอากาศ

จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อค่าระยะห่าง(l) มีค่าน้อยกว่าค่า $\lambda_g/2$ แพทเทิร์น การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 อาร์เรย์ (Array)

โดยทั่วไปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเดี่ยวซึ่งมีแพทเทิร์นค่อนข้างกว้างและมีเกนต่ำแต่ในบางงานที่ที่ต้องการใช้สายอากาศที่มีเกนสูง การเพิ่มเกนนี้อาจทำได้โดยการเพิ่มขนาดของสายอากาศเดี่ยวจะทำให้คุณสมบัตินี้ดีขึ้นก็จริง แต่ยังมีวิธีอื่นที่จะเพิ่มเกนของสายอากาศโดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของสายอากาศที่นำมาทำเป็นเอเลเมนต์(Element) ซึ่งทำได้โดยการจัดเอเลเมนต์ที่แพร่กระจายคลื่นให้เหมาะสมทั้งทางด้านไฟฟ้าและรูปทรงซึ่งเรียกว่า อาร์เรย์(Array) ซึ่ง ปกติจะเลือกให้แต่ละเอเลเมนต์เหมือนกัน ในการหา สนามลัพท์ของอาร์เรย์สามารถหาได้โดยการบวกเวกเตอร์สนามของสนามที่แพร่กระจายในแต่ละเอเลเมนต์ซึ่งสนามจะรวมกันในทิศทางที่ต้องการติดต่อสื่อสาร และหักล้างกันในทิศทางที่ไม่ต้องการติดต่อสื่อสาร สายอากาศไมโครสตริปใน 1 เอเลเมนต์จะประกอบด้วยสายอากาศแบบปากเปิด 2 ตัววางอาร์เรย์กันในทิศทางที่เราต้องการ ในการออกแบบนี้จะเป็นการอาร์เรย์แบบที่มีการวางตัวเป็นเส้นตรงหรือ เรียกว่า Linear Array ในการอาร์เรย์แบบวางตัวเป็นเส้นตรงเดียวกันและมีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นไม่เป็น 0 ตัวแปรที่จะกำหนดลักษณะสมบัติของสายอากาศอาร์เรย์แบบนี้มีอยู่สองตัว คือระยะห่างระหว่างสายอากาศและขนาดของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศในแต่ละเอเลเมนต์ซึ่งรวมถึงเฟสของกระแสนั้นด้วยจากตัวแปรสองชนิดนี้สามารถแบ่งสายอากาศอาร์เรย์ที่มีการเรียงตัวเป็นเส้นตรงออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้ [บัณฑิต,2537]

1. Uniform Array หมายถึงแบบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศในแต่ละเอเลเมนต์และขนาดและเฟสของกระแสเท่ากันหมด
2. Uniformly spaced but uniformly excited arrays หมายถึง แบบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศในแต่ละเอเลเมนต์เท่ากัน แต่ขนาดและเฟสของกระแสไม่เท่ากัน
3. Nonuniformly spaced but uniformly excited arrays หมายถึง แบบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศในแต่ละเอเลเมนต์ไม่เท่ากัน แต่ขนาดและเฟสของกระแสเท่ากัน
4. Nonuniformly spaced and nonuniformly excited arrays หมายถึง แบบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศในแต่ละเอเลเมนต์ไม่เท่ากัน แต่ขนาดและเฟสของกระแสไม่เท่ากัน

ในการออกแบบนี้จะกล่าวเฉพาะในแบบ Uniform Array เท่านั้น ซึ่งจะเป็นแบบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศในแต่ละเอเลเมนต์และขนาดและเฟสของกระแสเท่ากันหมด Uniform Array ยังสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.6.1 บรอดไซด์อาร์เรย์ (Broadside Array)

บรอดไซด์อาร์เรย์เป็นอาร์เรย์ที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนอาร์เรย์ เพื่อจะทำให้อาร์เรย์แผ่เดออร์ ของยูนิฟอร์มลิเนียร์อาร์เรย์ มีค่าสูงสุดขึ้นในทิศทาง บรอดไซด์กับแนวแกนอาร์เรย์ทุกเอเลเมนต์จะต้องเป็นเฟสเดียวกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างเอเลเมนต์จะเป็นเท่าไรก็ได้สำหรับยูนิฟอร์มอาร์เรย์ที่มีเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศเท่ากับ 0 และระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละเอเลเมนต์เท่ากับ $n\lambda_0$ เมื่อ n คือจำนวนเอเลเมนต์ของสายอากาศที่นำมาอาร์เรย์กัน (1,2,3,...,n) และ λ_0 คือ ความ

ยาวคลื่นในสารไดอิเล็กตริก นอกจากสนามจะมีค่าสูงสุดในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแกนอาร์เรย์แล้วสนามจะมีค่าสูงสุดในทิศทางตามแนวแกนอาร์เรย์ คือ ในทิศทาง 0 องศา และในทิศทาง 180 องศา

แต่ถ้าเราต้องการที่จะให้สนามที่แพร่กระจายให้มีค่าสูงสุดเฉพาะในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแกนอาร์เรย์เท่านั้น เมื่อเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศเท่ากับ 0 แล้วจะต้องกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละเอเลเมนต์ไม่ให้มีค่าเท่ากับ $n\lambda_0$ ก็จะได้สนามที่แพร่กระจายเฉพาะในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแกนอาร์เรย์ดังกล่าว

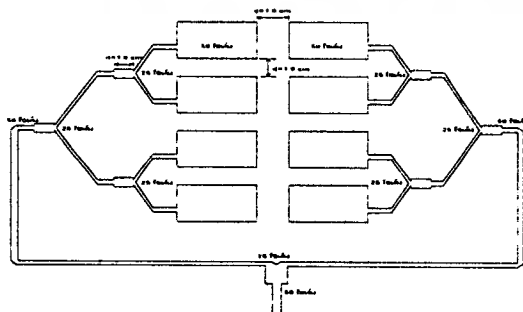
2.6.2 เอนไฟต์อาร์เรย์ (End-fire Array)

เอนไฟต์อาร์เรย์เป็นอาร์เรย์ที่มีการแพร่กระจายคลื่นค่าสูงสุดในทิศทางแนวแกนอาร์เรย์สามารถกำหนดให้แพทเทิร์นมีค่าสูงสุดในทิศทาง 0 องศาหรือ 180 องศาซึ่งสามารถกำหนดได้จากค่าเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศเท่ากับ $-kl$ เมื่อ k คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $2\pi/\lambda$ และ l คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละเอเลเมนต์ สนามจะมีทิศทางแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทาง 0 องศาและถ้าค่าเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศเท่ากับ kl สนามจะมีทิศทางแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทาง 180 องศา

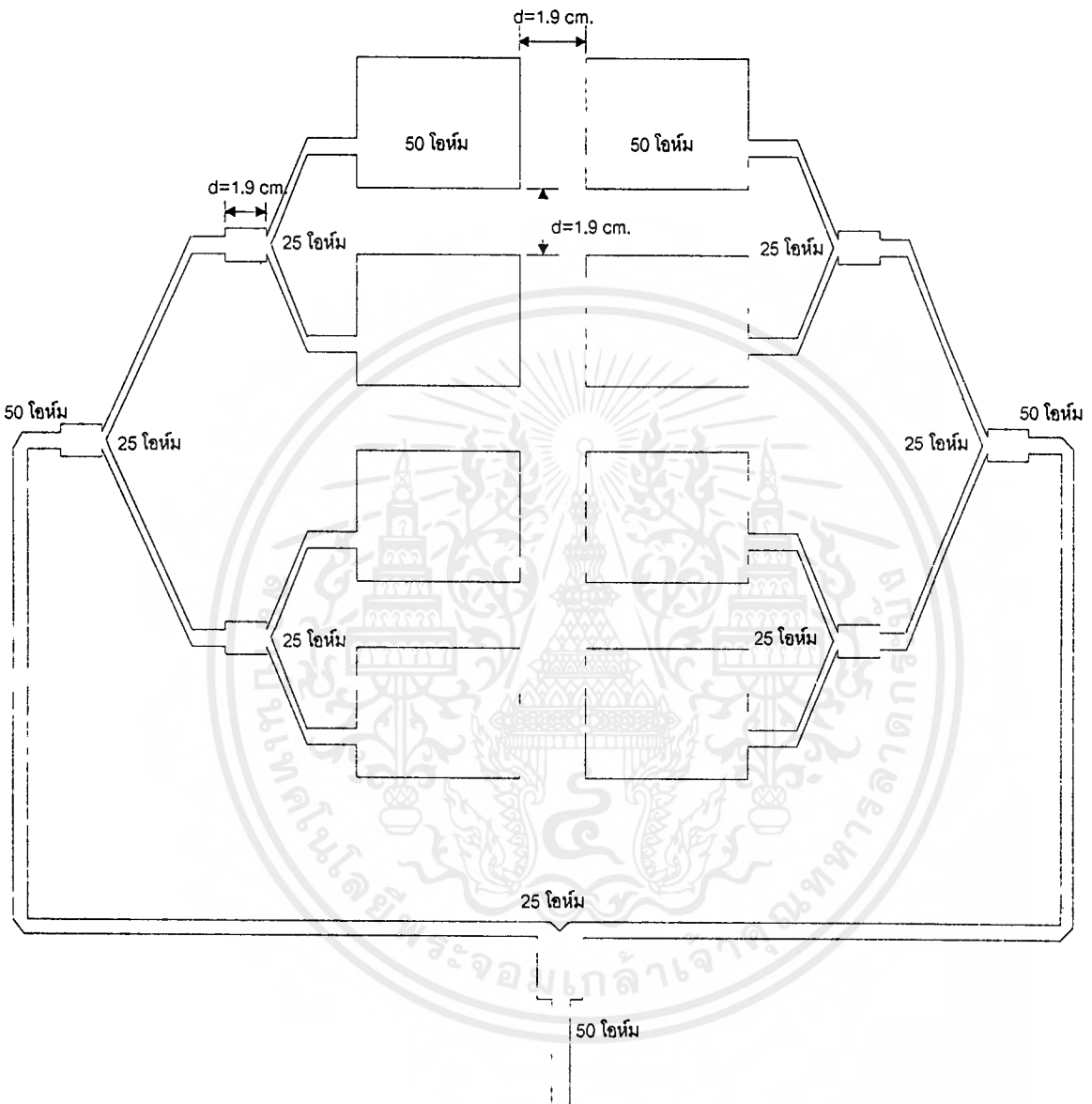
ถ้าระยะห่างระหว่างเอเลเมนต์เท่ากับ $n\lambda_0$ นอกจากจะเป็นเอนไฟต์อาร์เรย์ยังมีค่าสูงสุดของแพทเทิร์นในทิศทางบรอดไซด์อาร์เรย์ด้วย นอกจากนี้ในทิศทางเอนไฟต์ยังชี้ทั้งในทิศทาง 0 องศา และ 180 องศาอีกด้วย ดังนั้นเมื่อระยะห่างระหว่างเอเลเมนต์เท่ากับ $n\lambda_0$ สนามจะมีค่าสูงสุดอยู่ในทั้งสองทิศทาง

2.6.3 การอาร์เรย์ของสายอากาศไมโครสตริปจำนวน 8 เอเลเมนต์

การศึกษาในโครงการนี้ได้นำเอาสายอากาศไมโครสตริปจำนวน 8 เอเลเมนต์มาอาร์เรย์กัน โดยจะแบ่งเป็นสายอากาศออกเป็น 2 ชุดๆละ 4 เอเลเมนต์ จะเห็นได้ว่าการวางตัวของสายอากาศไมโครสตริปนั้นจะวางตัวอาร์เรย์กันในแนวแกน x และวางตัวอาร์เรย์กันในแนวแกน y ดังนั้นเราสามารถที่จะหาค่าอาร์เรย์แฟคเตอร์ในแนวแกน x และในแนวแกน y ได้จากสมการที่(2.2) โดยในการออกแบบนั้นจะเป็นดังรูปที่ 2.14 ซึ่งวิธีในการออกแบบสายอากาศ ไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์นั้นจะกล่าวโดยละเอียดในบทต่อไป



รูปที่ 2.14 แสดงรูปสายอากาศอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์



รูปที่ 2.15 แสดงสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวางตัวของสายอากาศไมโครสตริปนั้นจะวางตัวอาร์เรย์กันในแนวแกน x และวางตัวอาร์เรย์กันในแนวแกน y ดังนั้นจากสมการที่ (2.2) จะได้ค่า $\cos \gamma$ ในแนวแกน x ดังนี้

$$\begin{aligned}\cos \gamma &= a_x \cdot a_r = a_x \cdot (a_x \sin \theta \cos \phi + a_y \sin \theta \sin \phi + a_z \cos \theta) \\ &= \sin \theta \cos \phi\end{aligned}\quad \dots(2.85)$$

ส่วนค่า $\cos \gamma$ ในแนวแกน y นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3) ดังนั้นเราสามารถที่จะหาค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์ในแนวแกน x ได้ดังสมการที่ (2.86) และค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์ในแนวแกน y ได้จากสมการที่ (2.4)

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)kl \sin \theta \cos \phi + \beta} \quad \dots(2.86)$$

เมื่อกำหนดให้

$N =$ การอาร์เรย์กันของสายอากาศในแนวแกน x จำนวน 4 เอเลเมนต์

ดังนั้นในการหาสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์สามารถที่จะหาได้โดยการนำเอาสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอเลเมนต์คูณกับอาร์เรย์เฟคเตอร์ในแนวแกน x และอาร์เรย์เฟคเตอร์ในแนวแกน y จะได้

$$E - Plane \left(\phi = \frac{\pi}{2} \right)$$

$$E_r = E_\phi = 0 \quad \dots(2.87)$$

$$E_\alpha = \left[\begin{array}{c} \sin\left(\frac{kw}{2} \sin \theta\right) \\ \frac{kw}{2} \sin \theta \end{array} \right] \left[\sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi_1} \right] \left[\sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi_2} \right] \left[\sum_{n=1}^4 e^{j(n-1)\psi_3} \right] \quad \dots(2.88)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\psi_1 = kl_1 \sin \theta \sin \phi + \beta_1 \quad \dots(2.89)$$

$$\psi_2 = kl_2 \sin \theta \sin \phi + \beta_2 \quad \dots(2.90)$$

$$\psi_3 = kl_3 \sin \theta \cos \phi + \beta_3 \quad \dots(2.91)$$

โดยกำหนดให้

l_1 = ระยะห่างระหว่างสายอากาศปากเปิดสองตัวในสายอากาศแต่ละเอเลเมนต์

l_2 = ระยะห่างระหว่างสายอากาศไมโครสตริปในแนวแกน y

l_3 = ระยะห่างระหว่างสายอากาศไมโครสตริปในแนวแกน x

β_1 = ความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศชุดที่ 1

β_2 = ความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศชุดที่ 2

β_3 = ความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศชุดที่ 3

ในทำนองเดียวกันในระนาบ H-Plane สามารถที่จะหาสนามไฟฟ้ารวมได้จากการนำเอาสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอเลเมนต์คูณกับอาร์เรย์เฟคเตอร์ในแนวแกน x และอาร์เรย์เฟคเตอร์ในแนวแกน y เช่นเดียวกัน

H-Plane ($\phi = 0$)

$$E_r = E_\theta = 0 \quad \dots(2.92)$$

$$E_\phi = \cos \theta \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin \theta\right)}{\frac{kh}{2} \sin \theta} \right] \left[\sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi_1} \right] \left[\sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi_2} \right] \left[\sum_{n=1}^4 e^{j(n-1)\psi_3} \right] \quad \dots(2.93)$$

ในการหาสนามแม่เหล็กรวมของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์สามารถที่จะหาได้เช่นเดียวกับการหาสนามไฟฟ้ารวม

E-Plane ($\phi = \frac{\pi}{2}$)

$$H_r = H_\theta = 0 \quad \dots(2.94)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

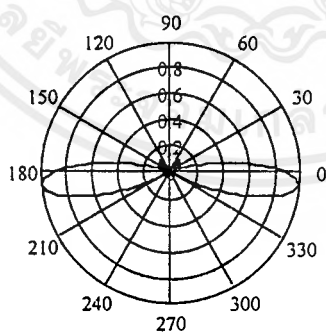
$$H_{\phi} = \left[\frac{\sin\left(\frac{kw}{2}\sin\theta\right)}{\frac{kw}{2}\sin\theta} \right] \left[\sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi_1} \left[\sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi_2} \left[\sum_{n=1}^4 e^{j(n-1)\psi_3} \right] \right] \right] \quad \dots(2.95)$$

H-Plane ($\phi = 0$)

$$H_r = H_{\phi} = 0 \quad \dots(2.96)$$

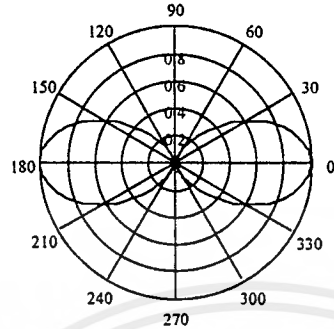
$$H_{\theta} = \cos\theta \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2}\sin\theta\right)}{\frac{kh}{2}\sin\theta} \right] \left[\sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi_1} \left[\sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi_2} \left[\sum_{n=1}^4 e^{j(n-1)\psi_3} \right] \right] \right] \quad \dots(2.97)$$

เมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 6.0 วิเคราะห์สนามไฟฟ้าของสายอากาศ ไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เลเดเมนต์ โดยใช้สมการที่ (2.88) และ สมการที่ (2.93) จะได้แพทเทิร์นการแผ่กระจายคลื่นในระนาบ E-Plane และ ระนาบ H-Plane ดังรูปที่ 2.16 ตามลำดับ



E-Plane

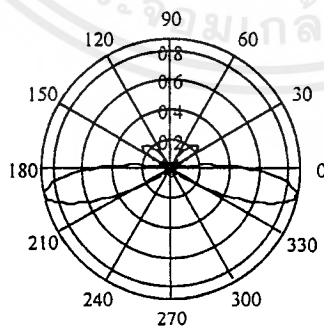
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



H-Plane

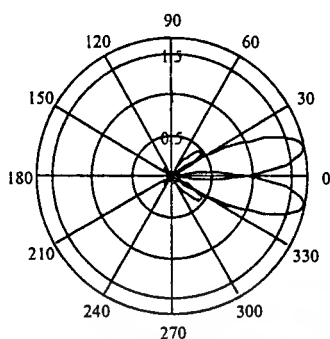
รูปที่ 2.16 แพทเทิร์นสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลเมนต์

ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลเมนต์โดยใช้สมการที่ (2.95) และสมการที่ (2.97) จะได้แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-Plane และ ระนาบ H-Plane ตามลำดับ



E-Plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



H-Plane

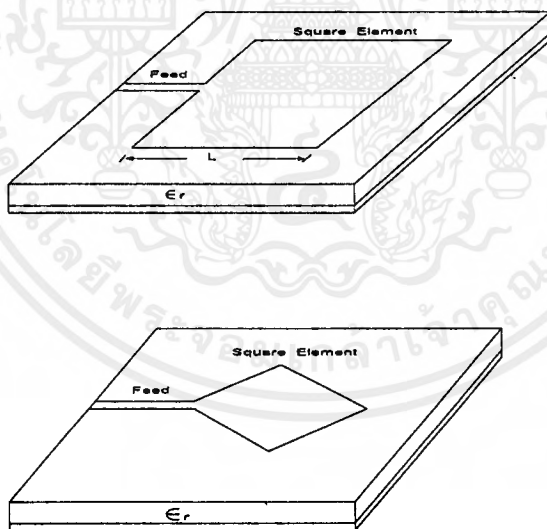
รูปที่ 2.17 แพทเทิร์นสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลเมนต์

2.7 เทคนิคการป้อนสัญญาณสายอากาศไมโครสตริป (Excitation Techniques)

สายอากาศไมโครสตริปจะมีการแพร่กระจายคลื่นของเอเลเมนต์ในแต่ละด้านของสารไดอิเล็กตริกและมีวิธีการป้อนสัญญาณสองวิธีคือการป้อนสัญญาณแบบสายส่งไมโครสตริป (Microstrip Feed) และการป้อนสัญญาณแบบสายส่งโคแอกเซียล Coaxial Feed) ในการป้อนสัญญาณจะต้องป้อนให้เกิดความสมดุลย์ (Matching) เสมอระหว่างสายป้อนสัญญาณกับตัวสายอากาศเพราะอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกับสายป้อนสัญญาณจะต้องมีค่าเท่ากันประมาณ 50 โอห์มซึ่งจะเกิดการสมดุลย์ (matching) ได้นั้นจะต้องเลือกตำแหน่งของสายป้อนสัญญาณ (Feed Line) ด้วย ตำแหน่งการป้อนสัญญาณทั้งการป้อนสัญญาณแบบสายส่งไมโครสตริป และ การป้อนสัญญาณแบบสายส่งโคแอกเซียล เราสามารถกล่าวสรุปวิธีการป้อนทั้งสองแบบได้ดังนี้

2.7.1 การป้อนสัญญาณแบบสายส่งไมโครสตริป (Microstrip Feed)

การป้อนสัญญาณแบบสายส่งไมโครสตริปเราสามารถแบ่งวิธีการป้อนสัญญาณได้สองวิธี คือ วิธีการป้อนสัญญาณที่ศูนย์กลางของแผ่นสายอากาศไมโครสตริป(Center Feed Microstrip Antennas) และ วิธีการป้อนสัญญาณแบบด้านข้างของแผ่นสายอากาศไมโครสตริป(Off - Center Feed Microstrip Antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงการป้อนสัญญาณแบบสายส่งไมโครสตริป

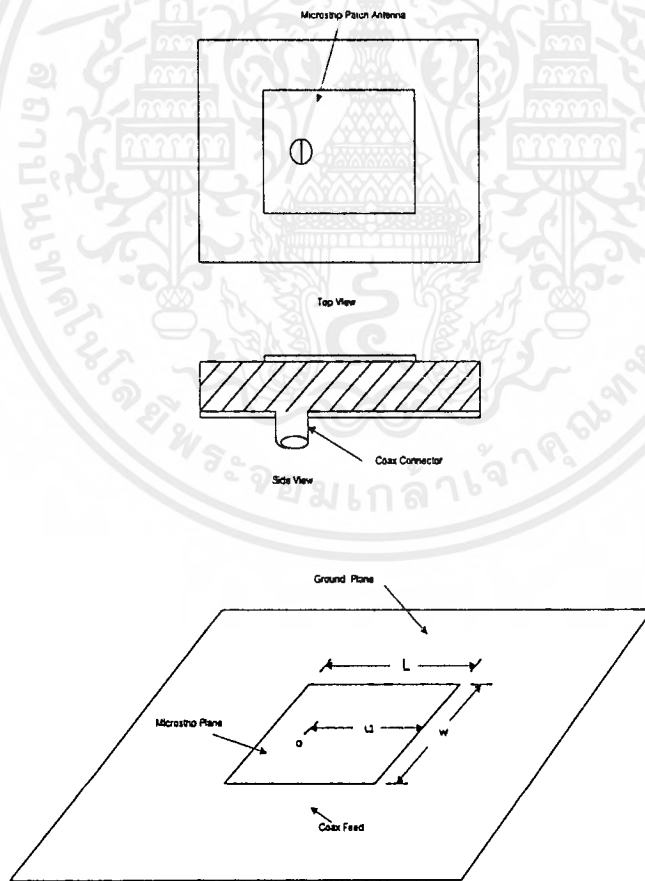
ตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณจะเป็นตัวกำหนดวิธีการกระตุ้นให้กับสายอากาศ เช่น การป้อนแบบจุดศูนย์กลางของแผ่นสายอากาศจะต้องทำการทดลองเพื่อที่จะหาตำแหน่งที่มีอิมพีแดนซ์ของสายป้อน 50 โอห์ม ซึ่งอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายป้อนเราสามารถวัดค่าออกมาได้ เมื่อนำสายป้อนมาป้อนให้กับสายอากาศแล้วจะต้องเกิดการสมดุลย์ขึ้นระหว่างสายป้อนสัญญาณกับแผ่นตัวนำที่เป็นสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปแบบเฉพาะของการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสามารถป้อนได้หลายวิธีสนามของสายอากาศเปลี่ยนแปลงตามความกว้างของสายส่งแบบไมโครสตริปอินพุทอิมพีแดนซ์ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสายป้อน(Feed Line) จะมีผลกระทบบ้างเล็กน้อยโดยจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง ระหว่างสายป้อนสัญญาณ และสายอากาศแต่ในส่วนของแพทเทิร์นของสายอากาศจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าความถี่เรโซแนนซ์มีการเลื่อนออกไปสามารถชดเชยได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของแผ่นสายอากาศให้มีขนาดเล็กลง

2.72 การป้อนสัญญาณแบบสายส่งโคแอกเซียล (Coaxial Feed)

ในการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแบบสายส่งโคแอกเซียล มักจะกระทำที่ด้านหลังของแผ่นสายอากาศ ซึ่งตำแหน่งของคอนเนคเตอร์ที่ต่ออยู่กับสายอากาศไมโครสตริป สามารถที่จะหาได้จากการสังเกตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.19 รูปแบบการป้อนสัญญาณแบบสายส่งโคแอกเซียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

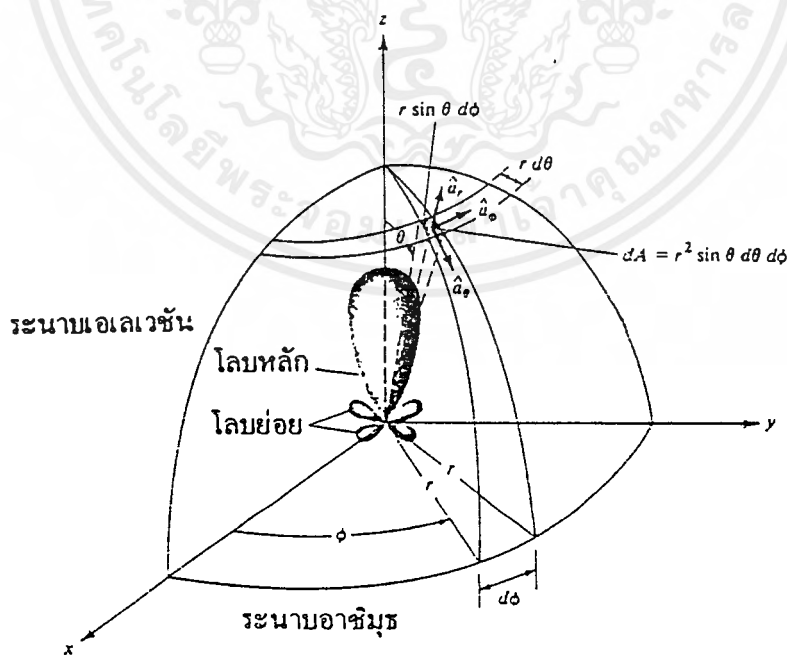
บทที่ 3

พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

ในการศึกษาเรื่องสายอากาศนั้นเราจะต้องรู้ถึงความหมายของคำเฉพาะในการใช้งานด้านนี้ ซึ่งคำเหล่านี้จะมีการนำมาใช้งานในด้านสายอากาศทั้งหมดไป และสากลเพื่อให้เข้าใจกันในการใช้งาน คำเฉพาะที่ใช้งานในเรื่องนี้มีมากมาย แต่จะขอลำดับถึงบางคำที่มีการนำมาใช้บ่อยๆ ในการกล่าวอ้างอิงถึงในการศึกษาในส่วนของพื้นฐานวิชาสายอากาศต่างๆ ไป ดังนี้

3.1 แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันสเปซโคออร์ดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far field) การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นจะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity), ความเข้มของสนาม (Field Strength), เฟส (Phase) หรือ โพลาริเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงพลังงานเป็นฟังก์ชันระนาบสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่ รูปที่ 3.1 แสดงระบบโคออร์ดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีคงที่มีชื่อ เรียกว่า แพทเทิร์นกำลังงาน (Power pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของ สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่มีชื่อเรียกว่า แพทเทิร์นสนาม (Field- Pattern) ของสายอากาศนั้น



รูปที่ 3.1 แสดงระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 โลบของแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น

โอบของแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น (Radiator Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของ แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่น ที่เกิดโดยเป็นบริเวณโดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ ดังรูปที่ 1.3 แสดงโอบการแพร่กระจายคลื่น (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งโอบแบบต่าง ๆ ดังนี้

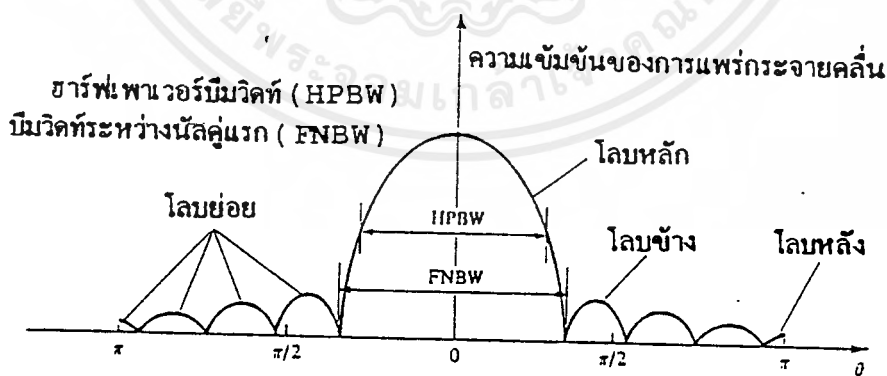
โอบหลัก (Major Lobe, Main Lobe) เป็นโอบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 3.3 มีโอบหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีโอบหลักมากกว่าหนึ่งโอบ เช่น สายอากาศแบบแยกมีม (Splitbeam)

โอบย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ โอบอื่นๆ นอกเหนือไปจากโอบหลัก

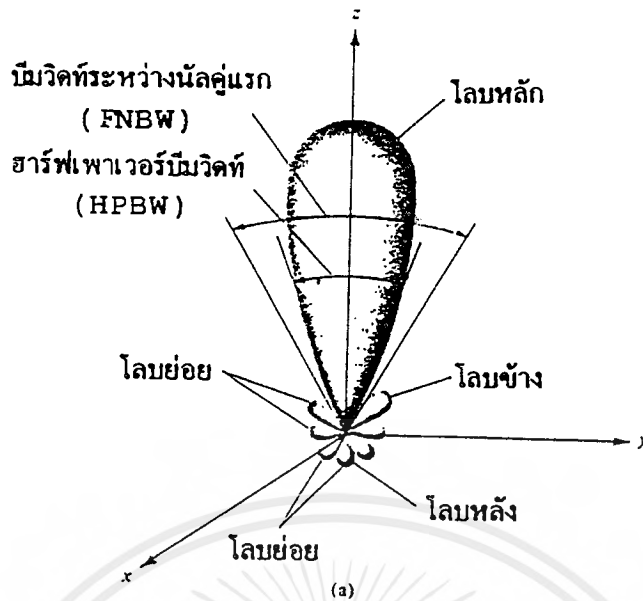
โอบข้างหรือไซด์โอบ (Side Lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ติดกับโอบหลักและอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลม ซีกเดียวกับโอบหลัก

โอบหลัง (Back Lobe) ซึ่งเป็นโอบย่อยที่อยู่ในทิศวงกลมตรงข้ามกับโอบหลัก ปกติแล้วโอบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโอบนี้ให้น้อยที่สุด ระดับของโอบย่อยมักจะแสดงเป็นอัตราส่วนของ ความหนาแน่นของพลังงานที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของกำลังงานในโอบหลัก ซึ่งเรียกว่า

อัตราส่วนของไซด์โอบ (Sidelobe Ratio) หรือระดับของไซด์โอบ (SideLobe Level :SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โอบน้อยกว่า -20dB



รูปที่ 3.2 แสดงแพทเทิร์นในแบบลิเนียร์



รูปที่ 3.3 แสดงโลบต่างๆ และบีมวิดท์ของแพทเทิร์นสายอากาศ

3.2 ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์

ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (Half Power Beamwidth:HPBW) เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในโลบหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด สองจุด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อความสะดวกจะใช้คำย่อ HPBW แทน

3.3 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น

คำจำกัดความของคำว่า ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้ คือกำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศเกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นสามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น และผลจากการกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้ คือ

$$U = r^2 \times W_{rad} \quad \dots(3.1)$$

เมื่อ

U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ,(W/มุมตัน)

W_{rad} = ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น ,(W/m²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้ คือ

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

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

$$\approx \frac{1}{2\eta} \left[|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad \dots(3.2)$$

เมื่อ

\bar{E} = ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

E_θ, E_ϕ = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

η = อินทริเนลคิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นแพทเทิร์นของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นได้เช่นกัน

3.4 ไดรเรคทีวิตี

เพื่อที่จะเข้าใจถึงคำว่าไดเรคทีวิตี (Directivity) เราจำเป็นที่จะต้องรู้จักคำว่าไดเรคทีฟเกน (Directive Gain) ไว้ก่อน ไดรเรคทีฟเกนในทิศทางที่กำหนด คืออัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้เป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source)

ไดเรคทีวิตี คือ ค่าไดเรคทีฟเกน ในทิศทางที่มากที่สุดหรือกล่าวง่าย ๆ ว่า ไดรเรคทีวิตีของต้นกำเนิด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซโทรปิก คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของ ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \quad \dots(3.3)$$

$$D_o = \frac{U_{\max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \quad \dots(3.4)$$

เมื่อ

D_g = ไดเรกทีฟเกน (ไม่มีหน่วย)

D_o = ไดเรกทีฟิตี (ไม่มีหน่วย)

U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/มม²)

U_{max} = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/หน่วยมม²)

U_o = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (W/หน่วยมม²)

P_{rad} = กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (W)

จากสมการที่ 3 และ 4 เราจะทราบว่าไดเรกทีฟเกนและไดเรกทีฟิตีของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส มีค่าเป็นหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า U, U_{max} และ U_o ต่างมีค่าเท่ากัน ไดเรกทีฟิตีของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส มีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะว่ามันแผ่กระจายกำลังออกไปในทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่นๆ นั้นย่อมมีไดเรกทีฟิตีมากกว่าหนึ่งเสมอ

ข้อสรุปอีกอย่างหนึ่งในที่นี้คือ ค่าไดเรกทีฟเกนจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และน้อยกว่าหรือเท่ากับ ไดเรกทีฟิตี ($0 \leq D_g \leq D_o$)

โดยปกติเรามักแสดงไดเรกทีฟเกน และไดเรกทีฟิตีเป็น เดซิเบล

$$D_g \text{ (dB)} = 10 \log_{10} D_g$$

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

3.5 เกน (GAIN)

เกนเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากไดเรกทีฟิตี โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ไดเรกทีฟิตี อธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

เพาเวอร์เกน (Power Gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้นั้นมีค่าเท่ากับ 4π x อัตราส่วนความเข้มการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากหัวต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้ โดยเฉพาะทั่วไปแล้วเราจะคิดเพาเวอร์เกนในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุดดังนั้น

$$Gain = \frac{4\pi \times \text{radiation} \cdot \text{intensity}}{\text{power} \cdot \text{input}}$$

$$= \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}}$$

(ไม่มีหน่วย)

...(3.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยนัยทั่วไปแล้วเรามักจะพูดถึงเกนสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเพาเวอร์เกนในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อเพาเวอร์เกนของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้นเมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศทั้งสองนั้นต้องเท่ากันกับสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็น สายอากาศไดโพลสายอากาศปากแตร หรือสายอากาศอื่นๆ ซึ่งคำนวณเกนได้ง่ายหรือรู้ค่าอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนี้

$$= \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad \dots(3.6)$$

เราสามารถเขียนได้ว่า กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ (P_{in}) ด้วย

$$P_{rad} = e_r P_{in} \quad \dots(3.7)$$

เมื่อ e_r เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) ใช้สมการที่ (3.7) จะทำให้สมการที่ (3.6) มีความสัมพันธ์ง่ายเข้า เป็น

$$G_g(\theta, \phi) = e_r [4\pi U(\theta, \phi)] \quad \dots(3.8)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับสมการไดเรกทิฟเกน คือ

$$G_g(\theta, \phi) = e_r D_g(\theta, \phi) \quad \dots(3.9)$$

ในการทำงานเดียวกันค่าสูงสุดของเกนจะสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตี โดย

$$G_o = G_g(\theta, \phi)_{\max} = e_r D_r(\theta, \phi)_{\max}$$

$$G_o = e_r D_o \quad \dots(3.10)$$

ดังนั้นค่าประมาณของเกนจะมีค่าเป็น

$$G_o = \frac{30,000}{\theta_{1d} \theta_{2d}} \quad \dots(3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติเมื่อกล่าวถึงเกนมักจะหมายถึงเพาเวอร์เกนที่มีค่าสูงสุด ดังแสดง ในสมการที่ (3.10)

$$G_o(dB) = 10\log[e, D_o] \quad \dots(3.12)$$



(b) แสดงการสูญเสียจากการสะท้อนตัวนำและไดอิเล็กตริก

รูปที่ 3.4 แสดงขั้วอ้างอิงและการสูญเสียของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ e_t จะใช้เมื่อเราคำนึงถึงการสูญเสียต่างๆ ที่เข้า และภายใน โครงสร้างของสายอากาศด้วย การสูญเสียต่างๆ เมื่ออ้างอิง ตามรูปที่ 3.3 (b) อาจเนื่องมาจาก

1. การสะท้อนกลับเนื่องจากความไม่สมพจน์ (Mismatch) กันระหว่าง สายส่ง (Transmission Line) กับสายอากาศ

2. การสูญเสียทั้งในตัวนำและฉนวน (I^2R)

โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \quad \dots(3.13)$$

เมื่อ

e_t = ประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)

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

e_c = ประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)

e_d = ประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)

Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เข้าสัปดาห์ของสายอากาศ

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$$

เมื่อ

Z_{in} = อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

Z_o = อิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Characteristic Impedance) ของสายส่ง

ปกติ e_c และ e_d คำนวณได้ลำบากส่วนมากมักหาได้จากการทดลองแต่ถึงกระนั้นก็แยก e_c จาก e_d ไม่ออก ดังนั้นเพื่อความสะดวกมักจะเขียน สมการที่ (3.13) ใหม่

$$e_t = e_r e_{cd} = e_{cd} (1 - |\Gamma|^2) \quad \dots(3.14)$$

เมื่อ

$e_{cd} = e_c e_d$ = ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 อินพุทอิมพีแดนซ์

อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศใดๆ จะเป็นอิมพีแดนซ์ที่ขั้วสายอากาศนั้นๆ อาจเป็นอัตราส่วนของ ศักดาไฟฟ้าต่อกระแสที่ขั้วของสายอากาศนั้น หรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ใน รูปที่ 3.4 (a) โดยที่ a-b เป็นขั้วของสายอากาศอัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสที่ขั้วนี้ เมื่อไม่ได้ต่อโหลด จะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศซึ่งมีค่า

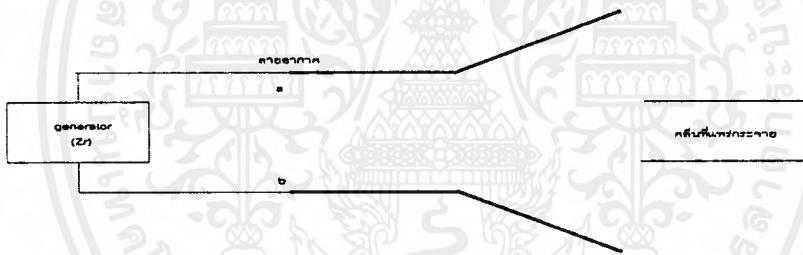
$$Z_A = R_A + jX_A \quad \dots(3.15)$$

เมื่อ

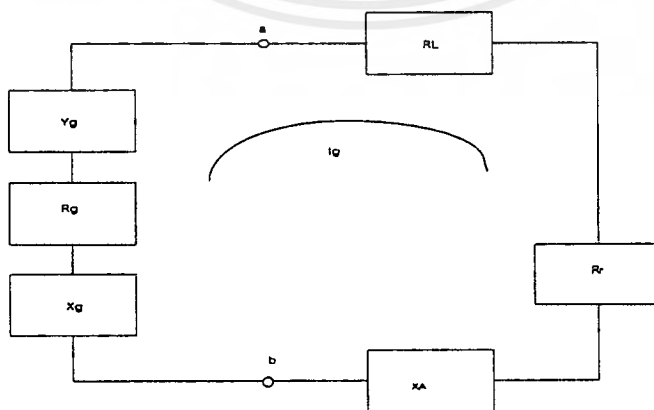
Z_A = อิมพีแดนซ์ที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ (โอห์ม)

R_A = ความต้านทานที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ (โอห์ม)

X_A = รีแอกแตนซ์ที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ (โอห์ม)

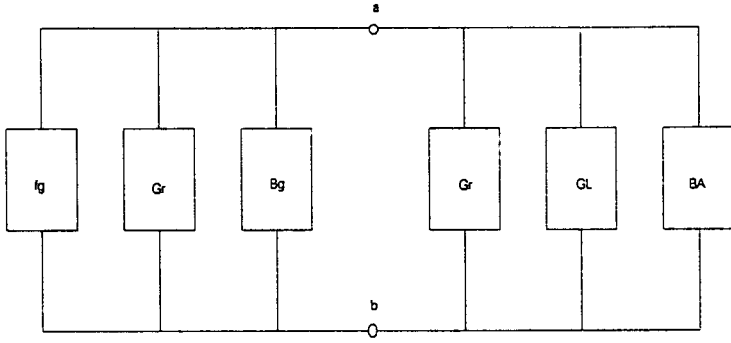


(a) แสดงสายอากาศในโหมดการส่ง



(b) แสดงวงจรสมมูลย์เทเวนิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (b) แสดงวงจรสมมูลย์เทเวนิน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) แสดงวงจรสมมูลย์นอร์ตัน

รูปที่ 3.5 แสดงสายอากาศส่งและวงจรสมมูลย์

โดยทั่วไปความต้านทานในสมการที่ (3.15) จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ดังนี้ คือ

$$R_A = R_r + R_L \quad \dots(3.16)$$

เมื่อ

R_r = ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

R_L = ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ

ถ้าสมมติว่าสายอากาศถูกต้องอยู่กับเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ภายในเป็นดังนี้

$$Z_g = R_g + jX_g \quad \dots(3.17)$$

เมื่อ

R_g = ความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

X_g = รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (โอห์ม)

สายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นสายส่งสัญญาณจะแสดงวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 3.4 (b) ปกติอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่และจะสัมพันธ์กับสายส่ง เฉพาะในช่วงความถี่ช่วงหนึ่ง ๆ เท่านั้น นอกจากนี้อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับ แพลตฟอร์มต่างๆ อีก ได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจาก คำนวณได้ยากจึงมักพบว่า ส่วนใหญ่จะหาอินพุทอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 แบบดิวิตท์

แบบดิวิตท์ของสายอากาศ ถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติ อยู่ในมาตรฐานที่จะกำหนดให้ อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศ มีคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ อินพุทอิมพีแดนซ์, แพทเทอรัน, บีมวีดท์, โฟลาร์ไรเซชัน, ระดับของไซด์โลบ, เกน, ประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ออกแบบจนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนดหรือมาตรฐานสำหรับสายอากาศแบบดังกล่าว มักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำ เช่น แบบดิวิตท์ 10:1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานด้านสูงมีค่ามากกว่าความถี่ที่ใช้งานด้านต่ำอยู่ 10 เท่า

สำหรับสายอากาศแบบแบบดิวิตท์แคบจะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ)หารด้วยความถี่กลางของแบบดิวิตท์ เช่น แบบดิวิตท์ 5% แสดงว่าผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศเป็น 5% ของความถี่กลางของแบบดิวิตท์นั้น

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ (ได้แก่ อินพุทอิมพีแดนซ์, แพทเทอรัน, เกน, โฟลาร์ไรเซชัน ฯลฯ) ไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดแบบดิวิตท์ ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียวได้จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่างไปปกติ แล้วคุณสมบัติของแพทเทอรันกับอิมพีแดนซ์แบบดิวิตท์ มักจะถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบบดิวิตท์ของสายอากาศ นอกจากนี้แบบดิวิตท์, เกน, ระดับของไซด์โลบ, บีมวีดท์, โฟลาร์ไรเซชันจะมีแบบดิวิตท์ค่าเดียวกับแพทเทอรันแบบดิวิตท์ ในขณะที่แบบดิวิตท์ของอิมพุทอิมพีแดนซ์และประสิทธิภาพของการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นค่าเดียวกับอิมพีแดนซ์แบบดิวิตท์

บทที่ 4

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

4.1 การออกแบบแผ่นกระจายคลื่น (Radiating Patch)

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในการศึกษานี้จะออกแบบใช้งานที่ความถี่ 1.880 GHz โดยใช้สารไดอิเล็กตริกแบบอีพอกซีซึ่งมีค่าคงที่สัมพัทธ์ของวัสดุที่นำมาทำขั้วเสถียร มีค่าประมาณ 4.45 และความหนาของสารไดอิเล็กตริก มีค่าประมาณ 1.59 มิลลิเมตร รูปแบบของสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในการศึกษาจะเป็นสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์

ในการศึกษานี้ได้ออกแบบให้สายอากาศไมโครสตริปเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Microstrip Antennas) ในการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศเป็นการป้อนสัญญาณแบบสายส่งไมโครสตริป และใช้ SMA Conductor เป็นจุดต่อระหว่างสายส่งไมโครสตริปกับสายนำสัญญาณ ในการออกแบบสายอากาศแต่ละตัวจะมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

ส่วนแรกของการออกแบบ คือ จะต้องเลือกความหนาของสารไดอิเล็กตริก ที่เหมาะสม สิ่งที่เป็น และปัจจัยที่จะต้องพิจารณาต่อมา คือ รายละเอียดต่างๆ เช่น ค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริก เลือกความถี่ใช้งาน ความกว้างของตัวแพร่กระจายคลื่นในทางปฏิบัติสามารถหาได้จาก [Bahl, 1982]

$$W = \frac{c}{2f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \dots(4.1)$$

เมื่อ

$$c = \text{ความเร็วแสง} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$f_r = \text{ความถี่ใช้งาน} = 1.880 \text{ GHz}$$

$$\epsilon_r = \text{ค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริก} = 4.45$$

จะได้

$$W = 4.833 \text{ เซนติเมตร}$$

สำหรับความยาว(L)จะพิจารณาจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริก(ϵ_e) และการขยายตัวตามยาว(Δl)

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta l \quad \dots(4.2)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \dots(4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่า W ที่ได้แทนในสมการที่ (4.3) จะได้

$$\epsilon_e = 4.186$$

นำค่า W และ ϵ_e แทนในสมการที่ (4.4)

$$\Delta l = 0.412h \left[\frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \right] \quad \dots(4.4)$$

จะได้

$$\Delta l = 0.74 \text{ มิลลิเมตร}$$

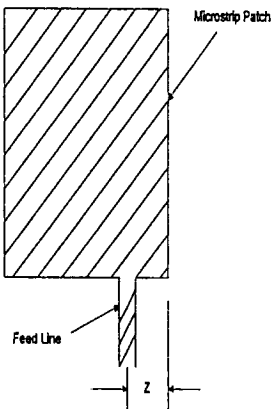
นำค่า Δl แทนในสมการที่ (4.2) จะได้

$$L = 3.753 \text{ เซนติเมตร}$$

เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปที่ออกแบบมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular) ดังนั้นค่าความกว้าง (W) มีค่าเท่ากับ 4.833 เซนติเมตร ค่าความยาว (L) มีค่าเท่ากับ 3.753 เซนติเมตร หรือถ้าคิดโดยประมาณ ค่าความยาว (L) ของสายอากาศมีค่าประมาณเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าความยาวคลื่นของสารไดอิเล็กตริก ($\lambda_g/2$) เมื่อ λ_g สามารถหาได้จาก

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad \dots(4.5)$$

การออกแบบจุดบ่อนสัญญาณอินพุทแอดมิตแดนซ์ที่ตำแหน่งใดๆ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการป้อนสัญญาณสายอากาศไมโครสตริปแบบสายส่งไมโครสตริป

ในการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป(Microstrip Line) จะต้องคำนึงถึงตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้มีอิมพีแดนซ์(Impedance) เท่ากับระบบที่ใช้งาน โดยในการออกแบบจะออกแบบให้สายอากาศไมโครสตริปมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นในการคำนวณหาตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณของตัวสายอากาศ สามารถหาได้จาก

$$Y_m(z) = 2G \left[\cos^2(\beta z) + \frac{G^2 + B^2}{Y_0^2} \sin^2(\beta z) - \frac{B}{Y_0} \sin(2\beta z) \right]^{-1} \dots(4.6)$$

- เมื่อ z = ตำแหน่งใดๆ จากขอบของตัวสายอากาศ
- β = ค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น
- G = ค่าความนำของตัวสายอากาศ
- z = ระยะห่างระหว่างขอบของตัวสายอากาศกับจุดป้อนสัญญาณ

ค่าความนำของตัวสายอากาศสามารถหาได้จาก

$$G = 1/R_r \dots(4.7)$$

โดยที่ R_r = ความต้านทานของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Resistance)

ซึ่งค่าความต้านทานของการแพร่กระจายคลื่นในกรณีนี้ที่ค่าความหนาของแผ่นสารไดอิเล็กตริกมีค่าน้อยมาก สามารถหาค่าความต้านทานของการแพร่กระจายคลื่นได้ดังนี้

$$R_r = 120 \cdot \lambda_0 \quad \dots(4.8)$$

เมื่อ

$$\lambda_0 = \text{ค่าความยาวคลื่นในอากาศ(Free Space)} = c/f_r$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad \dots(4.9)$$

$$B = \frac{k_0 \Delta l \sqrt{\epsilon_r}}{Z_0} \quad \dots(4.10)$$

$$Y_0 = \frac{1}{Z_0} \quad \dots(4.11)$$

เมื่อ

$$Z_0 = \text{ค่าความต้านทานคุณลักษณะของสายส่งมีค่าเท่ากับ } 50 \text{ โอห์ม}$$

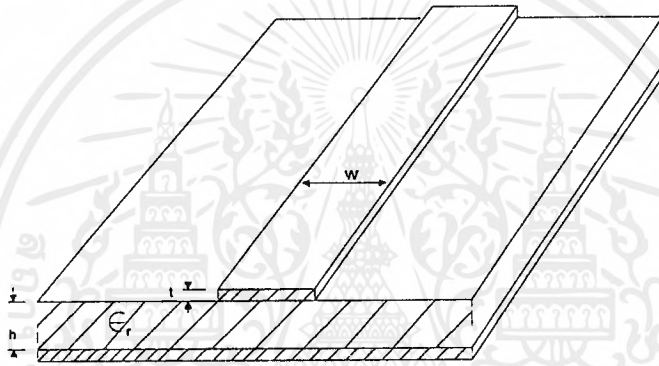
จากสมการที่ (4.6) ในการวิเคราะห์หาค่าตำแหน่งของจุดบ่อนสัญญาณจะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขอบของตัวสายอากาศไมโครสตริปกับตำแหน่งของจุดบ่อนสัญญาณเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลทำให้ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป มีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ดังนั้นจะต้องระมัดระวังในเรื่องของตำแหน่งของจุดบ่อนสัญญาณให้แก่สายอากาศไมโครสตริป ซึ่งเป็นจุดหนึ่งที่สำคัญมากในการนำไปปฏิบัติ และนำไปออกแบบ เมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 6.0 วิเคราะห์ จะได้ค่า

$$\text{ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์}(Z_{in}) = 50 \ \Omega$$

$$\text{ที่ตำแหน่งห่างจากขอบตัวสายอากาศ}(z) = 2.1603 \text{ เซ็นติเมตร}$$

4.2 การออกแบบสายส่งไมโครสตริป

การส่งผ่านพลังงานในย่านความถี่สูงหรือในย่านความถี่ไมโครเวฟ สามารถส่งผ่านพลังงานโดยใช้แถบตัวนำ ที่นิยมใช้โดยทั่วไป เช่นทองแดง หรือทองคำ ซึ่งจะวางตัวในรูปแบบต่างๆ ที่เห็นกันบ่อยๆ เช่นแถบตัวนำทองแดงที่ใช้ร่วมกับสารไดอิเล็กตริกชั้นเสตรท (Substrate) โดยแถบทองแดงที่ใช้จะวางตัวอยู่บนสารไดอิเล็กตริกชั้นเสตรท ซึ่งจะทำให้เกิดความสะดวกในการส่งพลังงาน ในการใช้งานสายส่งไมโครสตริปนั้นความกว้างของแถบตัวนำจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งานความหนาของแถบตัวนำ และค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริกชั้นเสตรท และมีข้อจำกัดของคุณสมบัติการส่งพลังงานที่น้อยกว่าสายส่งแบบโคแอกเซียล สำหรับสายส่งแบบไมโครสตริปจะมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของสายส่งไมโครสตริป

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งหาได้โดย

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{8h}{w'} + 0.25 \frac{w'}{h} \right] \quad ; \frac{w}{h} \leq 1 \quad \dots(4.12)$$

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[\frac{w'}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w'}{h} + 1.444 \right) \right]^{-1} \quad ; \frac{w}{h} \geq 1 \quad \dots(4.13)$$

โดยที่ $\eta_0 = 120\pi \Omega$

$$\frac{w'}{h} = \frac{w}{h} + \frac{1.25t}{\pi h} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right) \quad ; \frac{w}{h} \leq \frac{1}{2\pi} \quad \dots(4.14)$$

$$\frac{w'}{h} = \frac{w}{h} + \frac{1.25t}{\pi h} \left(1 + \ln \frac{2h}{t} \right) \quad ; \frac{w}{h} \geq \frac{1}{2\pi} \quad \dots(4.15)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} F\left(\frac{w}{h}\right) - C \quad \dots(4.16)$$

เมื่อ

$$F\left(\frac{w}{h}\right) = \begin{cases} \left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} + 0.04 \left(1 - \frac{w}{h}\right)^2 & ; \frac{w}{h} \leq 1 \\ \left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} & ; \frac{w}{h} \geq 1 \end{cases} \quad \dots(4.17)$$

$$C = \frac{\varepsilon_r - 1}{4.6} \frac{\frac{t}{h}}{\sqrt{\frac{w}{h}}} \quad \dots(4.18)$$

ซึ่ง

w = ความกว้างของสายส่ง

t = ความหนาของแถบตัวนำ

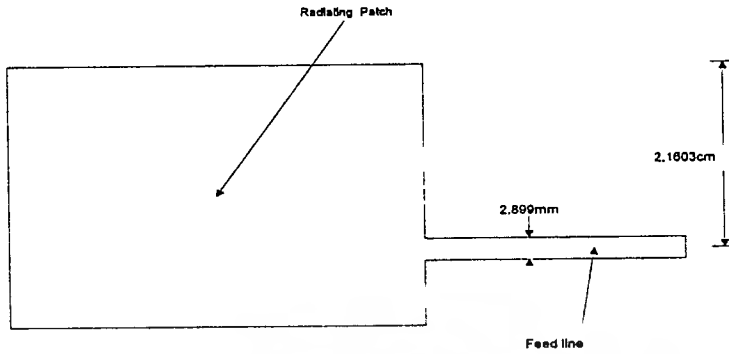
h = ความหนาของชั้นสเตรท

ε_r = ค่าคงที่สัมพัทธ์ของวัสดุที่นำมาทำชั้นสเตรท

เนื่องจากอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม เมื่อใช้ โปรแกรม Mathcad 6.0 วิเคราะห์ จะได้ค่าความกว้างของสายส่งไมโครสตริป

$$w = 2.899 \text{ มิลลิเมตร} \cdot$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

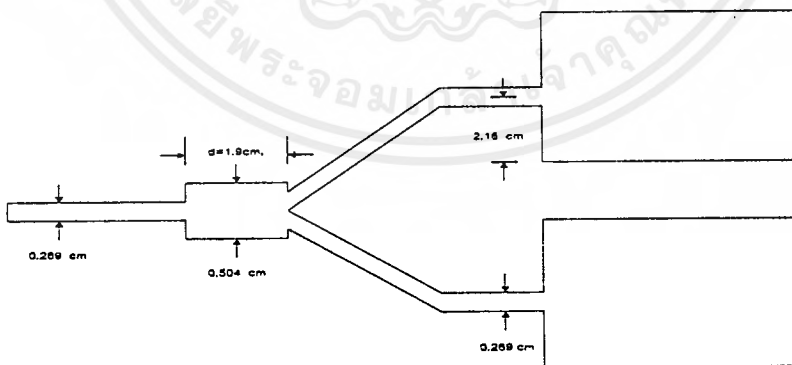


รูปที่ 4.3 แสดงรูปสายอากาศไมโครสตริปที่ออกแบบ

4.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลเมนต์

จากสมการที่ (2.2) จะพบว่าค่าของอาร์เรย์เฟคเตอร์ยังขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญอีกสองตัว คือ ระยะห่างของแต่ละเอลเมนต์ (l) กับค่าความต่างเฟสของแต่ละเอลเมนต์ (β) ดังนั้นในการออกแบบจึงกำหนดให้ระยะห่างของแต่ละเอลเมนต์ (l) มีค่าเท่ากับ $\lambda_g/4$ ทั้งในแนวแกน x และในแนวแกน y โดยอาร์เรย์กันในแนวแกน x 2 เอลเมนต์ และอาร์เรย์กันในแนวแกน y 4 เอลเมนต์ รวมกันเป็น 8 เอลเมนต์ โดยใช้ความกว้างของสายส่งไมโครสตริปและตำแหน่งจุดบ่อนสัญญาณเช่นเดียวกับสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์ ดังรูปที่

4.4



รูปที่ 4.4 แสดงรูปสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอลเมนต์

เนื่องจากใช้สายส่งไมโครสตริปที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นที่จุดรวมจะได้อิมพีแดนซ์รวมเป็น 25 โอห์ม จึงใช้ควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์มาต่อที่ทุกๆ จุดรวม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การออกแบบควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์(Quarterwave transformer)

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปนี้ จะแบ่งสายอากาศเป็น 2 ชุด โดยในแต่ละชุดจะประกอบด้วยสายอากาศชุดละ 4 เอลิเมนต์ ซึ่งในการรวมกันของสายอากาศแต่ละเอลิเมนต์จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเปลี่ยนแปลงไปดังนั้นจึงได้มีการนำหลักการของควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์เข้ามา เพื่อที่จะทำการออกแบบเพื่อที่จะปรับเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้ได้ตามต้องการ ในการออกแบบในครั้งนี้สายอากาศไมโครสตริปในแต่ละเอลิเมนต์จะออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งเมื่อนำสายอากาศมารวมกันจำนวน 2 เอลิเมนต์จะทำให้อิมพีแดนซ์รวมของสายอากาศซึ่งจะพิจารณาเหมือนมีค่าความต้านทานสองตัวขนานกัน ทำให้ได้ความต้านทานรวมของสายอากาศเท่ากับ 25 โอห์ม ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์ สามารถหาได้จากสมการ

$$Z_T = \sqrt{Z_{in} Z_L} \quad \dots(4.19)$$

- เมื่อ
- Z_T = อิมพีแดนซ์ของควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์
 - Z_{in} = อิมพีแดนซ์รวมของสายอากาศ
 - Z_L = อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศแต่ละเอลิเมนต์

แทนค่าในสมการที่ (4.19) จะได้

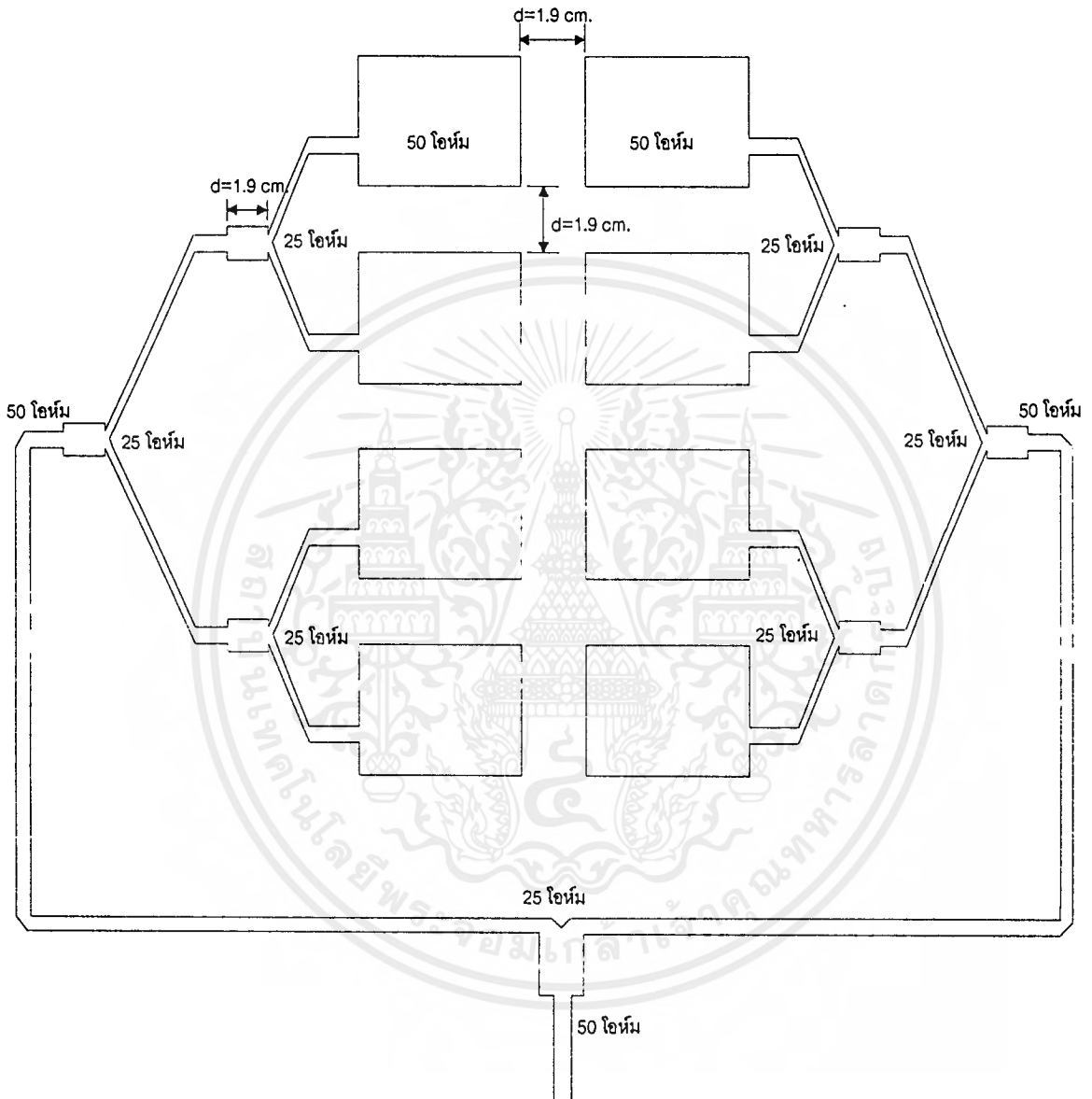
$$Z_T = \sqrt{25 \times 50}$$

จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์มีค่าเท่ากับ

$$Z_T = 35.35 \quad \text{โอห์ม}$$

ในการออกแบบควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์จะกำหนดให้ความยาวมีค่าเท่ากับ $\lambda/4$ ส่วน ความกว้างของควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถวิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Winlin จากการวิเคราะห์จะได้ค่าความกว้างมีค่า

$$W_{at} = 5.04 \quad \text{มิลลิเมตร}$$



รูปที่ 4.5 แสดงสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 การหาอินพุทอิมพีแดนซ์และค่า VSWR

จากการทดลองโดยใช้เครื่อง Network Analyzer วัดหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ และค่า VSWR ของสายอากาศไมโครสตริป ผลจากการทดลองจะเป็นค่าที่ได้มาจากการออกแบบโดยใช้ทฤษฎีในบทที่ 4 ซึ่งมีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์เป็น

$$Z_{in} = 61.1 - j6.1523 \quad \Omega$$

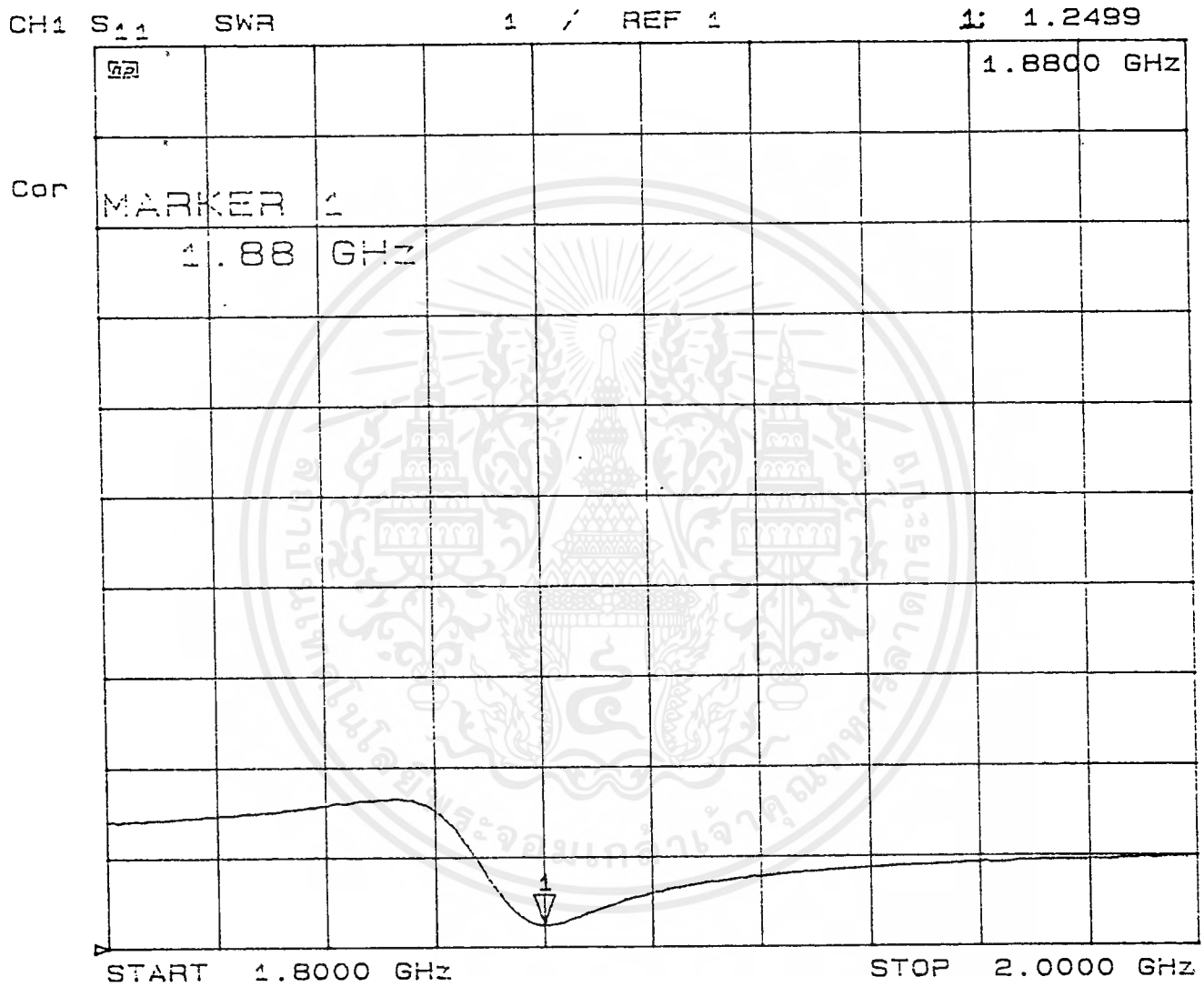
ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ รูปที่ 5.2

จากผลการทดลองที่ได้แสดงว่าสายอากาศที่ออกแบบ ค่าของอินพุทอิมพีแดนซ์ยังไม่ได้เท่ากับ 50Ω ซึ่งทำให้มีผลต่อการนำไปใช้งานจึงต้องมีการปรับปรุงสายอากาศเพื่อให้พลังงานที่ส่งออกไปมีค่ามากที่สุด จึงต้องปรับอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้ได้ 50Ω ตามต้องการ โดยการนำวิธีการปรับแมทซ์ซึ่งมาใช้ ซึ่งจากการทดลอง ได้ทดลองเลียนแบบการปรับแมทซ์โดยการนำวัสดุตัวนำที่เป็นแผ่นทองแดงมาปรับ โดยใช้หลักการของสตัปแมทซ์ซึ่ง ผลที่ได้จะทำให้ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับอินพุทอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ ซึ่งวิธีการปรับแมทซ์จริงๆ ได้มีการศึกษาต่อไป

จากการทดลองเลียนแบบโดยการปรับแมทซ์ซึ่งที่ตัวสายส่งไมโครสตริป จะได้

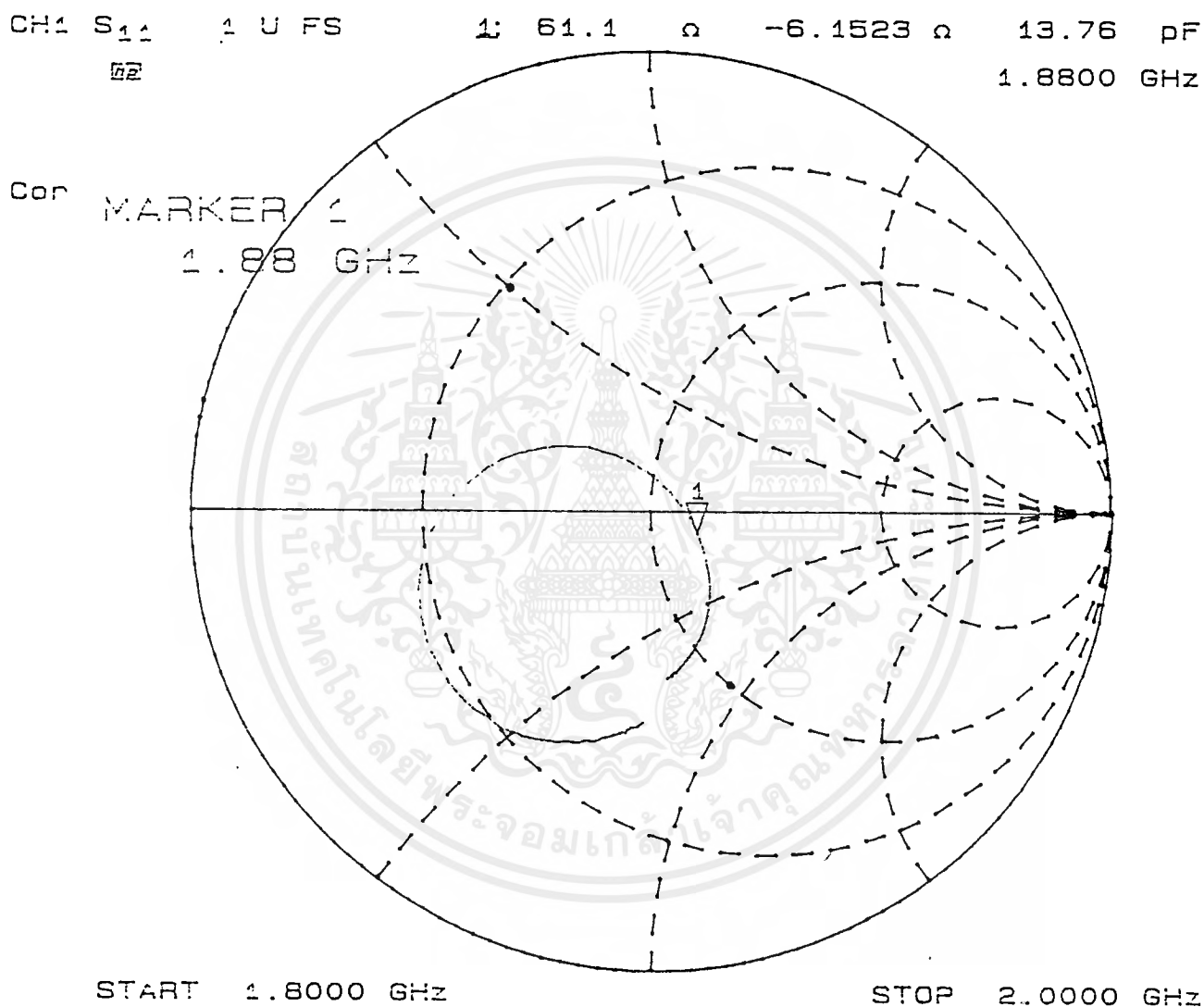
$$Z_{in} = 50.857 - j16.434 \quad \Omega$$

ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และ รูปที่ 5.4



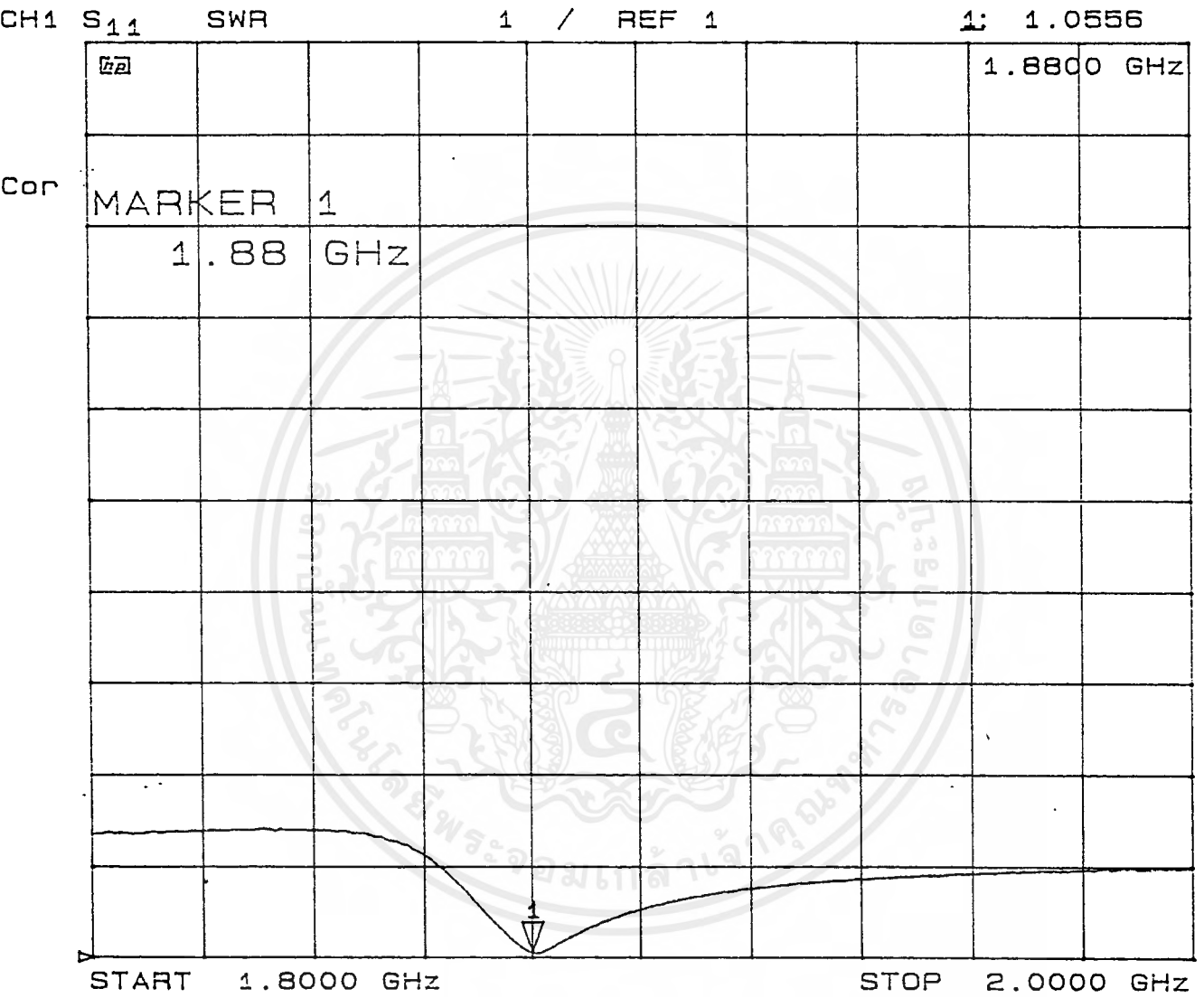
รูปที่ 5.1 แสดงกราฟของ VSWR ก่อนปรับแมทซิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



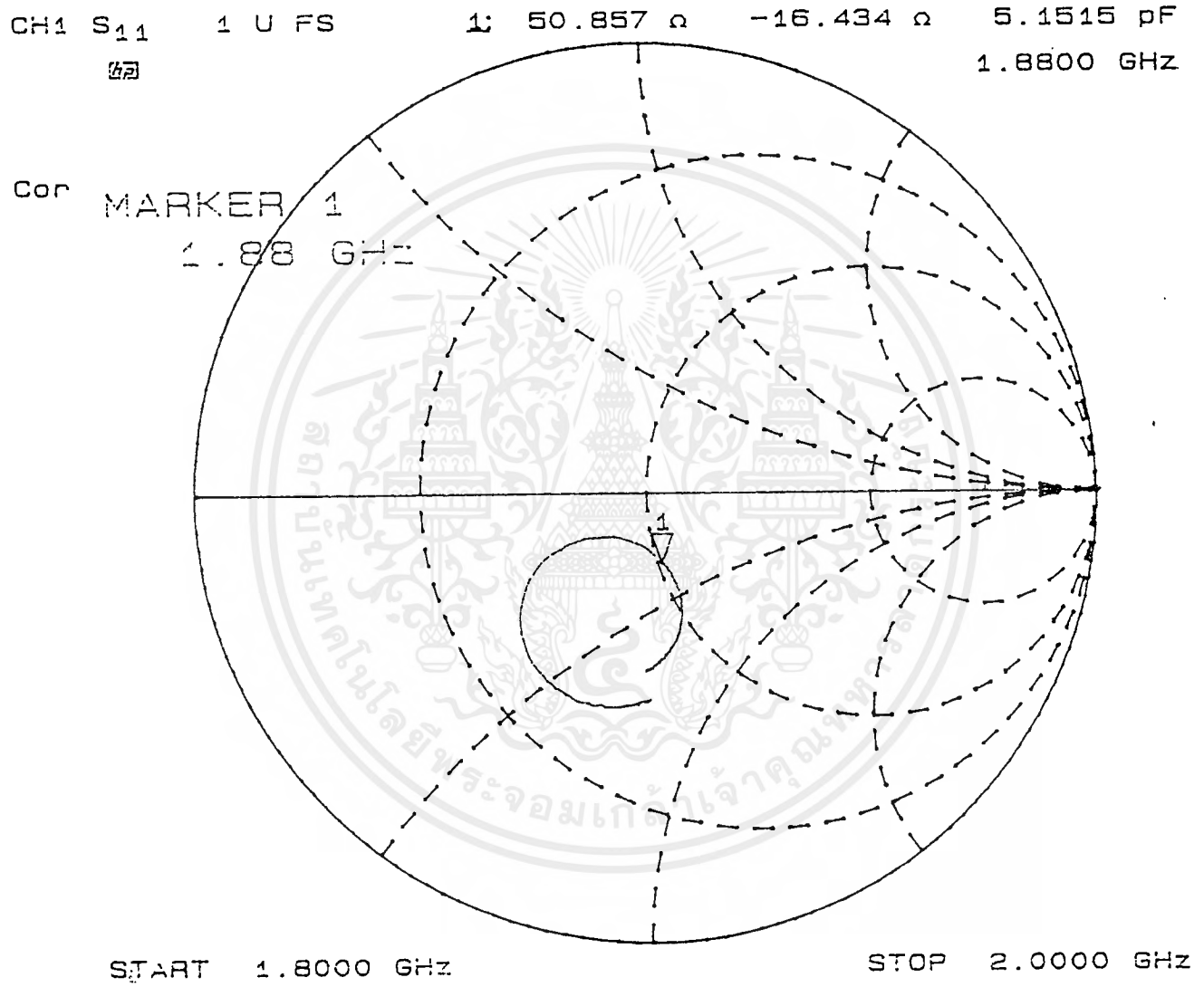
รูปที่ 5.2 แสดงกราฟของอิมพีแดนซ์ก่อนปรับแมทซิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงกราฟ VSWR หลังการปรับแมทซิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

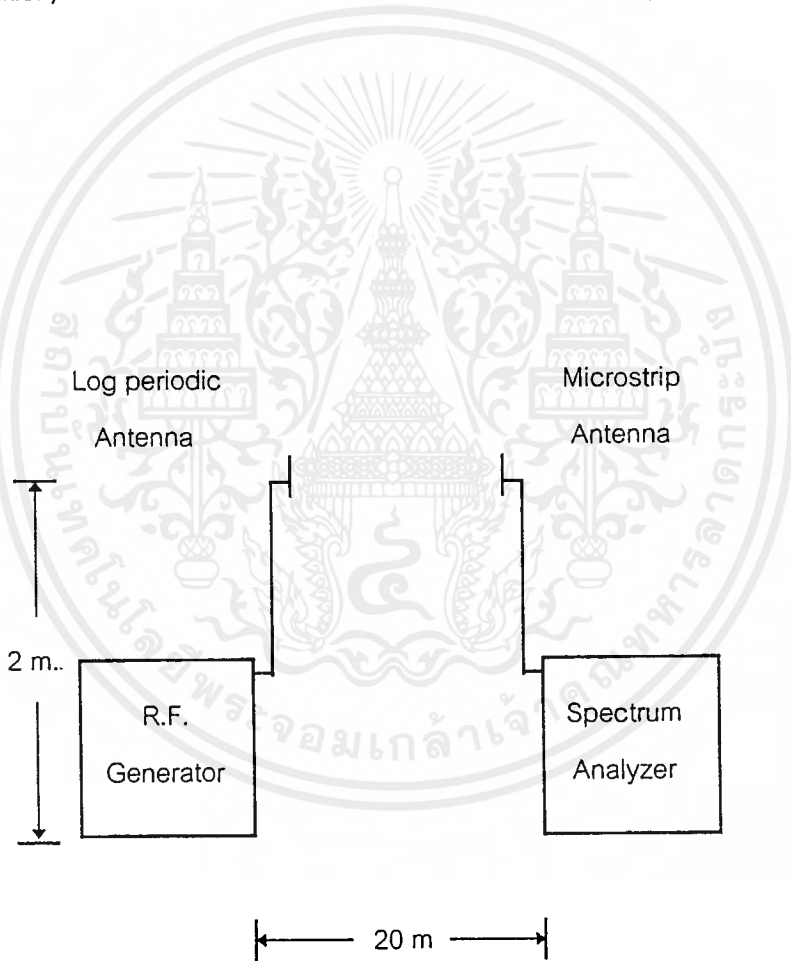


รูปที่ 5.4 แสดงกราฟของอิมพีแดนซ์หลังการปรับแมทซ์ซิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

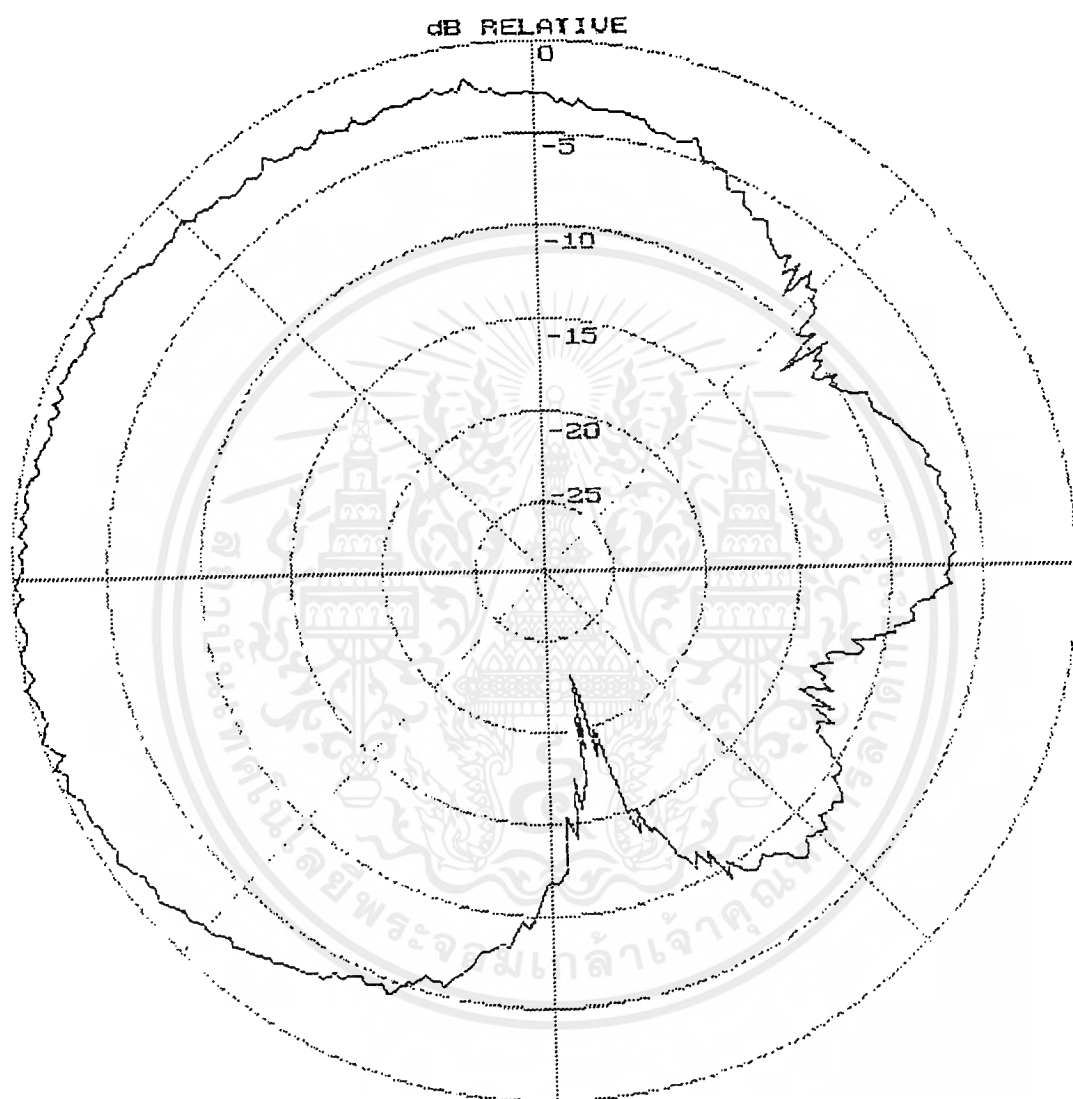
5.2 การวัดการกระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

จากการทดลองได้จัดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยการป้อนพลังงานด้วยสายส่งแบบไมโครสตริป (Microstrip Line) จากการทดลองการตั้งระนาบของสายอากาศทั้งสองต้องตรงกันเพื่อไม่ให้เกิดการผิดพลาด และจะต้องไม่ตั้งให้ชิดกำแพงจนเกินไป หรือตั้งอยู่ในมุมอับเพื่อป้องกันการสะท้อนของคลื่น ความสูงและระยะห่างอยู่ในระยะที่เหมาะสม จากการทดลองต้องตั้งสายอากาศทางด้านรับในระนาบ E และ H โดยที่สายอากาศต้องรับพลังงานจากตัวส่งได้มากที่สุด การวัดหาแพทเทิร์นโดยการปรับมุมโดยการหมุนสายอากาศครั้งละ 1° จนครบ 360° แล้วบันทึกค่าที่ได้จากการทดลอง ผลการทดลองจากการวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular) ซึ่งวัดทางด้านแนวนอน (Horizontal Polalization) แล้วนำผลที่ได้มาพล็อตลงในโพลาร์กราฟ (Polar Graph) ดังแสดงในรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.8



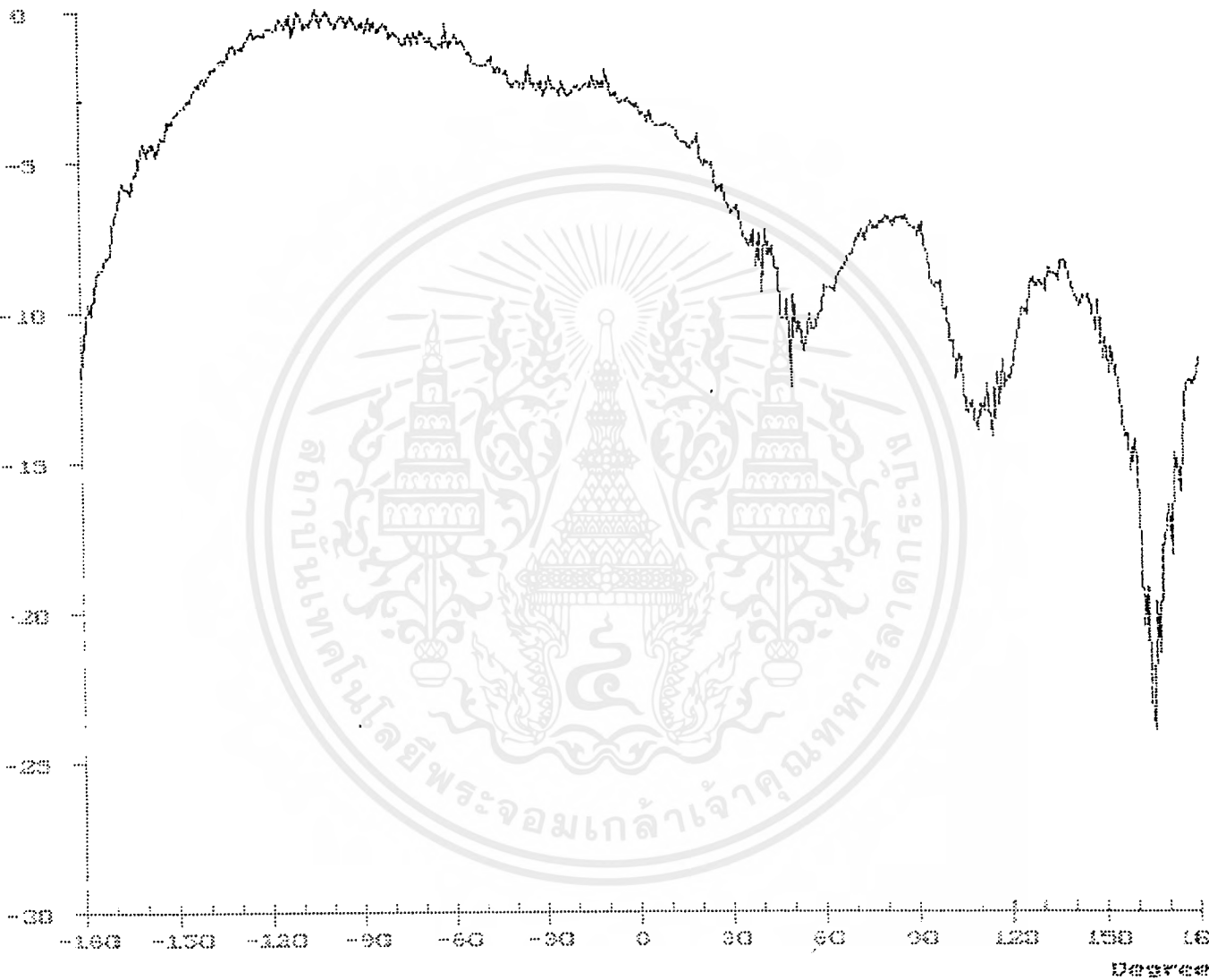
รูปที่ 5.5 แสดงการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



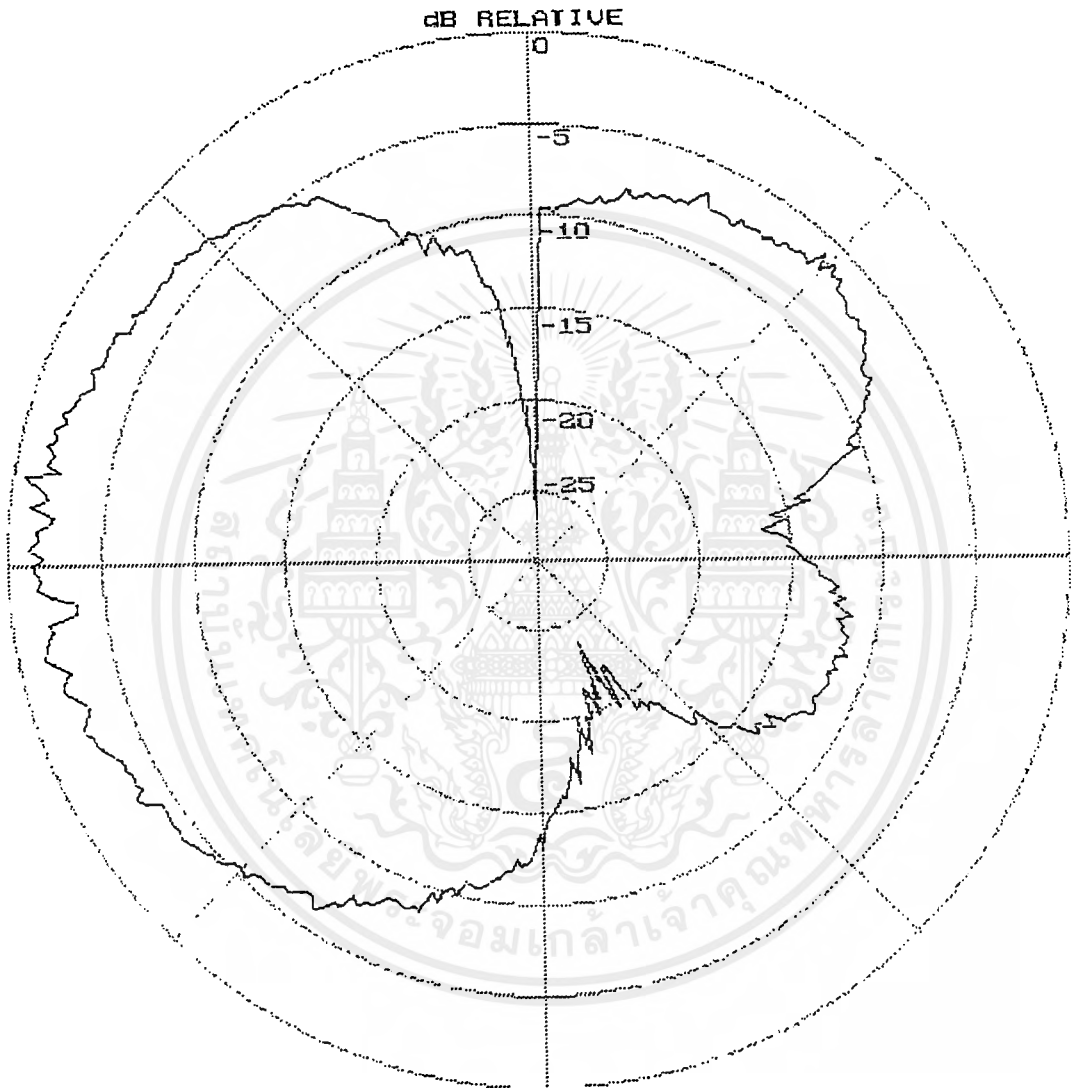
รูปที่ 5.6 แสดงแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าในโพลาร์กราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



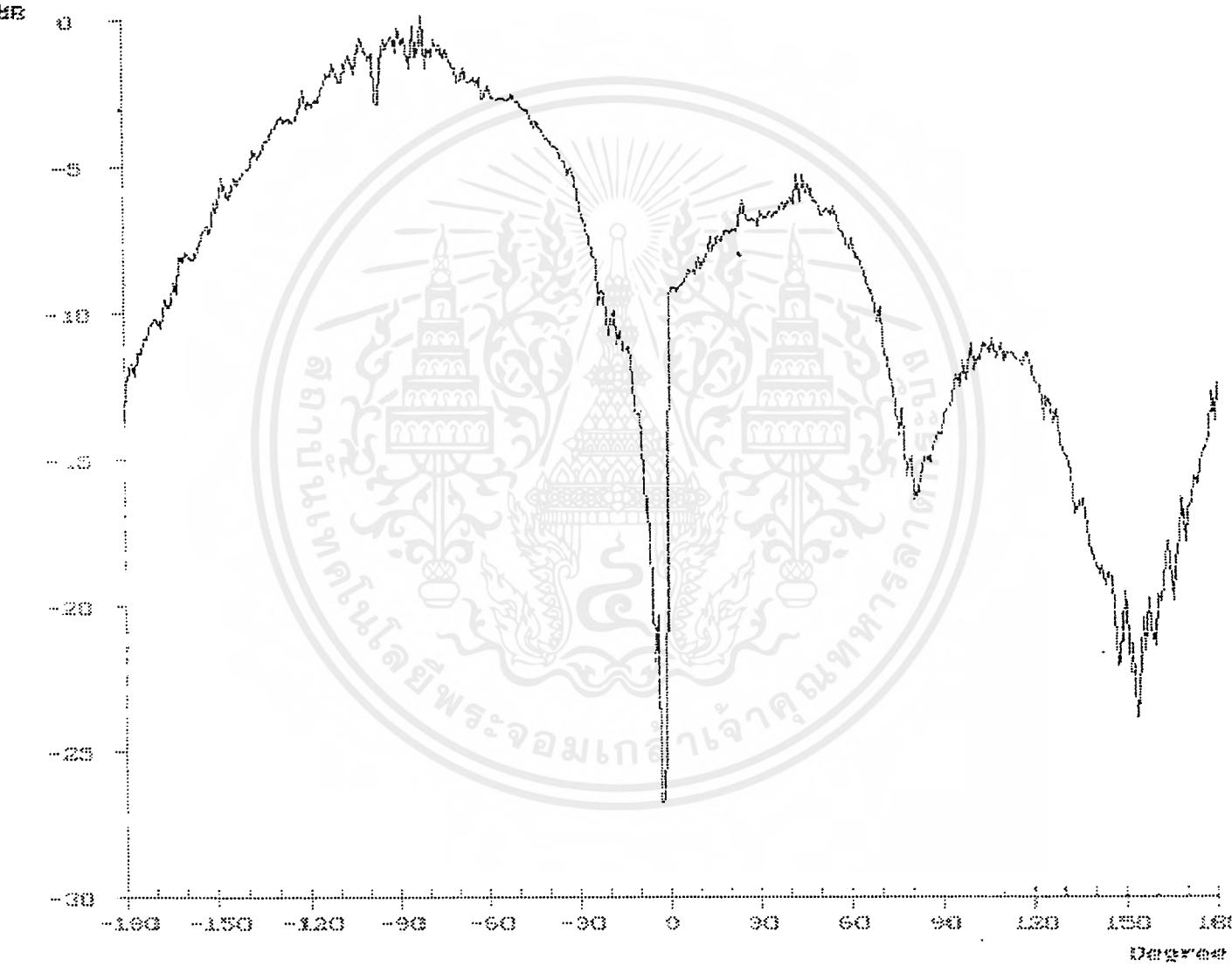
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่า Amplitude (dB) ที่แต่ละมุม (Degree)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงแพทเทิร์นของสนามแม่เหล็กในโพลาร์กราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่า Amplitude (dB) ที่แต่ละมุม (Degree)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การวัดเกนของสายอากาศไมโครสตริป

จากการที่ได้ออกแบบสายอากาศไมโครสตริปขึ้นมาเราสามารถทำการวัดเกนของสายอากาศได้โดยการวัดเปรียบเทียบกับสายอากาศฮอร์นมาตรฐานโดยสามารถหาค่าต่างๆที่ใช้ในการหาค่าเกนจากสมการดังนี้

$$G_t = F_t - F_r + G_r$$

F_t , ความแรงของสัญญาณจากสายอากาศทดสอบ (dBm)

F_r , ความแรงของสัญญาณจากสายอากาศฮอร์นมาตรฐาน (dBm)

G_t , ค่ากำลังของสายอากาศทดสอบ (dBi)

G_r , ค่ากำลังของสายอากาศฮอร์นมาตรฐาน (dBi)

จากการทดลองทำการวัดหาค่าต่างๆได้ดังนี้

$$F_t = -59.85 \text{ (dBm)}$$

$$F_r = -55 \text{ (dBm)}$$

$$G_r = 8.6 \text{ (dBi)}$$

โดย

เมื่อทำการหาค่าเกนของสายอากาศจะได้

$$G_t = F_t - F_r + G_r$$

โดยที่เกนของของสายอากาศไมโครสตริป 3.75 (dBi)

5.4 การวัดไดเรคตีวิตีของสายอากาศไมโครสตริป

จากการวัดหาแพทเทิร์นของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์ ดังรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.8 ทำให้ทราบค่าบีมวิทท์ (Beamwidth) ของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ดังนั้นสามารถหาค่าไดเรคตีวิตีได้จากสมการ

$$D = \frac{32400}{\theta_E \theta_H}$$

- เมื่อ θ_E = บีมวิทท์ของสนามไฟฟ้า
 θ_H = บีมวิทท์ของสนามแม่เหล็ก
 D = ไดเรคตีวิตี

จากรูปที่ 5.6 จะได้บีมวิทท์ของสนามไฟฟ้า 148 องศา และจากรูปที่ 5.8 จะได้บีมวิทท์ของสนามแม่เหล็ก 83 องศา ดังนั้นจึงได้ค่าไดเรคตีวิตีมีค่าเท่ากับ 2.637 หรือ 4.211 dB

5.5 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

จากที่ได้ทราบค่าไดเรคตีวิตีและเกนของสายอากาศสามารถที่จะหาค่าประสิทธิภาพของสายอากาศได้จาก

$$G = \eta D$$

- เมื่อ G = อัตราขยายของสายอากาศ
 D = ไดเรคตีวิตี
 η = ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ดังนั้นจะได้ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศเท่ากับ 89.92 %

5.6 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์

5.6.1. การหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ และค่า VSWR

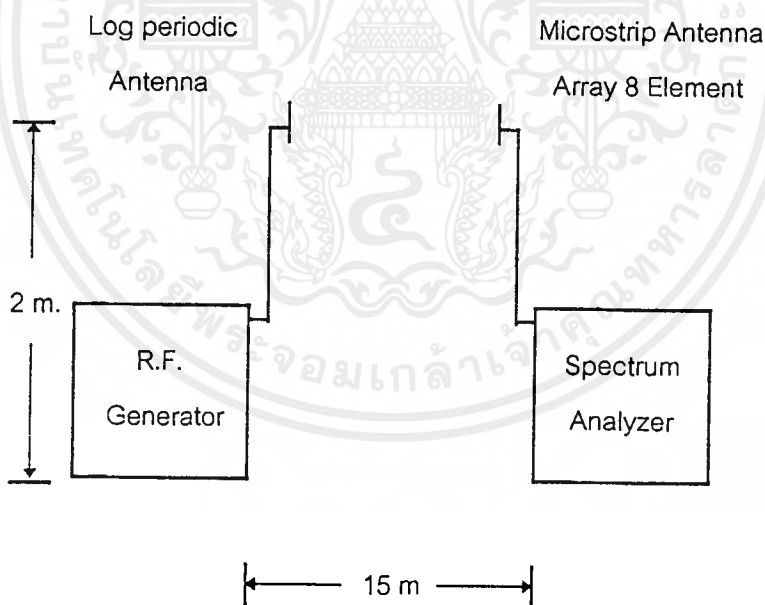
การทดลองโดยใช้เครื่อง Network Analyzer วัดหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์และค่า VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปซึ่งได้ผลเป็นดังแสดงในรูปที่ 5.11 และ 5.12

5.6.2. การวัดการกระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

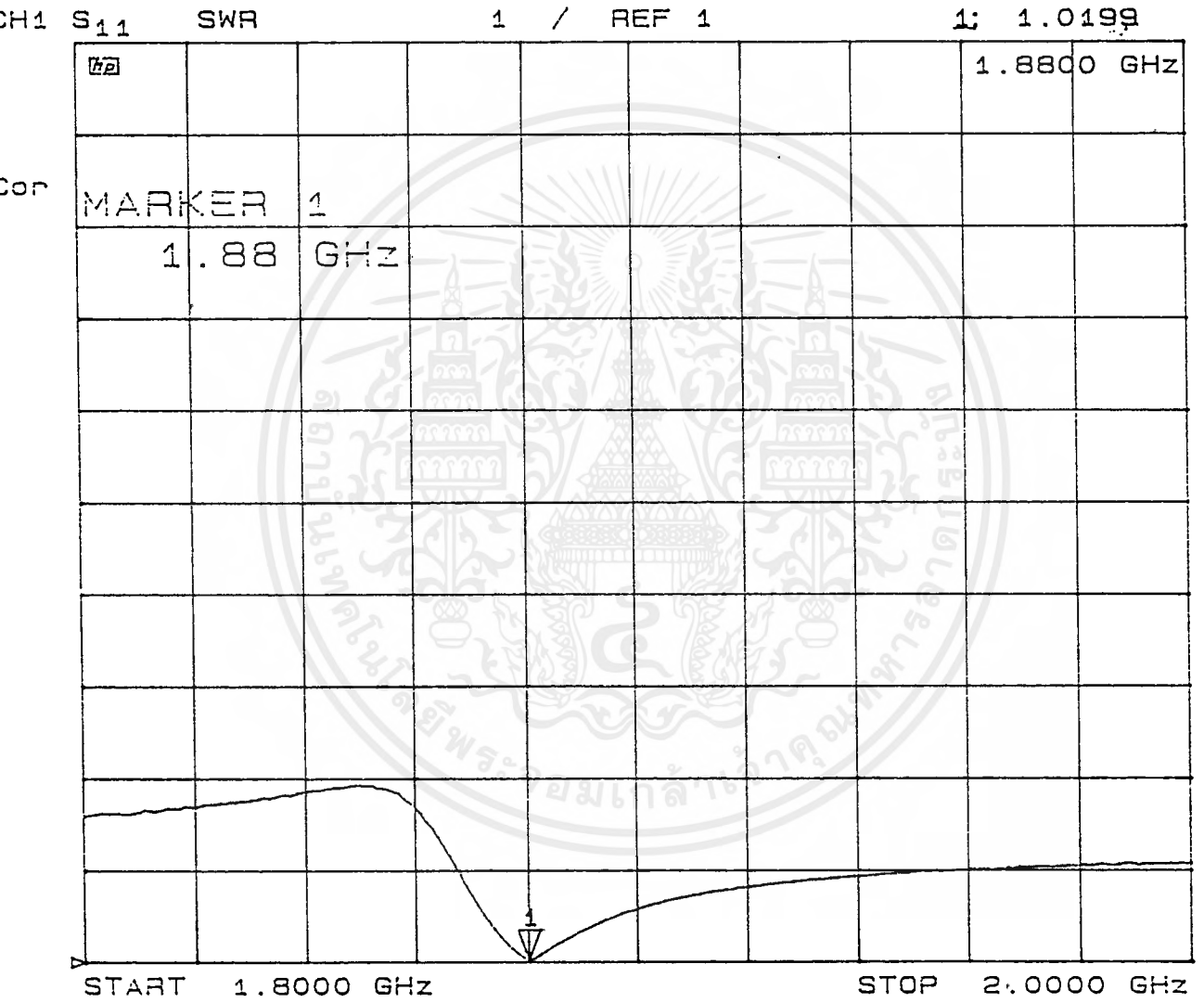
การทดลองได้จัดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.10 ผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.15

จากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอเลเมนต์โดยให้สายส่งไมโครสตริปมีความยาวเท่ากันทำให้เฟสในสายส่งมีค่าเท่ากัน และจุดที่ป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศมีความต่างเฟสกันอยู่ 180 องศา ดังนั้นแพทเทิร์นการกระจายคลื่นจึงมีการหักล้างกันในบริเวณจุดกึ่งกลางของแกนอ้างอิงทำให้แพทเทิร์นของสายอากาศออกมา

$$Z_{in} = 50.238 - j22.135 \Omega$$

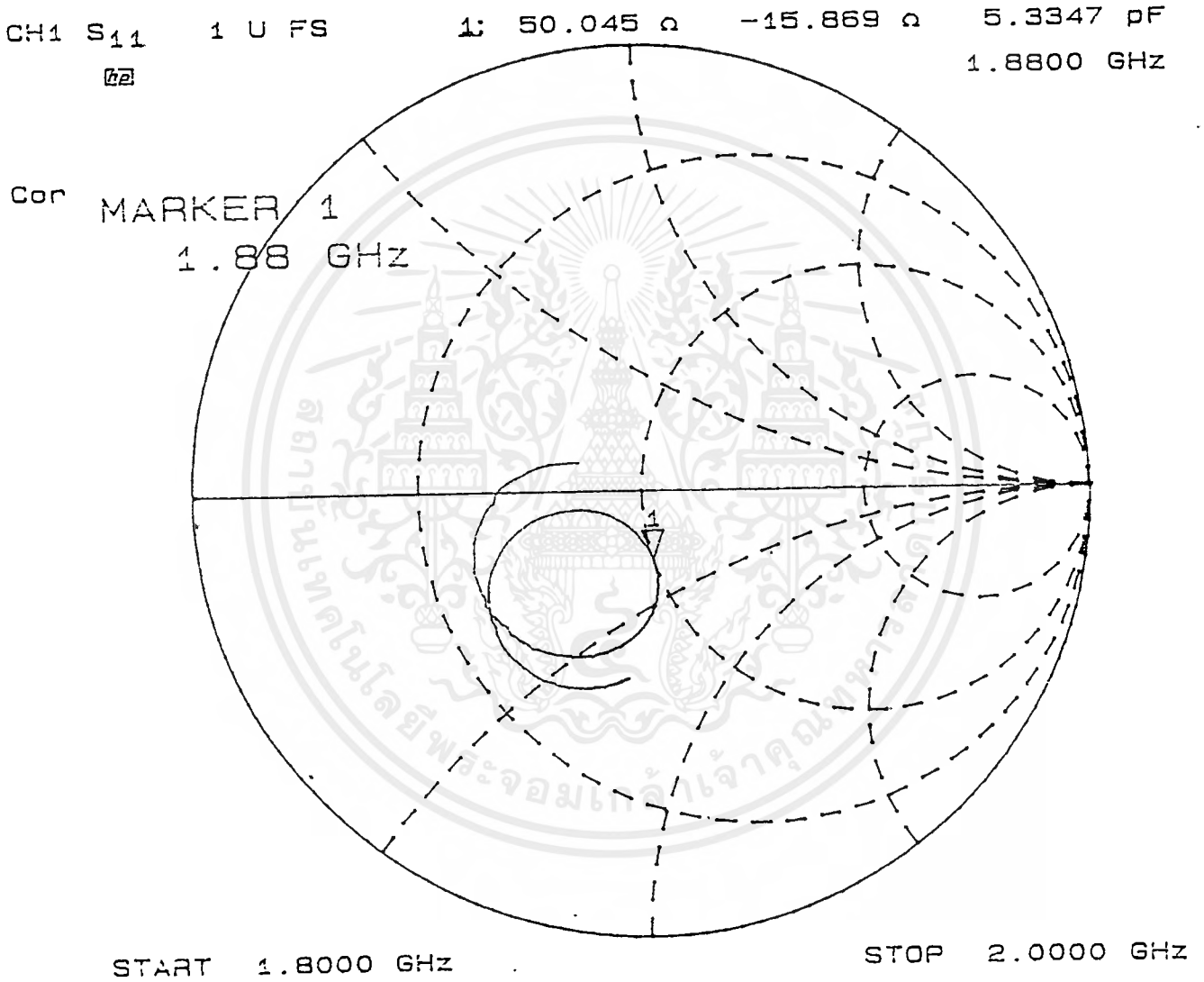


รูปที่ 5.10 แสดงการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่น



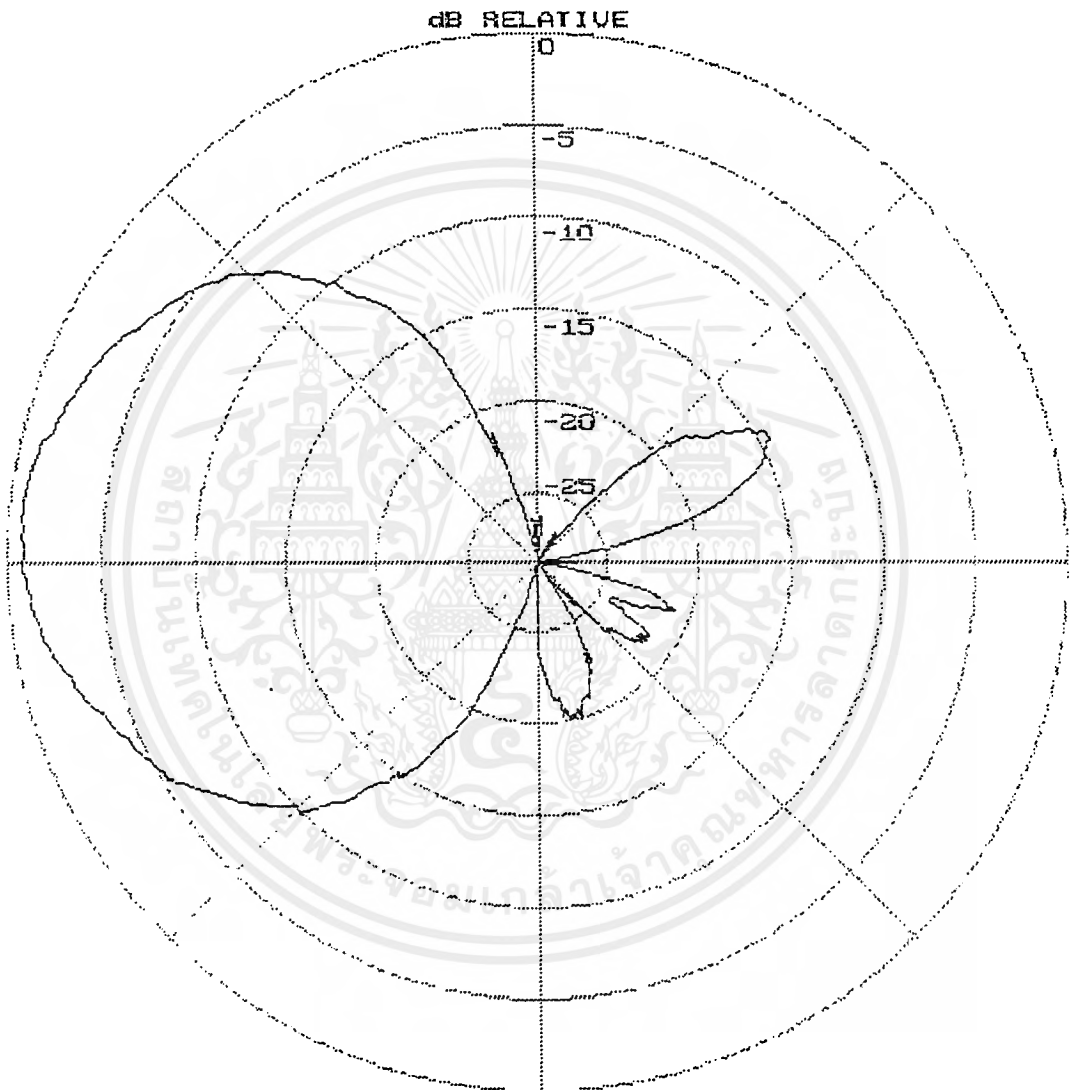
รูปที่ 5.11 แสดงกราฟ VSWR ของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เกลอเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



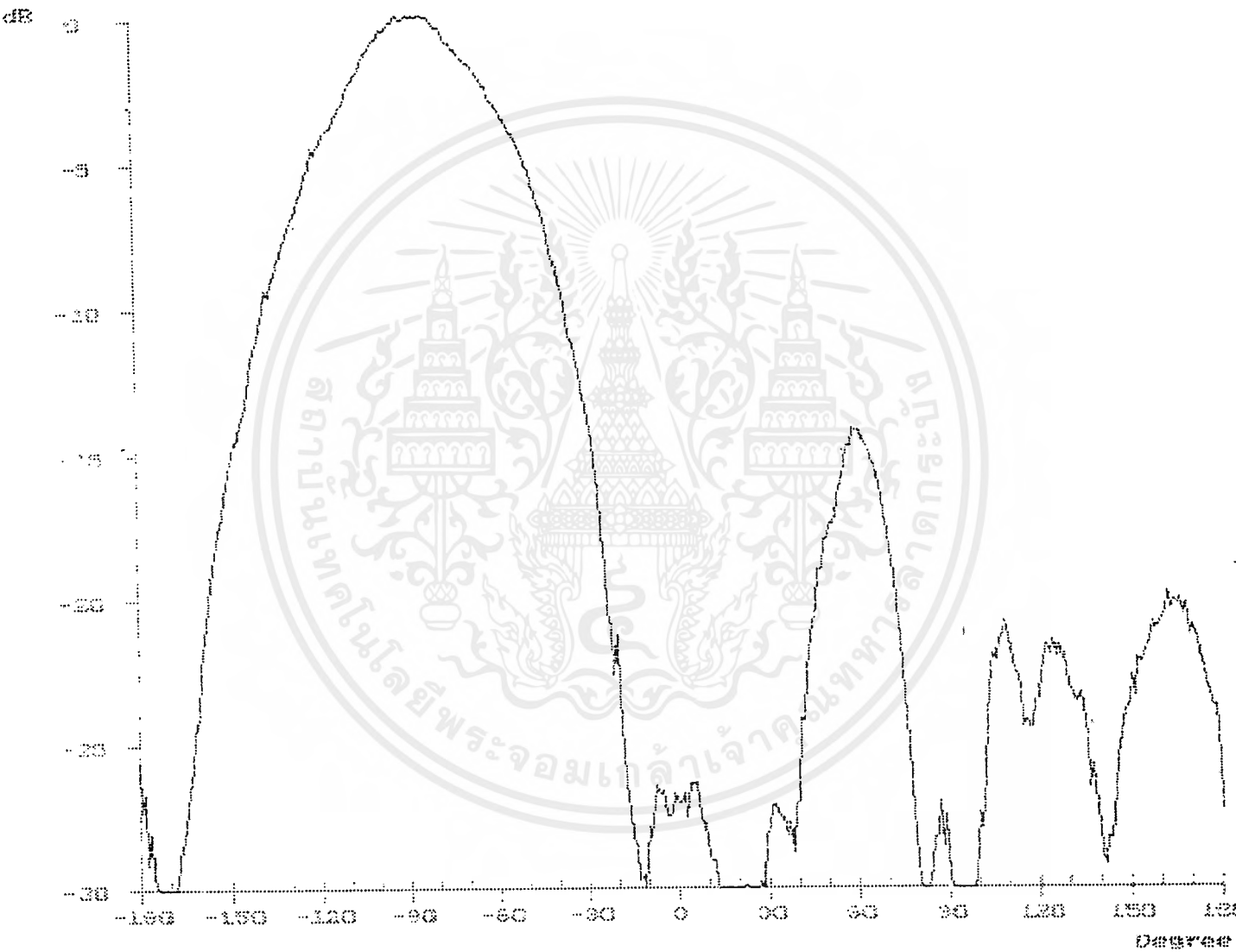
รูปที่ 5.12 แสดงอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



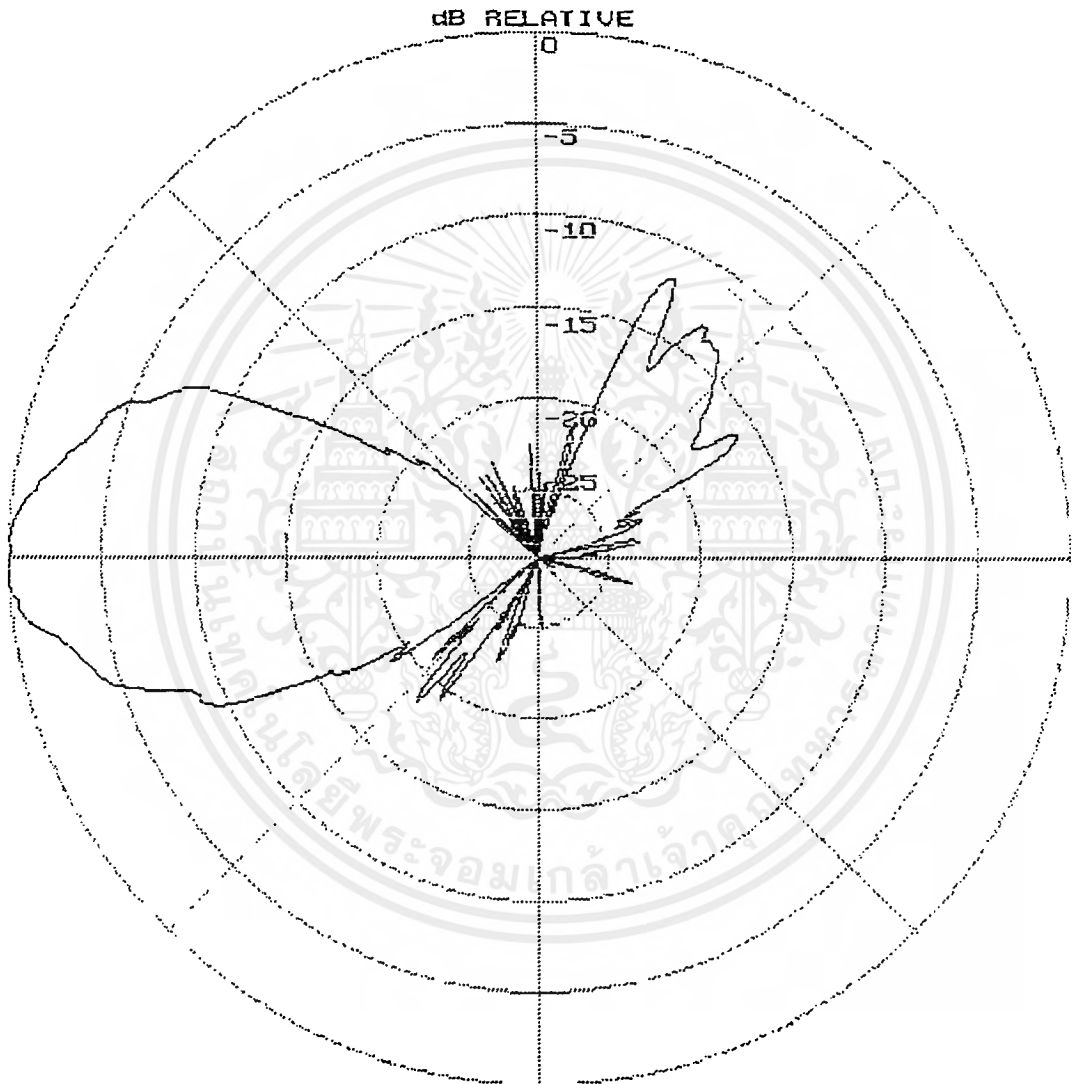
รูปที่ 5.13 แสดงแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าในโพลาร์กราฟของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



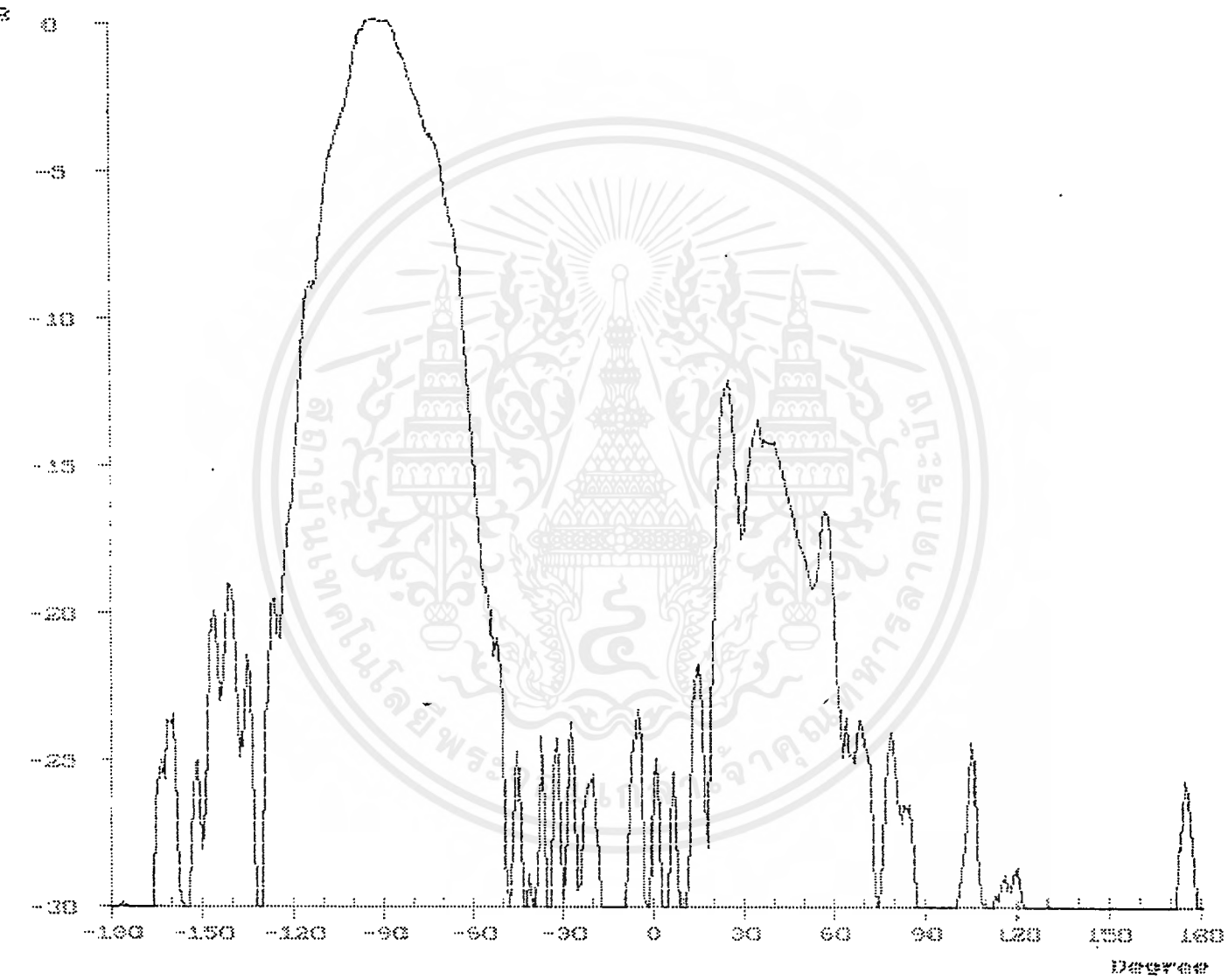
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงค่า Amplitude (dB) ที่แต่ละมุม (Degree)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 แสดงแพทเทิร์นของสนามแม่เหล็กในโพลาร์กราฟของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เlemenต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่า Amplitude (dB) ที่แต่ละมุม (Degree)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 การวัดเกินของสายอากาศไมโครสตริป

จากการที่ได้ออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบอาร์เรย์ขึ้นมาเราสามารถทำการวัดเกินของสายอากาศได้โดยการวัดเปรียบเทียบกับสายอากาศฮอร์นมาตรฐานโดยสามารถหาค่าต่างๆที่ใช้ในการหาค่าเกินจากสมการดังนี้

$$G_t = F_t - F_r + G_r$$

F_t ความแรงของสัญญาณจากสายอากาศทดสอบ (dBm)

F_r ความแรงของสัญญาณจากสายอากาศฮอร์นมาตรฐาน (dBm)

G_t ค่ากำลังของสายอากาศทดสอบ (dBi)

G_r ค่ากำลังของสายอากาศฮอร์นมาตรฐาน (dBi)

จากการทดลองทำการวัดหาค่าต่างๆได้ดังนี้

$$F_t = -64.89 \text{ (dBm)}$$

$$F_r = -65 \text{ (dBm)}$$

$$G_r = 8.6 \text{ (dBi)}$$

โดย

เมื่อทำการหาค่าเกินของสายอากาศจะได้

$$G_t = F_t - F_r + G_r$$

โดยที่เกินของของสายอากาศไมโครสตริป 8.71 (dBi)

5.8 การวัดโคเรคทีวิตีของสายอากาศไมโครสตริป

จากการวัดหาแพทเทิร์นของสายอากาศไมโครสตริป 8 เอลเมนต์ ดังรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.15 ทำให้ทราบค่าบีมวิทท์ (Beamwidth) ของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ดังนั้นสามารถหาค่าโคเรคทีวิตีได้จากสมการ

$$D = \frac{32400}{\theta_E \theta_H}$$

เมื่อ θ_E = บีมวิทท์ของสนามไฟฟ้า
 θ_H = บีมวิทท์ของสนามแม่เหล็ก
 D = โคเรคทีวิตี

จากรูปที่ 5.13 จะได้บีมวิทท์ของสนามไฟฟ้า 56 องศา และจากรูปที่ 5.15 จะได้บีมวิทท์ของสนามแม่เหล็ก 27 องศา ดังนั้นจึงได้ค่าโคเรคทีวิตีมีค่าเท่ากับ 21.42 หรือ 13.30 dB

5.9 ประสิทธิภาพของสายอากาศ

จากที่ได้ทราบค่าโคเรคทีวิตีและเกนของสายอากาศสามารถที่จะหาค่าประสิทธิภาพของสายอากาศได้จาก

$$G = \eta D$$

เมื่อ G = อัตราขยายของสายอากาศ
 D = โคเรคทีวิตี
 η = ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ดังนั้นจะได้ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศเท่ากับ 34.68 %

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์ ที่ได้ศึกษาทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัตินั้นผลที่ได้ยังไม่ตรงกันบางประการ ซึ่งข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นอาจเป็นไปได้ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ โดยทางทฤษฎีนั้นเกิดจากการที่สมมติตั้งกำเนิดสนามขึ้นมา และกำหนดการแปรผันของสนามให้คงที่ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลที่ได้ก็เพียงพอต่อการยอมรับและนำมาสร้างสายอากาศไมโครสตริปได้ สำหรับข้อผิดพลาดในทางปฏิบัติที่เกิดขึ้นได้หลายประการ เช่น

1. ผลการวัดค่า (ϵ_r) ที่ได้ อาจเกิดการผิดพลาดได้เนื่องจากสาเหตุดังนี้

- การใช้แผ่นฟอยล์หุ้มขอบข้างของเรโซเนเตอร์อาจทำให้ขนาดของเรโซเนเตอร์คลาดเคลื่อนได้
- การคับปลิงหัววัดต่ออาจไม่อยู่ที่มุมพอดีทำให้ขนาดที่ใช้ในการคำนวณอาจผิดพลาดได้นอกจากนี้โหมดที่อาจคลาดเคลื่อนได้
- การใช้แถบขาวเป็นวัสดุในการติดแผ่นโลหะกับแผ่นอีพ็อกซีทำให้เกิดผลผิดพลาดได้
- การอ่านค่าความถี่ที่แอมพลิฟายด์ของเครื่องวัดกลางมาอาจผิดพลาดได้
- การไล่โหมดคลื่นที่เกิดจากค่าโหมดต่ำไปยังโหมดสูงแล้วนำมาคำนวณหาค่า (ϵ_r) ที่อยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกับค่าจากตารางของอีพ็อกซี (4.45) อาจเกิดการผิดพลาดได้เนื่องจากอีพ็อกซี ที่ใช้อาจมีสารผสมอย่างอื่นที่ทำให้ค่า ผิดไปจากค่าที่คลาดหมายได้

2. การสร้างสายอากาศไม่สามารถทำให้มีขนาดให้ตรงตามทฤษฎีที่ต้องการได้ เช่นกราวด์เพลนไม่สามารถทำให้เป็นแผ่นตัวนำที่สมบูรณ์และมีขนาดที่ไม่จำกัดได้

3. ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนอาจเป็นเพราะว่าค่าที่คลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมาจากการปฏิบัติงานในการสร้างและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำสายอากาศมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆไม่เป็นไปตามที่ต้องการที่สำคัญเทคโนโลยีการผลิตเรายังไม่ตีพ็อตที่จะทำสายอากาศไมโครสตริปให้มีค่าตามต้องการได้เพราะจากการคำนวณวิธีทางคณิตศาสตร์จุดทศนิยมมีค่ามากกว่าสามตำแหน่งแต่เครื่องมือที่เราใช้นั้นมีความละเอียดไม่มากพอ ซึ่งในทางปฏิบัติค่าที่เกินกว่าสามตำแหน่งเราจะตัดทิ้งไปซึ่งทำให้ค่าเหล่านี้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

4. ค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารที่ใช้ทำสายอากาศ ในการทดลองได้ใช้สารไดอิเล็กตริกที่เป็นอีพ็อกซีซึ่งประมาณให้มีค่าคงที่สัมพัทธ์เท่ากับ 4.45 แต่ในการทดลอง เราไม่สามารถที่จะทราบค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กตริกที่แท้จริงได้ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือวัด

5. การป้อนสัญญาณให้กับตัวสายอากาศ จากในบทที่ 4 ตำแหน่งที่ต้องการของจุดป้อนสัญญาณจะต้องห่างจากขอบของตัวสายอากาศ 2.1603 เซนติเมตรแต่ในการทดลองตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณอาจเกิดการคลาดเคลื่อนไปบ้าง ซึ่งมีผลอย่างมากกับอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ทำให้เกิดการสะท้อนกลับ

ของพลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศ จึงได้แก้ไขโดยการทดลองเลียนแบบการปรับแมทซ์ โดยการนำวัสดุตัวนำ ซึ่งเป็นแผ่นทองแดงมาใช้ ซึ่งใช้หลักการของสตีปแมทซ์ซึ่ง

6. ในการวัดการแพร่กระจายของคลื่นของสายอากาศ ไม่สามารถวัดได้ตามเงื่อนไขทางทฤษฎีที่ต้องการได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านสถานที่และเครื่องมือทดลอง ซึ่งอาจทำให้เกิดการสะท้อนกลับของพลังงานมายังสายอากาศได้

ในทางปฏิบัตินั้นยังมีข้อผิดพลาดอีกหลายประการที่จะต้องนำมาพิจารณา ซึ่งถ้าสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่กล่าวถึงในเบื้องต้นให้ดีขึ้น ก็อาจจะได้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพและมีคุณสมบัติที่ดีพอต่อการนำไปใช้งาน

จากผลการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงข้อจำกัดในทางปฏิบัติหลายประการซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สายอากาศมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจึงเป็นแนวทางที่จะต้องปรับปรุงสายอากาศให้มีคุณสมบัติดีขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] อ.โมไนย ไกรฤกษ์, "ทฤษฎีสายอากาศ", คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หจก.สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2537
- [2] บัณฑิต วจนอารยานนท์, "วิศวกรรมสายอากาศ", พิมพ์ครั้งที่ 4, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537
- [3] Balanis, Constantine A., "Antennas Theory Analysis and Design", New York, John Wiley & Sons, 1982
- [4] Bahl, I.J. and P. Bhartia, "Microstrip Antennas" the 2nd printing, USA, Artech House, 1982
- [5] John D. Kraus, "Antennas", 2nd ed, McGraw-Hill, 1992
- [6] J.R. James, P.S. Hall, C. Wood, "Microstrip Antennas Theory and Design", Peter Peregrinus, Ltd., 1981
- [7] K.C. Gupta, Ramesh Garg, I.J. Bahl, "Microstripline and Slotlines", Artech House, Inc., 1979
- [8] Thomas A. Milligan, "Modern Antenna Design", McGraw-Hill, 1985
- [9] Nirun Kamprasert, Wiwat Kiranon, "Simple Formulas for Determination of The Input Impedance -of a Coaxial-Fed Rectangular Microstrip Patch Antennas", การประชุมวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 18

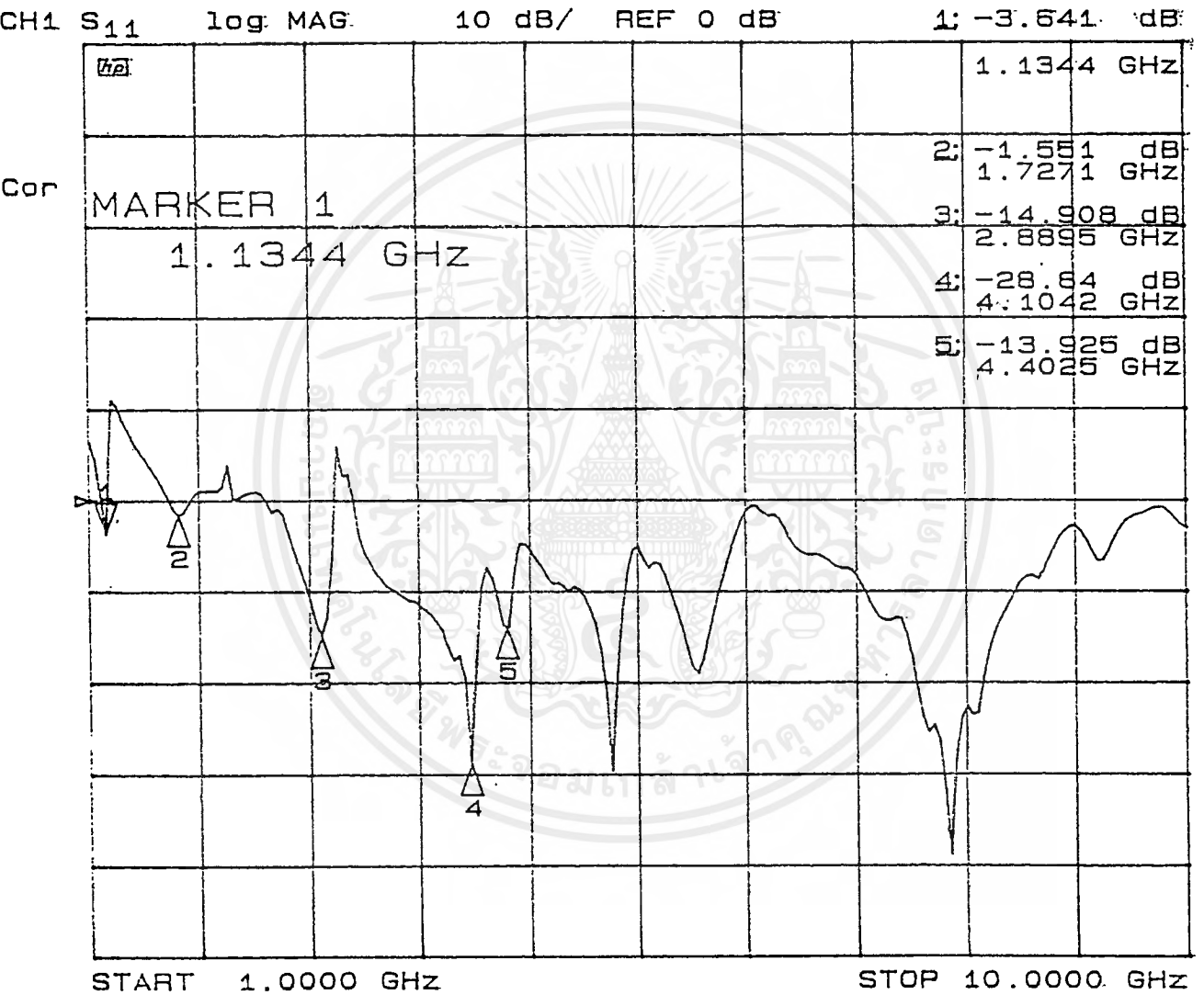


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของแผ่นปริ้นท์

ได้ใช้ฉาบสเตรทเป็นอีพ็อกซี่ (Epoxy) มีความหนา 1.59 mm ตัดแผ่นปริ้นท์เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 58*58 mm² และทำการเชื่อม (Shield) ขอบ 2 ด้านที่ขนานกัน ต่อจากนั้นจึงเชื่อมต่อ SMA-Connector เข้ากับแผ่นปริ้นท์ แล้วทำการวัด Return Loss (S₁₁)



รูปที่ 1 กราฟแสดง Return Loss ของแผ่นปริ้นท์ขนาด 58*58 mm²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการแสดงโหมดคลื่นของแผ่นไมโครสตริป

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

ลดรูปสมการเป็น

$$(f_r)_{mn} = \left(c/2l\sqrt{\epsilon_r} \right)\sqrt{m^2 + n^2} \quad ; l = w \quad \dots(2)$$

$$\epsilon_r = \left(\left(c/2l(f_r)_{mn} \right)\sqrt{m^2 + n^2} \right)^2 \quad \dots(3)$$

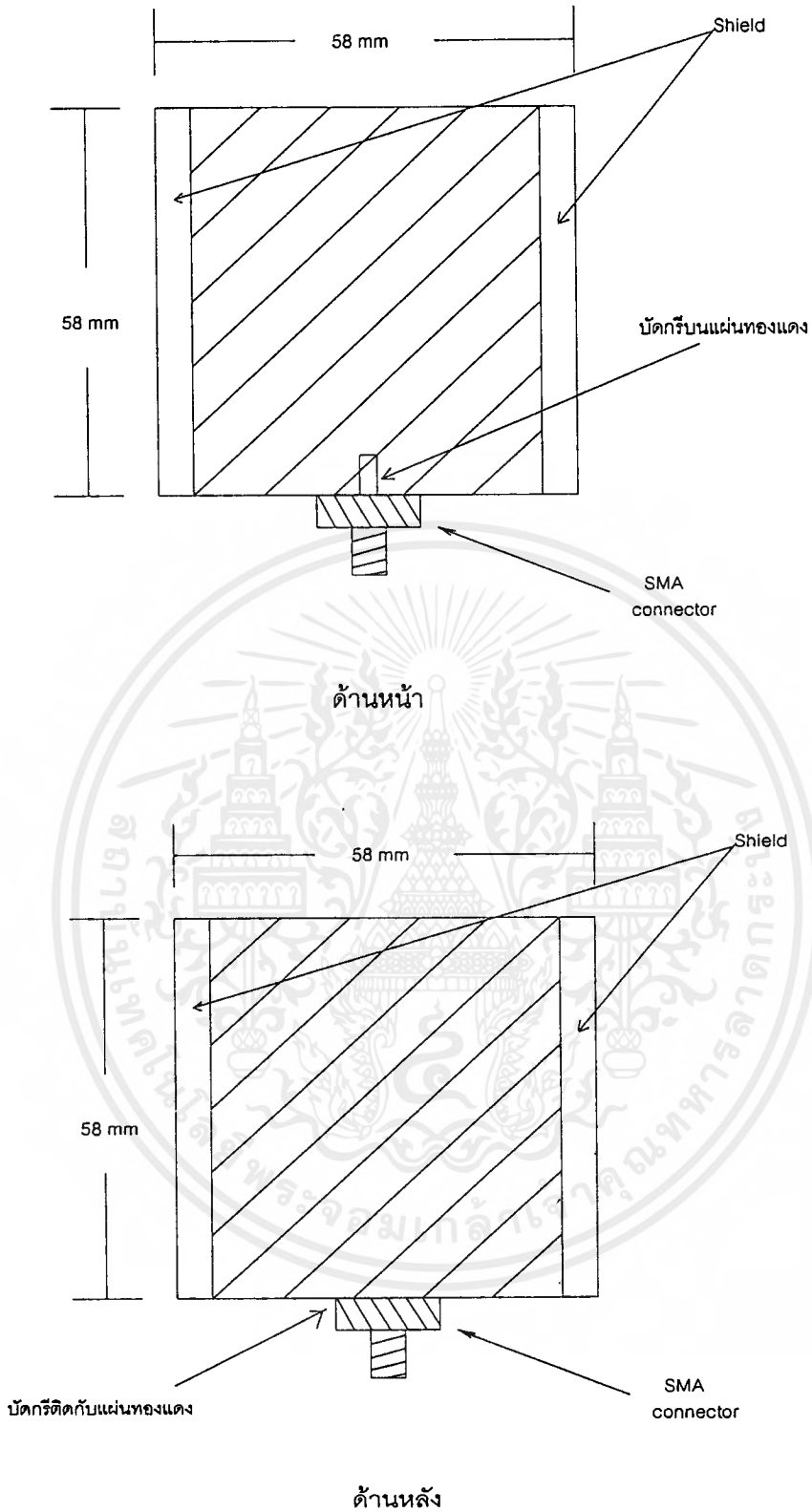
สมการ (3) ใช้สำหรับหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ จากรูปที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงการหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ในคลื่นโหมดต่างๆ

POSITION	f_r (GH _Z)	MODE (m,n)	ϵ_r
1	1.1344	1,0	5.19
2	1.7271	1,1	4.48
3	2.8895	1,2	4.00
4	4.1042	1,3	3.97
5	4.4025	2,3	4.48
6	5.1998	3,3	4.45
7	6.1125	5,0	4.47
8	6.5721	5,2	4.49
9	7.1122	5,3	4.49
10	8.6398	7,1	4.48

จากตารางที่ 1 จะได้ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ เฉลี่ยเท่ากับ 4.45 ซึ่งจะนำค่านี้ไปใช้ออกแบบสายอากาศต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการทำการทดลองหาค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกสารสับเซตรท

ข้อควรพิจารณาในการเลือกสารสับเซตรท

1. ความเป็นไปได้ในการเกิดคลื่นตามผิว
2. ผลดิสเพอซันของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และ ออสแทนเจนท์
3. ขนาดของการสูญเสีย
4. การมีคุณสมบัติไม่เหมือนกันตลอดเนื้อสารของสารสับเซตรท หรือ แอนไอโซโทรปี (anisotropy)
5. ปัจจัยทางด้านเชิงกล เช่น การเข้ารูปได้
6. ราคา

1. ผลของดิสเพอซัน

ผลของดิสเพอซันเกิดจากการที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และ ค่าออสแทนเจนท์ของสับเซตรทขึ้นกับความถี่ โดยปกติค่าออสแทนเจนท์จะเพิ่มขึ้นตามความถี่ และค่าออสแทนเจนท์ที่เปลี่ยนไปนี้จะสังเกตเห็นได้ง่ายว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามความถี่ เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างมากในการออกแบบสายอากาศที่ทำงานที่แถบความถี่กว้าง เราต้องดูว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสายอากาศอยู่ภายใต้ขอบเขตการทำงานที่เรายอมรับได้หรือไม่ เช่น

$$\Delta f_r / f_r = -\frac{\Delta \epsilon_r}{2\epsilon_r} \dots(1)$$

เมื่อ

Δf_r คือค่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนท์

$\Delta \epsilon_r$ คือค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

2. ข้อพิจารณาทางสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ

สิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และค่าออสแทนเจนท์ คือ อุณหภูมิ ความชื้น อายุการใช้งาน และคุณสมบัติเชิงกลของสารสับเซตรทสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อสายอากาศมากที่สุดก็คือ อุณหภูมิ ดังนั้นผู้ออกแบบจึงต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

2.1 ต้องเลือกสับเซตรทที่สามารถทนช่วงอุณหภูมิที่จะใช้งานได้ โดยไม่ทำให้สายอากาศบิดงอ หรือผิดรูปไป

2.2 โดยสับเซตรทที่ใช้ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงการเปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและออสแทนเจนท์ต่ำ

2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนและค่าควานนำความร้อนต้องต่ำ

3. ข้อพิจารณาทางด้านคุณสมบัติเชิงกล

ด้านคุณสมบัติเชิงกลเราต้องพิจารณาถึง คุณสมบัติการเข้ารูปได้ และคุณสมบัติด้านการทำได้ (machinability) นอกจากนั้นต้องดูคุณสมบัติการกัดกร่อนได้ ความมีเสถียรภาพของขนาด และความสามารถในการทนแรงสั่นสะเทือนได้

4. ข้อแนะนำในการเลือกสารสับเสตรท

4.1. เลือกสับเสตรทที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกน้อย และค่าลอสแทนเจนท์ต่ำ และต้องดูว่าเรามีข้อมูลที่ถูกต้องของสับเสตรทตัวนั้นอยู่หรือไม่

4.2. ผลของดิสเพนชัน และค่าความแตกต่างระหว่างชั้นตัวอย่างต้องมีค่าน้อย

4.3. คุณสมบัติที่ไม่ใช่ทางไฟฟ้า เช่น สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางอุณหภูมิ ความมีเสถียรภาพของขนาด ค่าความนำความร้อน ต้องมีค่าเหมาะสม

4.4. ตรวจสอบดูลักษณะแอนไอโซโทรปีของสารไม่ควรมีมาก

4.5. ควรเลือกสับเสตรทให้มีความหนา

$$h \leq \frac{c}{4f_u(\epsilon_r - 1)^{1/2}} \dots(2)$$

เมื่อ

c คือ ความเร็วของแสง

f คือ ความถี่สูงสุดที่ต้องการให้สายอากาศทำงาน

4.6. ข้อพิจารณาด้านราคา

ตาราง 4.6.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสับเสตรทที่ใช้ในไมโครสตริป

Material	Dielectric Constant	Loss Tangent	Reference
Unreinforced PTFE. Cutlun	2.10	0.0004	[1]
Reinforced PTFE. RT Duroid 5880	2.20 (1.5%)	0.0009	[1]
Fused Quanz	3.78	0.0001	[2]
96% Alumina	9.40 (5%)	0.0010	[2]
99.5% Alumina	9.80 (5%)	0.0001	[2]
Sapphire	9.41	0.0001	[2]
Semi-Insulating GaAs	12.9	0.0020	[2]

5. วิธีวัดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสับเสตรทในวงจรไมโครเวฟ

สับเสตรทที่จะใช้วัดในวิธีนี้ จะถูกหุ้มด้วยโลหะอยู่ทุกด้าน ดังนั้นจะเหมือน resonant cavity เล็ก ๆ และความถี่ resonant จะหาจากทั้งการส่งผ่าน หรือ การสะท้อนกลับ จากนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะถูกคำนวณออกมา ด้วยความแม่นยำดีกว่า 1 %

ก่อนที่วงจรไมโครสตริปจะถูกออกแบบ เราจำเป็นต้องรู้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสับเสตรทที่ใช้ก่อนซึ่งจำเป็นมากโดยเฉพาะในกรณีของอลูมินา เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะมีค่าต่างกันอย่างมากระหว่างอลูมินาจากผู้ผลิตแหล่งต่าง ๆ

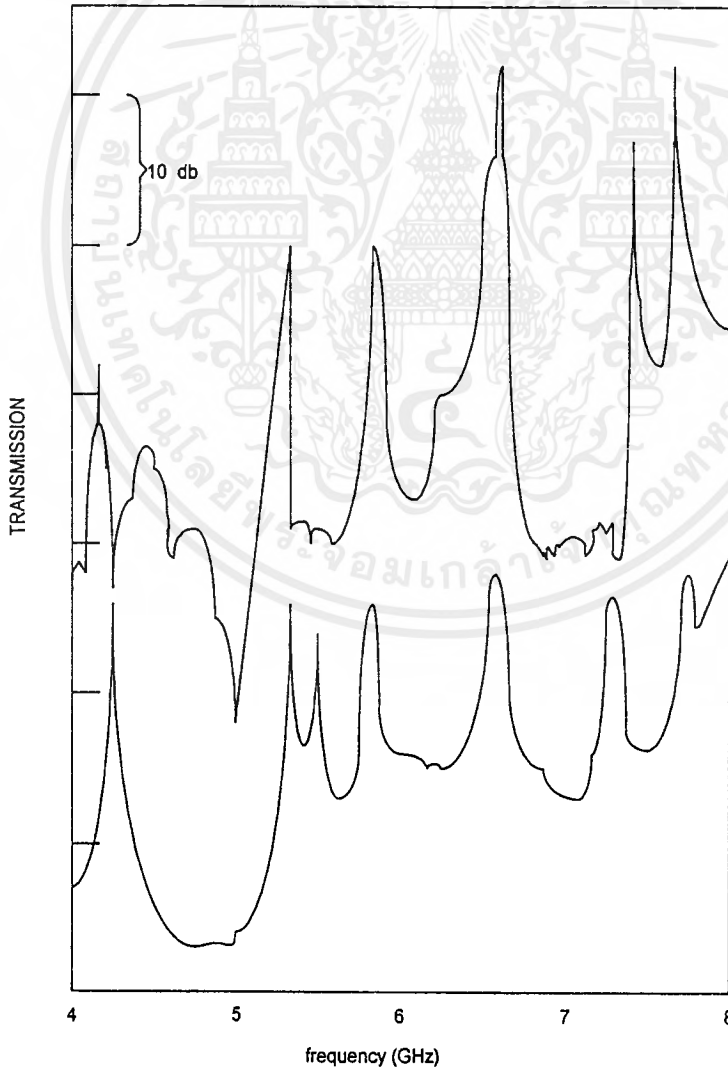
เทคนิคนี้เริ่มด้วย การใช้สับเสตรทที่หุ้มโลหะทุกด้าน ทำให้เป็นไมโครเวฟ cavity และแก้สมการความถี่เรโซแนนท์ของแควิตี เพื่อหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกดังนี้

$$\epsilon = \frac{c^2}{4 f^2 pq} \left(\frac{p^2}{a^2} + \frac{q^2}{b^2} \right) \quad \dots(3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ ϵ เป็น ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
- c เป็น ความเร็วแสง
- f_{pq} เป็นความถี่เรโซแนนท์ของแควิตีสำหรับ โหมด (p,q)

โดยเราจะอ่านค่า f_{pq} จาก network analyzer หรือ sweep generator กับ crystal detector เพื่อวัดพลังงานที่ส่งผ่านแควิตี เป็น ฟังก์ชันกับความถี่ มุมของแควิตีจะถูกเอาโลหะออก แล้วต่อเข้ากับปลายของ connector APC-7 (ใช้ได้ทั้งตัวผู้หรือตัวเมีย) ค่าสูงสุดในโค้งของการส่งผ่าน (transmission) กับความถี่ คือ ความถี่เรโซแนนท์ใน (1) จากนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะถูกหาค่าออกมา หรือเราอาจจะดูจากค่าความถี่ที่ขนาดตกลงในโค้งของ การสะท้อน (reflection) (แต่ transmission peak จะสังเกตเห็นง่ายกว่า)



รูปที่ 5.1: รูปบนและล่างแสดงการส่งผ่านของแควิตีขอบปิดและเปิดตามลำดับ

ถ้าเราเปิดขอบนอก จากการศึกษาจะพบว่าได้ค่า Q ที่ต่ำกว่า ซึ่งให้เห็นว่าที่ขอบมีการแพร่กระจายคลื่น (ซึ่งไม่ตรงกับที่เราต้องการ) ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์จะถูกเลื่อนไป และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น การปิดขอบข้างอาจทำได้โดยการทาบด้วย สิลิโคนเวอร์ และต้องทำให้หนานหลายเท่าของ skin depth ส่วน coupling hole ทำโดยชุดโลหะที่มุมด้านตรงข้ามทั้ง 2 ด้าน และอาจใช้ tin foil หรือ แผ่นโลหะหุ้มเพื่อกัน transmission path บนผิวนอกของแควิตี จาก (1) จะมีแหล่งของการเกิดการผิดพลาด 2 แหล่ง คือ การวัดความถี่ และการวัดความยาว

ถ้าการวัดความยาวมีความแม่นยำ 0.1% อาจทำให้เกิดการผิดพลาดได้ 0.2% ในค่าคงตัวไดอิเล็กตริก การผิดพลาดเนื่องจากความถี่ (ถ้าใช้ counter วัด) เกิดจากการสูญเสียที่ผนัง (wall loss) ถ้าค่า Q ถูกวัดเรา อาจแก้ไขข้อผิดพลาดได้ดังนี้

$$f_o = f_m / (1 - 1/2Q) \quad \dots(4)$$

เมื่อ f_m คือ ความถี่ที่เราวัด

f_o คือ ความถี่ที่ถูกต้อง (ที่ควรใช้ใน (1))

แต่ถ้าเราไม่ได้แก้ไขข้อผิดพลาดนี้ การผิดพลาดจากแหล่งนี้ก็จะมีความ < 0.4% ดังนั้นถ้าเราไม่ต้องการผลที่ถูกต้องอย่างมาก อาจไม่ต้องวัดค่า Q เพื่อใช้แก้ไขข้อผิดพลาดก็ได้

LIST OF SYMBOLS

E_x, E_y, E_z	
E_ρ, E_θ, E_ϕ	Components of \vec{E}
F_x, F_y, F_z	
F_r, F_θ, F_ϕ	Components of \vec{F}
f_c	Cut off frequency
f_r	Resonant frequency
$f(\theta, \phi)$	Element pattern
G	Conductance Gain Green's function
H	Magnetic field
H_x, H_y, H_z, H_r	
$H_\theta, H_\phi, H_\rho, H_\eta$	Components of \vec{H}
h	Substrate thickness
I, \bar{I}, \bar{I}_1	
I_o, I_z, I_{mn}	Electric currents
J, \bar{J}, J_s	Electric current densities
$J_0(x), J_n(x)$	Bessel functions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L	Length of the microstrip antenna Inductance
L_1	Inductance
$\lambda, \lambda_1, \lambda_2$	Lengths of transmission line
M, \bar{M}	Induced magnetic current densities
M_x, M_y	Components of \bar{M}
Q	Quality factor
ϵ_{ef}	Frequency dependent ϵ_c
ϵ_r	Relative permittivity
ϵ_0	Free - space permittivity
γ	Propagation constant
η	Efficiency Elliptical coordinate Impedance
η_0	Free - space impedance(= 120π ohms)
λ	Wavelength in microstrip
λ_0	Free - space wavelength
μ	Permeability
μ_r	Relative permeability
μ_0	Free - space permeability
Ω	Ohms
π	A constant(= 3.1416)
ϕ	Electrostatic Potential Azimuth angle
ϕ_{mn}	Modal function
ψ	Angle
θ	Angle
θ_m	Beam direction
θ_1	θ at half power point

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานเครื่อง NETWORK ANALYZER

เครื่องมือ Network Analyzer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงข่ายของวงจรไม่ว่าจะเป็นวงจร Active หรือ Passive ก็ตาม ซึ่งการทำงานของเครื่องมือนี้จะทำงานในลักษณะของ Port Network โดยจะแบ่งออกเป็น one port และ two port ดังนั้นก่อนการใช้งาน จึงจำเป็นต้องทำการปรับสภาวะของเครื่อง (Calibrate) ทั้งกรณีของ one port และ two port เสียก่อนเพื่อที่จะให้เครื่องมือนี้ใช้จุดอ้างอิง ณ ตำแหน่งของปลายสายสัญญาณที่ต่ออยู่เป็นจุดอ้างอิง ดังนั้นเมื่อนำอุปกรณ์มาต่อแล้วทำการวัด ค่าตอบที่ได้จะมีความแม่นยำขึ้น

การ Calibrate One Port

การ Calibrate One Port การวัดแบบนี้จะเป็นการวัดแบบสะท้อนกลับ (S_{11}), (S_{22}) มีวิธีการดังนี้

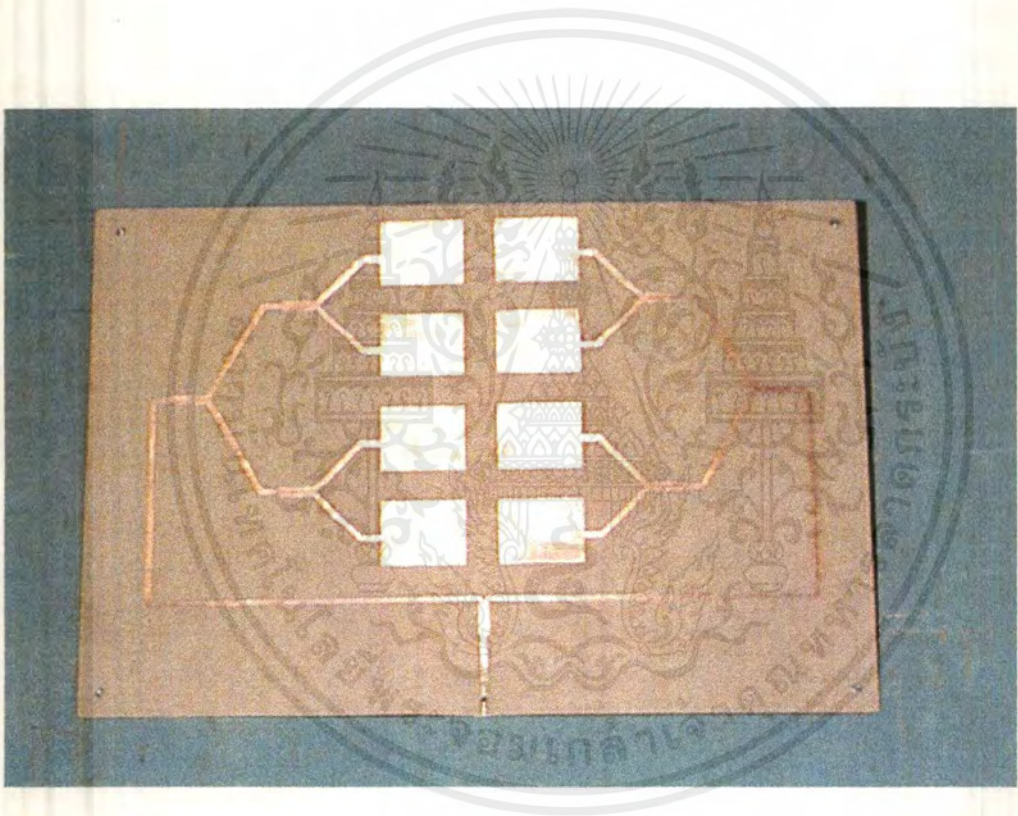
- กดปุ่ม START ใส่ความถี่เริ่มต้นตามด้วยหน่วยของความถี่
- กดปุ่ม STOP ใส่ความถี่สุดท้ายตามด้วยหน่วยของความถี่ เช่น ถ้า Calibrate ช่วงความถี่ตั้งแต่ 85 MHz ถึง 1.15 GHz ทำได้โดยการกด "START" ใส่ตัวเลข 850 ตามด้วยหน่วย MHz จากนั้นกด "STOP" ตามด้วย 1.15 ตามด้วยหน่วย GHz
- กดปุ่ม CAL เมื่อกดปุ่มนี้จะปรากฏเมนูต่างๆทางด้านขวามือของหน้าจอ
- กดปุ่มที่ตรงกับเมนู Calibrate Menu
- กดปุ่มที่ตรงกับเมนู S_{11} -1-port หลังจากนั้นหน้าจอจะปรากฏข้อความว่า OPEN ,SHORT ,LOAD ให้นำชุด Calibrate Kit มาทำการ Calibrate ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้
- นำตัว Calibrate แบบ Open มาต่อกับสายนำสัญญาณ แล้วกดปุ่ม Open แล้วกดตัว Calibrate ออก
- นำตัว Calibrate แบบ Short มาต่อกับสายนำสัญญาณ แล้วกดปุ่ม Short แล้วกดตัว Calibrate ออก
- นำตัว Calibrate แบบ Broadband Load มาต่อกับสายนำสัญญาณ แล้วกดปุ่ม Load แล้วกดปุ่ม Done Load แล้วกด Done Load ซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

ในขณะที่ที่หน้าจอจะปรากฏคำว่า Coefficient Computing เป็นตัวกระพริบซึ่งแสดงว่าเครื่องกำลังทำการ Calibrate อยู่เมื่อเครื่องทำการ Calibrate เสร็จแล้วให้สังเกตที่หน้าจอซึ่งจะปรากฏคำว่า Cor ที่ด้านซ้ายของหน้าจอ



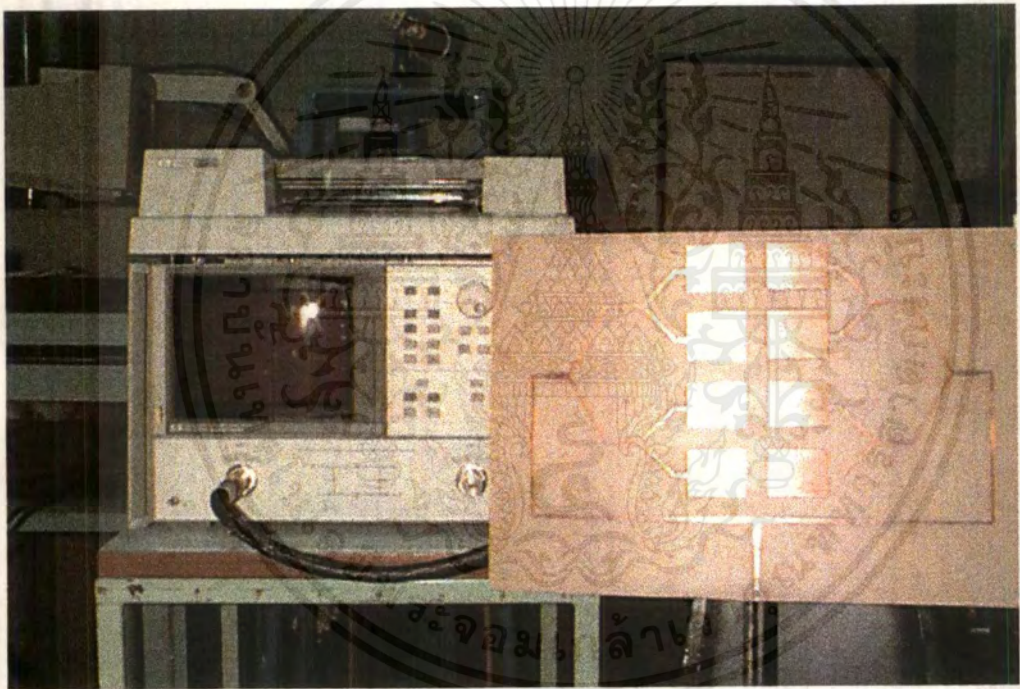
แสดงการยึดจุดต่อ BNC เข้ากับสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



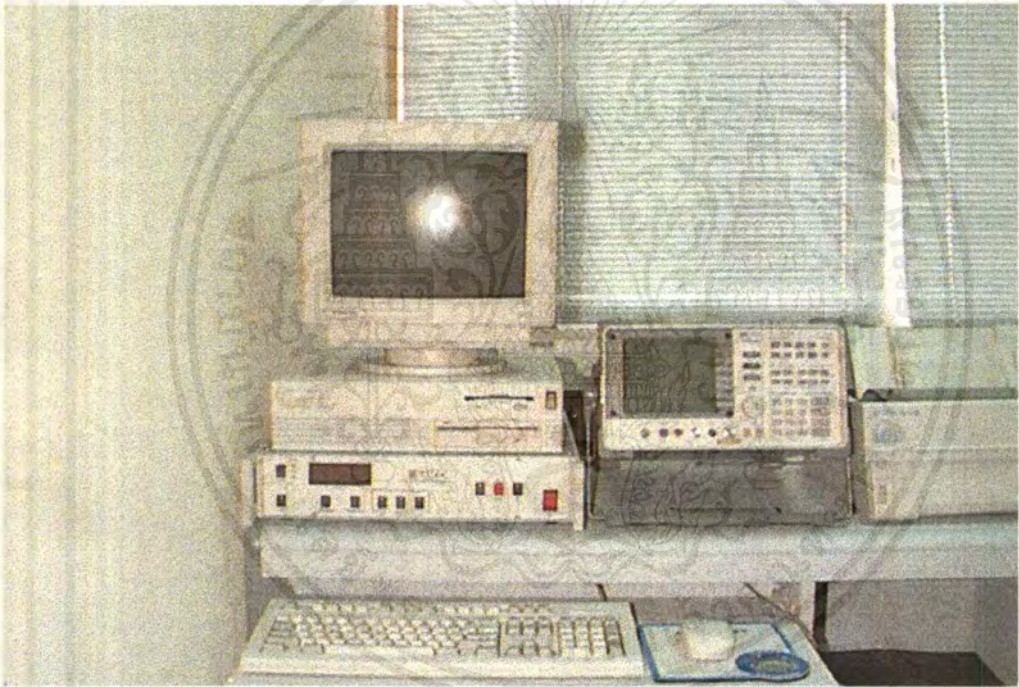
แสดงสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลเมนที่ที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดงทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้