



สายอากาศไมโครสตริป อาร์เรย์
MICROSTRIP ARRAY ANTENNA



ปริญญาานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

040388

สายอากาศไมโครสตริป อาร์เรย์
MICROSTRIP ARRAY ANTENNA



ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศไมโครสตริป อาร์เรย์

MICROSTRIP ARRAY ANTENNA

ผู้จัดทำ

1. นาย วุฒิชัย ชุนหคำ 39013025
2. นาย ศักดิ์ชัย ทองเทพ 39013026



(รศ. ณรงค์ เหมกรณ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์

MICROSTRIP ANTENNA ARRAY

โดย นายวุฒิชัย จุนหล้า 39013025

นายศักดิ์ชาย ทองเทพ 39013026

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ณรงค์ เหมกรณ์

บทคัดย่อ

สายอากาศ ไมโครสตริป (Microstrip Antenna) ส่วนใหญ่ออกแบบให้ใช้ในช่วงความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) เนื่องจากมีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา อีกทั้งยังดัดแปลงรูปร่าง ลักษณะให้โค้งงอได้ด้วย ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบนำวิถีของจรวด ที่มีการติดตามเป้าหมายด้วยระบบไมโครเวฟ เป็นต้นสำหรับโครงการนี้ได้ทำการออกแบบสร้างสายอากาศไมโครสตริป โดยจัดสร้างเป็นสายอากาศไมโครสตริปตัวเดียว (Single Element) แล้วนำความรู้ที่ได้มาใช้สร้างสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ (Microstrip Array Antenna) ซึ่งเป็นแบบลิเนียร์อาร์เรย์ (Linear Array) จากนั้นก็ทำการทดลองวัดต่างๆ ของ สายอากาศ ไมโครสตริป อาร์เรย์ตามหลักการทดสอบสายอากาศ และได้วิเคราะห์คุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) จากทฤษฎีสายอากาศมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัด

ABSTRAC

Most of microstrip antenna is designed to use in microwave frequency range because of their small size and light weight. Moreover , it can be changed the shape and flexible. Nowaday they are applied to use in missile that contain the microwave target tracking system. In this project, a microstrip antenna is designed in single element form and apply to be microstrip antenna array as is linear array. Then to measure the parameters of microstrip antenna array by antenna testing procedure and analyzer the radiation pattern by antenna theory to compare with the results from the measurement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1. บทนำ	1
บทที่ 2. ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศ	2
2.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ	3
2.3 สนามที่แพร่กระจายของสายอากาศ	5
2.4 อาร์เรย์	23
2.5 สายส่งแบบไมโครสตริป	29
2.6 การออกแบบตัวแบ่งกำลัง	31
2.7 พารามิเตอร์ของสายอากาศ	34
บทที่ 3. การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป	38
3.1 ข้อกำหนดเกี่ยวกับการออกแบบ	38
3.2 การออกแบบแผ่นแพร่กระจายคลื่น	38
3.3 การคำนวณหาจุดป้อนสัญญาณแผ่นแพร่กระจายคลื่น	39
3.4 การออกแบบสายส่งสัญญาณแบบมครสตริป	40
3.5 สายอากาศไมโครสตริป 1 เอเลเมนต์	42
3.6 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอเลเมนต์	42
3.7 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอเลเมนต์	43
บทที่ 4. การทดลองและผลการทดลอง	46
4.1 การทดสอบหาค่า การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ, อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอิมพีแดนซ์	46
4.2 การทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น	59
4.3 ผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นเมื่อเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี	79
บทที่ 5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	87
ภาคผนวก	
หนังสืออ้างอิง	

สารบัญรูป

	หน้า
บทที่ 2. ทฤษฎีและหลักการ	
รูปที่ 2.1 รูปมาตรฐานของไมโครสตริปสี่เหลี่ยมพร้อมพารามิเตอร์แสดงขนาด	2
รูปที่ 2.2 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ (MPA)	3
รูปที่ 2.3 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบ Traveling-wave	4
รูปที่ 2.4 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบ Slot	5
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	6
รูปที่ 2.6 แสดงรูปแพทเทอรันของสนามไฟฟ้า 1 ช่องเปิดในระนาบ E-Plane	16
รูปที่ 2.7 แสดงรูปแพทเทอรันของสนามไฟฟ้า 1 ช่องเปิดในระนาบ H-Plane	17
รูปที่ 2.8 แพทเทอรันของสนามแม่เหล็ก 1 ช่องเปิดในระนาบ E-Plane	18
รูปที่ 2.9 แพทเทอรันของสนามแม่เหล็ก 1ช่องเปิดในระนาบ H-Plane	19
รูปที่ 2.10 แพทเทอรันสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์	21
รูปที่ 2.11 แพทเทอรันสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์	22
รูปที่ 2.12 แพทเทอรันสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลเมนต์	27
รูปที่ 2.13 แพทเทอรันสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลเมนต์	28
รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างทางกายภาพของสายส่งไมโครสตริป	29
รูปที่ 2.15 Variation of Zo for Different Dielectric Constant and Aspect Ratio	30
รูปที่ 2.16 คุณสมบัติดิสเพอร์ชัน $\epsilon_r(f)$ ในไมโครสตริป	31
รูปที่ 2.17 ตัวแบ่งกำลังแบบ T-junction แบบธรรมดาและแบบมีการแปลงอิมพีแดนซ์	32
รูปที่ 2.18 แสดงการหักมุมของสายส่งแบบไมโครสตริป	33
บทที่ 3. การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป	
รูปที่ 3.1 รูปแบบการป้อนสัญญาณแก่สายอากาศ	39
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายส่งไมโครสตริป	40
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริป	41
รูปที่ 3.4 รูปแสดงสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์	42
รูปที่ 3.5 ตัวแบ่งกำลังแบบ T-junction ที่ใช้ในการป้อนสัญญาณ	43
รูปที่ 3.6 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอลเมนต์	44
รูปที่ 3.7 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลเมนต์	45
บทที่ 4. การทดสอบและผลการทดลอง	
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่า SWR ของสายอากาศไมโครสตริป	47
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป	47
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่า Return Loss ของสายอากาศไมโครสตริป	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 แสดงผลสรุปของ SWR และค่า Return Loss โดยใช้ Z-match	48
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า SWR ของสายอากาศที่ระยะ (d = 0.75)	49
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ระยะ(d = 0.75)	49
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่า Return Loss ของสายอากาศที่ระยะ (d = 0.75)	50
รูปที่ 4.8 แสดงผลสรุปของ SWR และค่า Return Loss ที่ระยะ d = 0.75 โดยใช้ Z-match	50
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่า SWR ของสายอากาศที่ระยะ (d= 0.65)	51
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ระยะ (d = 0.65)	51
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่า Return Loss ของสายอากาศที่ระยะ (d = 0.65)	52
รูปที่ 4.12 แสดงผลสรุปของ SWR และค่า Return Loss ที่ระยะ d = 0.65 โดยใช้ Z-match	52
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่า SWR และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศที่ระยะ (d = 0.5)	53
รูปที่ 4.14 แสดงผลสรุปของ SWR และค่า Return Loss ที่ระยะ d = 0.5 โดยใช้ Z-match	54
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่า SWR และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ระยะ (d = 0.65)	55
รูปที่ 4.16 แสดงผลสรุปของ SWR และค่า Return Loss ที่ระยะ d = 0.65 โดยใช้ Z-match	56
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่า SWR และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ระยะ (d = 0.42)	57
รูปที่ 4.18แสดงผลสรุปของ SWR และค่า Return Loss ที่ระยะ d = 0.42 โดยใช้ Z-match	58
รูปที่ 4.19 แสดงภาคส่งสัญญาณ และ ภาครับสัญญาณ สายอากาศทดสอบ	59
รูปที่ 4.20 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลิเมนต์	61
รูปที่ 4.21 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลิเมนต์	62
รูปที่ 4.22 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 2 เอลิเมนต์	64
รูปที่ 4.23 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 2 เอลิเมนต์	65
รูปที่ 4.24 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 2 เอลิเมนต์	67
รูปที่ 4.25 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 2 เอลิเมนต์	68
รูปที่ 4.26 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 2 เอลิเมนต์	70
รูปที่ 4.27 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 2 เอลิเมนต์	71
รูปที่ 4.28 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 4 เอลิเมนต์	73
รูปที่ 4.29 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 4 เอลิเมนต์	74
รูปที่ 4.30 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 4 เอลิเมนต์	76
รูปที่ 4.31 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 4 เอลิเมนต์	77
รูปที่ 4.32 สายอากาศไมโครสตริป 1 เอลิเมนต์	79
รูปที่ 4.33 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอลิเมนต์ที่ระยะ d = 0.75	80
รูปที่ 4.34 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอลิเมนต์ที่ระยะ d = 0.65	81
รูปที่ 4.35 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอลิเมนต์ที่ระยะ d = 0.5	82
รูปที่ 4.36 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลิเมนต์ที่ระยะ d = 0.65	83
รูปที่ 4.37 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลิเมนต์ ที่ระยะ d = 0.42	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.38 แสดงผลเปรียบเทียบของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เlemenต์	85
รูปที่ 4.39 แสดงผลเปรียบเทียบสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เlemenต์	86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

E_x, E_y, E_z
 E_ρ, E_θ, E_c Component of \vec{E}

F_x, F_y, F_z
 F_r, F_θ, F_ϕ Component 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
 $H_\theta, H_\phi, H_\rho, H_\eta$ Component of \vec{H}

h Substrate thickness

I, \vec{I}, \vec{I}_1
 I_0, I_z, I_{mn} Electric current

J, \vec{J}, J_s Electric current densities
 $J_0(x), J_n(x)$ Bessel Functions

L Length of the microstrip antenna
Inductance

L_1 Inductance

$\lambda, \lambda_1, \lambda_2$ Lengths of transmission

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M, \bar{M}	Inducted magnetic current densities
M_x, M_y	Components of \bar{M}
Q	Quality factor
ϵ_{ef}	Frequency dependent ϵ_e
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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

สายอากาศแผ่นไมโครสตริปได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในระยะสิบปีหลังนี้เพราะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางไฟฟ้าที่ดีหลาย ๆ อย่าง เช่น เป็นแผ่นแบนเรียบ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก ง่ายต่อการแก้ไขและนอกจากนี้ยังสามารถตัดแปลงโพลาไรซ์ได้ง่ายซึ่ง สายอากาศแผ่นไมโครสตริปที่ใช้กันทั่ว ๆ ไปจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทั้งนี้ เนื่องจากขั้นตอนในการคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศสามารถทำได้ง่ายกว่าแผ่นสายอากาศรูปแบบอื่น และโดยปกติคุณสมบัติการกระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมีลักษณะโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแต่ในบางครั้งเราอาจต้องการโพลาไรซ์แบบวงกลม ซึ่งสามารถทำได้โดยการป้อนสัญญาณให้ต่างเฟสกัน 90 องศา ป้อนสัญญาณตรงขอบมุมของแผ่นสายอากาศ และหรือทำร่องตรงกลางแผ่นสายอากาศ

ไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ และใช้ในการเชื่อมโยงชิ้นส่วนวงจรต่าง ๆ ของวงจรไมโครเวฟ เนื่องจากไมโครสตริปมีขนาดเล็กจึงเหมาะสำหรับทำวงจรรวมของไมโครเวฟ (microwave integrated circuit ย่อว่า MIC) แต่ก็มีข้อจำกัดที่สามารถรับกำลังได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับนำคลื่นนอกจากนั้นยังมีค่าการลดทอนสัญญาณค่อนข้างสูงด้วยดังนั้นจึงใช้ในการส่งผ่านและจัดการกับสัญญาณที่มีระดับต่ำและในบริเวณจำกัด เช่น ภายในแผ่นวงจรพิมพ์อันเดียวกันเป็นต้นเนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปแสดงตัวเหมือนกับสายส่ง (Transmission Line) แทนที่จะเป็นตัวแพร่กระจายคลื่น จึงพิจารณาได้ว่าเป็นสายอากาศที่มีประสิทธิภาพต่ำ และมีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) แคบมาก ดังนั้นในการใช้งานจริงทั่วไปแล้วนิยมนำมาสร้างเป็นอาร์เรย์เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ

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

บทที่ 2

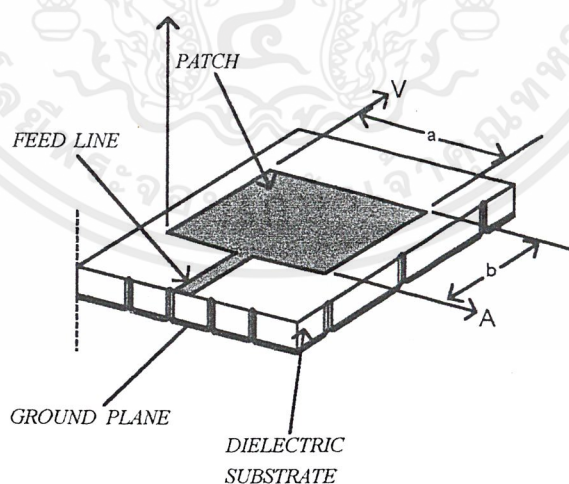
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศ

สายอากาศชนิดนี้กำลังได้รับความนิยมในระยะหลังนี้ คือสายอากาศไมโครสตริปซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบแต่ลักษณะโดยทั่วไปของมันประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

- 1.แผ่นโลหะตัวนำที่บางมากเรียกว่าแพทช์ (Patch)
- 2.สารสับเซสตรทไดอิเล็กตริก
- 3.กราวด์ซึ่งกว้างกว่า แพทช์มาก
- 4.สายป้อน (feed) ซึ่งเป็นตัวป้อนกำลังให้กับเอเลเมนต์

ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปจะประกอบด้วย แผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกันอยู่ โดยมีแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนซึ่งจะมีรูปร่างต่าง ๆ 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 ขนาดของตัวแพร่กระจายคลื่นจะมีขนาดตามความต้องการ แผ่นกราวด์ตามทฤษฎีจะต้องมีขนาดที่ไม่จำกัด แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะให้แผ่นกราวด์มีขนาดจนถึงอินฟินิตได้ ดังนั้น ในการออกแบบจึงไม่มีข้อจำกัดของแผ่นกราวด์ว่าควรมีขนาดเท่าไร เพียงแต่จะต้องมีขนาดใหญ่กว่าตัวแพร่กระจายคลื่น ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

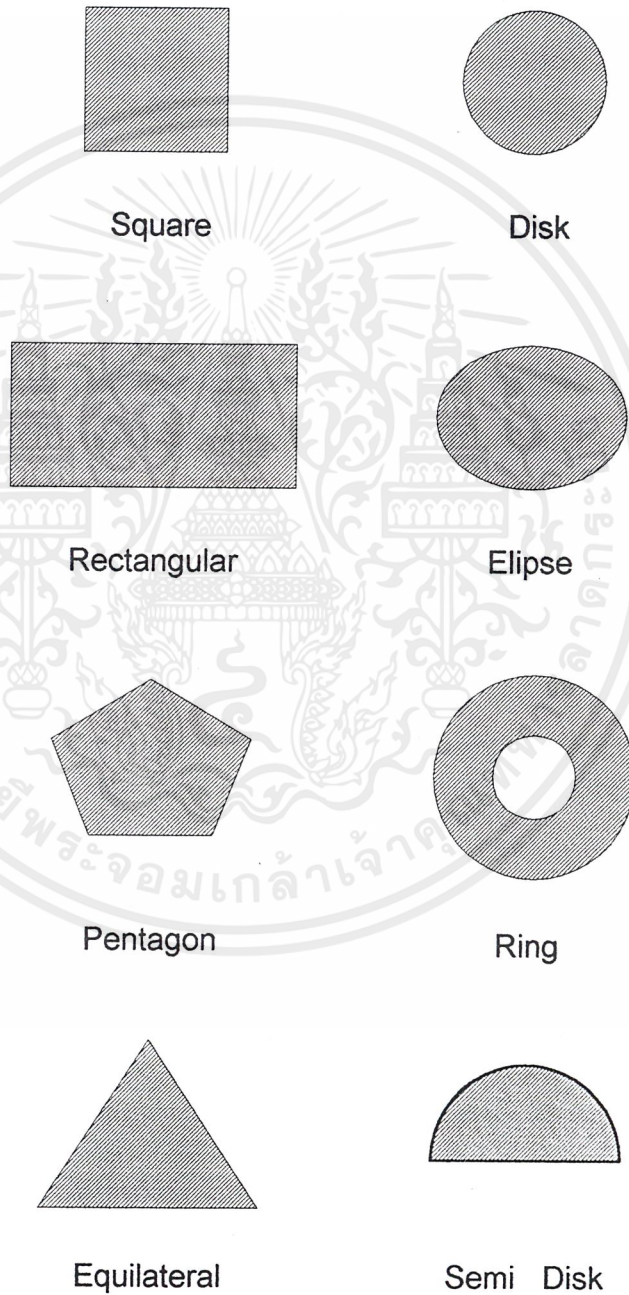


รูปที่ 2.1 รูปมาตรฐานของไมโครสตริปสี่เหลี่ยมพร้อมพารามิเตอร์แสดงขนาด

2.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบต่าง ๆ

สายอากาศไมโครสตริปจะมีพารามิเตอร์ต่างๆทางฟิสิกส์มากกว่าสายอากาศย่านไมโครเวฟทั่ว ๆ ไปที่เห็นได้ชัดคือ รูปร่างของสายอากาศไมโครสตริปแบบต่าง ๆ อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

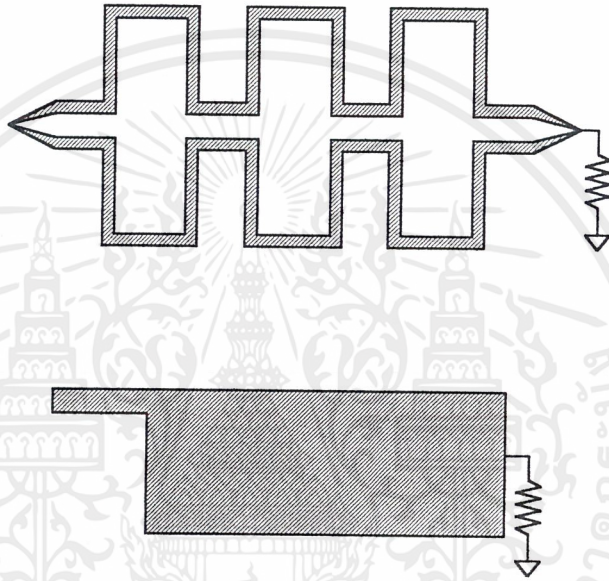
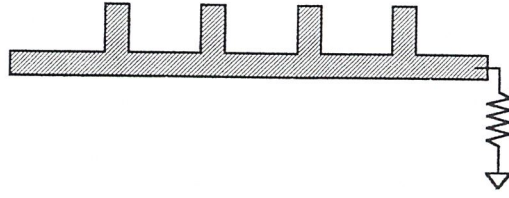
2.2.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ (MPA) ประกอบด้วยแผ่นตัวนำบางมีรูปทรงทางเรขาคณิตอยู่บนแผ่นไดอิเล็กตริก อีกด้านหนึ่งของไดอิเล็กตริกจะเป็นพื้นกราวด์ แผ่นตัวนำจะเป็นตัวกำหนดการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งหาได้จากการคำนวณรูปร่างลักษณะต่าง ๆ แสดงดัง



รูปที่ 2.2 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ (MPA)

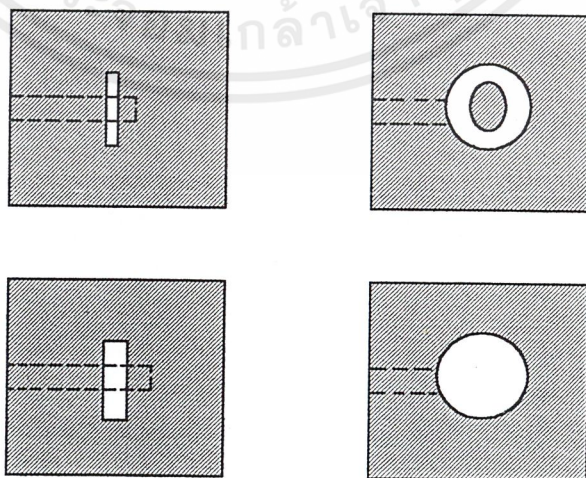
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบทราเวอร์ริงเวฟ (MTA) ประกอบด้วยตัวนำลักษณะที่เป็นคาบหรือมีความยาวตามเส้น TEM จะต่อกับความต้านทานที่เป็นภาระโดยมีรูปร่างดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบ Traveling-wave

2.2.3 สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบสล๊อตประกอบด้วยช่องซึ่งต่อกับเส้นไมโครสตริป ช่องนี้จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า, วงกลมหรือวงแหวนดังรูปที่ 2.4

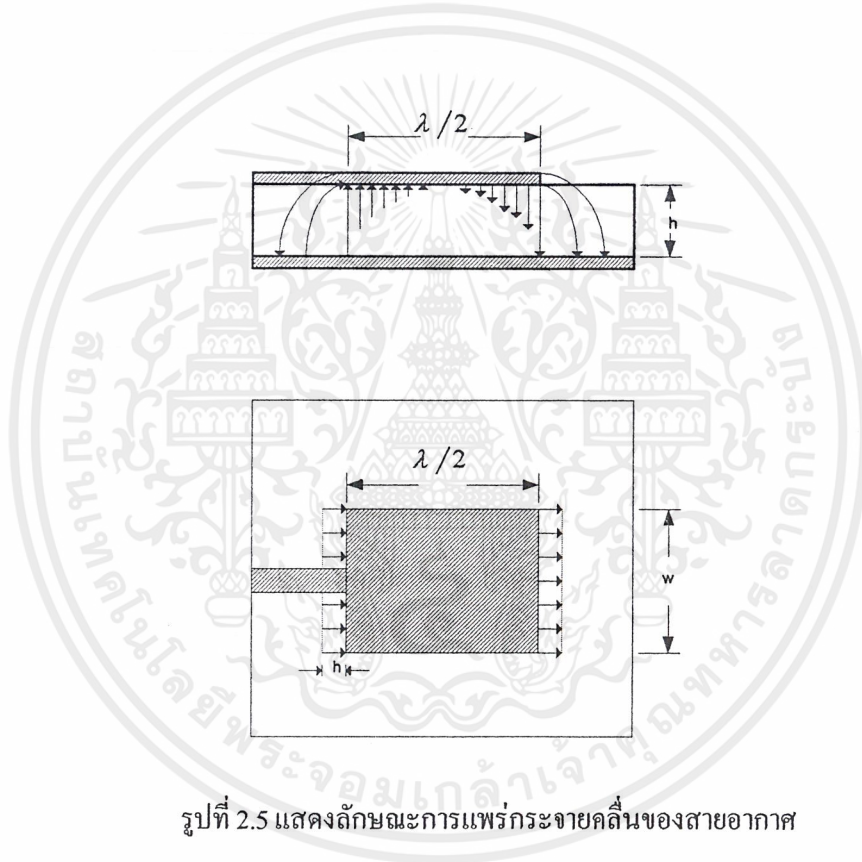


รูปที่ 2.4 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบ Slot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สนามที่แพร่กระจายของสายอากาศ

การแพร่กระจายสนามของสายอากาศจะเกิดขึ้นที่สนามรอบนอกระหว่างขอบของแผ่นตัวนำของสายอากาศและแผ่นกราวด์เพลน (Ground Plane) ซึ่งสายอากาศไมโครสตริปจะมีลักษณะโครงสร้างที่ได้กล่าวมาแล้ว แผ่นตัวนำที่เป็นสายอากาศจะมีขนาดขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะใช้งานที่จะออกแบบให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ แผ่นกราวด์เพลนที่ใช้เป็นลักษณะเป็นแผ่นทองแดงกว้างทั้งแผ่น ในส่วนของตัวนำจะมองขอบของตัวนำโดยจะมองเหมือนสายอากาศปากเปิด (Aperture Antenna) ซึ่งถ้าเป็นสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมหนึ่งเอเลเมนต์จะมีสายอากาศปากเปิดสองช่องเปิด ซึ่งทั้งสองช่องเปิดนี้จะถูกแยกออกจากกันโดยความยาวของสายอากาศซึ่งจะมีความยาวประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\lambda_g/2$) ของแผ่นไดอิเล็กตริกซึ่งทั้งสองช่องเปิดจะวางตัวเป็นแบบอาร์เรย์กัน



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การหาสนามรวมของสายอากาศไมโครสตริปหนึ่งเอเลเมนต์นั้นจะหาได้จากการนำเอาสนามของปากเปิดหนึ่งตัวคูณกันแฟกเตอร์หนึ่ง เรียกว่า อาร์เรย์แฟกเตอร์ (Array Factor) เพราะฉะนั้นเราสามารถหาสนามรวมของสายอากาศไมโครสตริปหนึ่งเอเลเมนต์ได้จาก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอาร์เรย์แฟกเตอร์สามารถหาได้จาก

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

เมื่อ

N คือ จำนวนเอเลเมนต์ของสายอากาศที่จะนำมาอาร์เรย์กัน

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

β คือ ความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศ ในที่นี้เราจะให้เฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศเป็นเฟสเดียวกัน หรือ $\beta = 0$

สายอากาศแบบช่องเปิดสองตัววางตัวอาร์เรย์กันในแนวแกน Y ดังนั้น

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \mathbf{a}_y \cdot \mathbf{a}_r = \mathbf{a}_y \cdot (\mathbf{a}_x \sin \theta \cos \phi + \mathbf{a}_y \sin \theta \sin \phi + \mathbf{a}_z \cos \theta) \\ &= \sin \theta \sin \phi \end{aligned} \quad \dots(2.3)$$

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 สายอากาศปากเปิดในสมการที่ (2.1) จะใช้ฟังก์ชันช่วย (Auxiliary Function) ที่เรียกว่า ศักดาแฟกเตอร์ (Vector Potential) มาช่วยในการแก้ปัญหา โดยศักดาแฟกเตอร์ที่ใช้กันมากได้แก่ศักดาแฟกเตอร์แม่เหล็ก (Magnetic vector Potential, (A)) และศักดาแฟกเตอร์ไฟฟ้า (Electric Potential, (F)) สำหรับการคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า E และความเข้มสนามแม่เหล็ก H มักจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ จะหาฟังก์ชันช่วยจากความหนาแน่นกระแสต้นกำเนิด (Source Current Density) ก่อนซึ่งจะเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M จากนั้นจะคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า E และความเข้มสนามแม่เหล็ก H ตามลำดับ

สนามไฟฟ้าในแนวแกน Y ที่ ช่องเปิด สามารถสมมติให้เป็นค่าคงที่และมีค่าเท่ากับ

$$Ea = a_y Eo \left\{ \begin{array}{l} -h/2 \leq x' \leq h/2 \\ -w/2 \leq y' \leq w/2 \end{array} \right\} \quad \dots(2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้หลักการสนามสมมูลซึ่งจะคำนวณหาความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กเชิงผิว (M_s) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเชิงผิว (J_s) อันเป็นแหล่งจ่ายสมมูลซึ่งเป็นต้นกำเนิดสนามออกมาดังนี้

$$M_s = -2n \times Ea = -2a \times a_y Eo = 2Eoa_x \left\{ \begin{array}{l} -h/2 \leq x' \leq h/2 \\ -w/2 \leq y' \leq w/2 \end{array} \right\} \dots(2.6)$$

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

และ

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

เมื่อเราทราบต้นกำเนิดของสนามไฟฟ้า (J) และสนามแม่เหล็ก (M) แล้ว โดยอาศัยศักดาเวกเตอร์ไฟฟ้า (F) และศักดาเวกเตอร์ (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

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

ในการออกแบบจะพิจารณาในบริเวณระยะไกล (Far field) สามารถประมาณค่า R ได้ดังนี้

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

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

เมื่อ

r คือ ระยะห่างจากจุดโคออดิเนท (Coordinate) ไปยังจุดที่สังเกต

r' คือ ระยะห่างจากจุดโคออดิเนทไปยังจุดใด ๆ บนพื้นที่

φ คือ มุมระหว่างเวกเตอร์ r และ r'

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

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

จากสมการที่ (2.11) และสามารถแยกพจน์ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อพิจารณาเทอม e^{-jkr} ให้เป็นค่าคงที่สามารถดึงมาไว้หน้าเทอมอินทิเกรต 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

จากการวิเคราะห์สายอากาศในระบบพิกัดฉากดังนั้นในการหาระยะทางจากจุดใด ๆ บนแหล่งจ่ายไปยังจุดที่สังเกตจะสามารถหาได้จาก

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

ในระบบพิกัดฉากในการหาอนุพันธ์ของพื้นที่(Differential Area) ที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศสามารถหาได้จาก

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

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

$$\begin{aligned} L &= \iint_s Ms.e^{jkr' \cos \varphi} ds' \\ &= \int_s \int_s (2Eoa_x) \left(e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' a_\theta \right) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 2Eo \iint_S (a_x \cdot a_\theta) e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad \dots(2.18)$$

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

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

จากรูปแบบในการเปลี่ยนระบบพิกัดฉากเป็นระบบพิกัดทรงกลม เมื่อทำการคูณเมตริกจะได้

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

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

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

เมื่อพิจารณา F จะพบว่ามีแต่เฉพาะทิศทาง a_x เท่านั้นเมื่อทำการ dot product ในทิศทางต่าง ๆ จะได้ผลดังนี้

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.26) ซึ่งเทอมอินทิเกรตสามารถที่จะแยกการอินทิเกรตโดยใช้หลักการการอินทิเกรตดังสมการที่ (2.27)

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

เมื่อใช้หลักการอินทิเกรตดังสมการที่ (2.27) ซึ่งสามารถแยกการพิจารณาการอินทิเกรตโดยพิจารณาแยกการอินทิเกรตของแต่ละเทอม ได้ดังนี้

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

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

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

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.31) เปรียบเทียบกับสมการที่ (2.27) จะพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

แทนสมการที่ (2.32) ในสมการที่ (2.27) จะได้

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

ผลที่ได้จากการอินทิเกรตในแต่ละเทอมในสมการที่ (2.30) และสมการที่ (2.33) แทนค่าลงใน สมการที่ (2.26) จะได้

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

หรือในสมการที่ (2.34) สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของ $f(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ จะได้เป็น

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

เมื่อ

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

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

ในการทำงานเดียวกันเมื่อพิจารณา L ในทิศทาง a_ϕ จะได้ว่า

$$L_\phi = \iiint_s (2Eo.a_x) e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' .a_\phi \quad \dots(2.38)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

พิจารณาการอินทิเกรต สามารถแยกการพิจารณาเทอมอินทิเกรต โดยพิจารณาแยกแต่ละเทอมดังสมการที่ (2.27) โดยผลของการอินทิเกรตเทอมแรกจะได้

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน L กับศักดาเวกเตอร์ไฟฟ้า F สามารถที่จะหาค่าศักดาเวกเตอร์ไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ โดยการแทนค่าฟังก์ชัน L ที่ได้ในแต่ละทิศทางที่หาได้จากสมการที่ (2.35) และสมการที่ (2.43) ลงในสมการที่ (2.14) จะได้ ศักดาเวกเตอร์ไฟฟ้า F ดังสมการที่ (2.44) และสมการที่ (2.45) ตามลำดับ

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

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

ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะพิจารณาในสนามระยะไกล(Far Field) โดยสนาม H สามารถที่จะประมาณได้จาก

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

และสนาม E สามารถที่จะหาได้จาก

$$E_F = -\eta a_r \times H_F = j\omega \eta a_r \times F \quad \dots(2.47)$$

เมื่อ

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

η เป็นอินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง เมื่อพิจารณาสนาม E ในองค์ประกอบต่าง ๆ โดยพิจารณาในทิศทาง a_{θ} ก่อน

$$E_F = j\omega \eta a_r \times F_{\theta} a_{\theta} \quad \dots(2.49)$$

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

แทนค่าสมการที่ (2.40) ลงในสมการที่ (2.46)จะได้สนาม E ในทิศทาง a_{ϕ}

$$F_{\phi} = j\omega \eta \frac{\varepsilon e^{-jkr}}{4\pi r} 2whE_0 \cos \theta \cos \phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.51)$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

และพิจารณา E ในทิศทาง a_ϕ

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

เมื่อทำการ Cross Product สมการที่ (2.53) จะได้

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

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

$$E_\theta = j\omega\eta \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} 2whE_0 \sin\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.55)$$

สามารถที่จะจัดสมการที่ (2.55) ใหม่ได้เป็น

$$E_\theta = jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} whE_0 \sin\phi \left[\frac{\sin X}{X} \right] \left[\frac{\sin Y}{Y} \right] \quad \dots(2.56)$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อพิจารณาสนาม H ในองค์ประกอบต่าง ๆ โดยพิจารณาในทิศทาง a_θ ก่อน

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

แทนสมการ(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

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

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.52) และสมการที่ (2.59) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสนาม E และ H โดยทั้งสอง

ค่าจะสัมพันธ์กันด้วยค่า η

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

หรือ

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

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

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

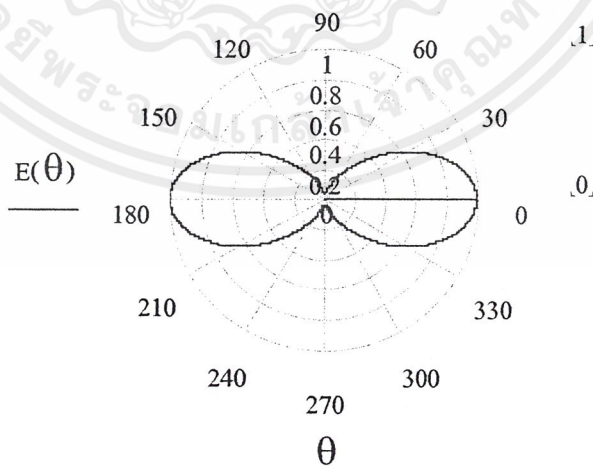
ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะสามารถวิเคราะห์ได้ใน ระนาบ E-Plane ($\phi = \pi/2$) และ H-Plane ($\phi = 0$)

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

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

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

เมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 7.0 วิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าในระนาบ E-Plane โดยใช้สมการที่ (2.68) จะได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงรูปแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้า 1 ช่องเปิดในระนาบ E-Plane

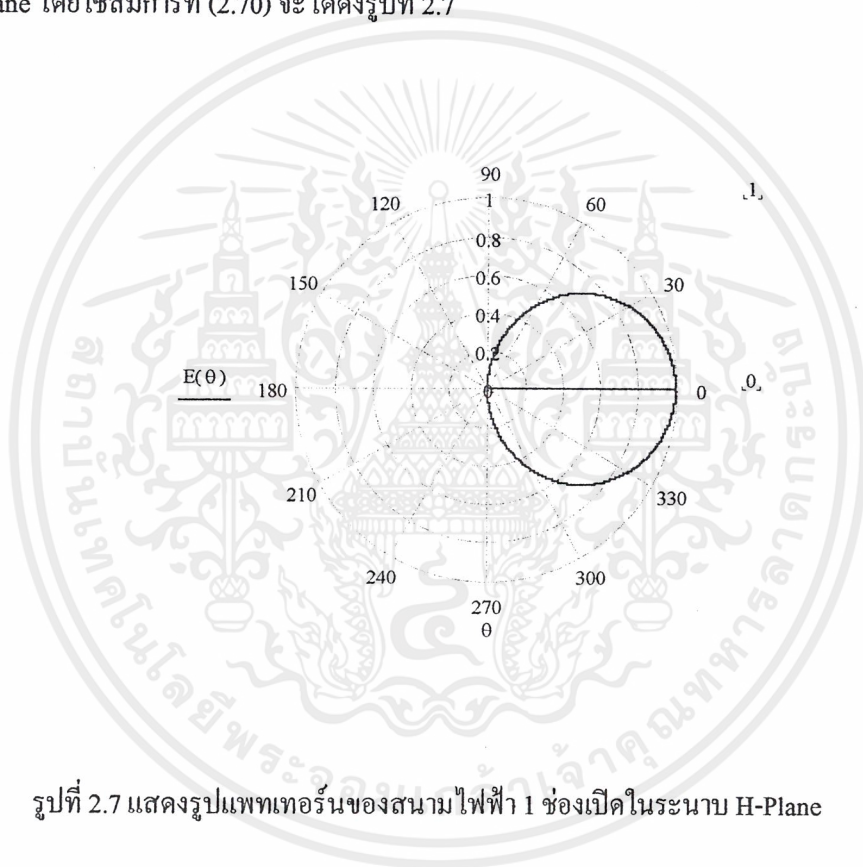
H-Plane ($\phi = 0$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ในการทำงานเดียวกันเมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 6.0 วิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าในระนาบ H-Plane โดยใช้สมการที่ (2.70) จะได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงรูปแพทเทอรันของสนามไฟฟ้า 1 ช่องเปิดในระนาบ H-Plane

ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็ก H จะใช้วิธีการเดียวกันกับการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า ดังนั้นสมการที่ (2.59)สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมการที่ (2.63)สามารถที่จะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

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

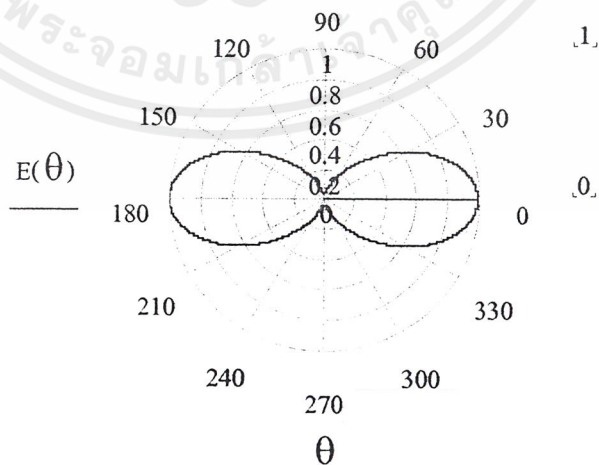
ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กสามารถที่จะวิเคราะห์ในระนาบ E-Plane และ H-Plane ได้เหมือนกับการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า

E-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 2.8



รูปที่ 2.8 แพทเทิร์นของสนามแม่เหล็ก 1 ช่องเปิดในระนาบ E-Plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



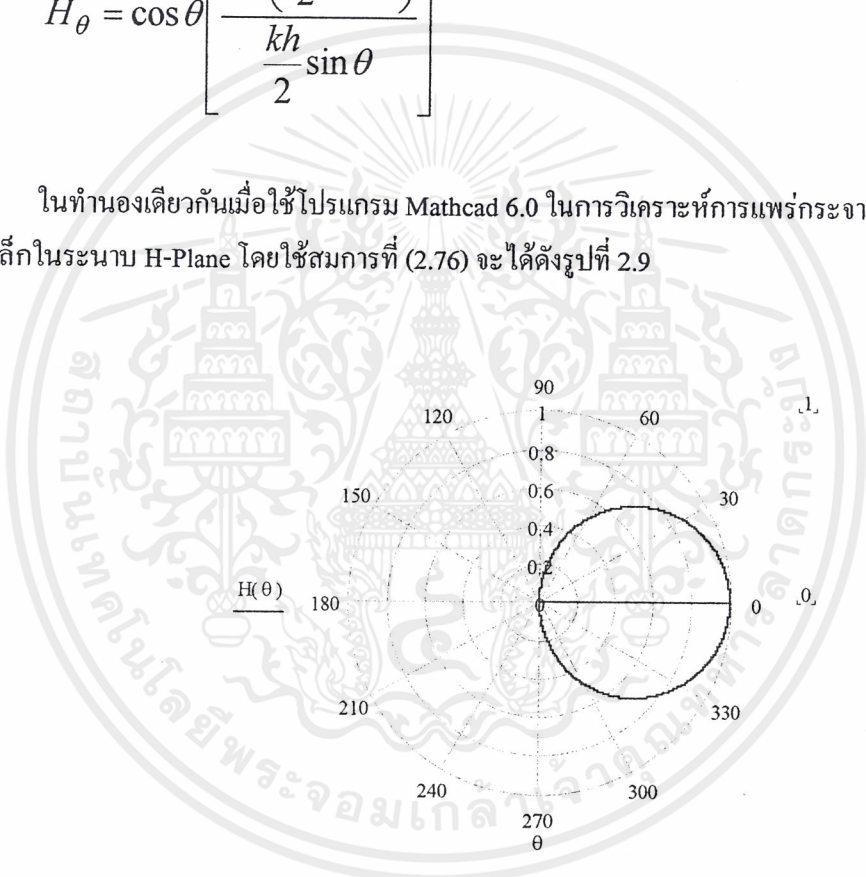
เมื่อพิจารณาในระนาบ H-Plane

H-Plane ($\phi = 0$)

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

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

ในการทำงานเดียวกันเมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 6.0 ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กในระนาบ H-Plane โดยใช้สมการที่ (2.76) จะได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แพทเทิร์นของสนามแม่เหล็ก 1ช่องเปิดในระนาบ H-Plane

ในการหาสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์สามารถที่จะหาได้จากสนามไฟฟ้าของหนึ่งช่องเปิดคูณกับค่าอาร์เรย์เฟคเตอร์ ดังสมการที่ (2.1)

$$\text{E-Plane} \left(\phi = \frac{\pi}{2} \right) \\ E_r = E_\phi = 0 \quad \dots(2.77)$$

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

ในการทำงานเดียวกันในระนาบ H-Plane สามารถที่จะหาสนามไฟฟ้ารวมได้จาก

H-Plane ($\phi = 0$)

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

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

ในการหาสนามแม่เหล็กกรวมของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์ที่สามารถที่จะหาได้เช่นเดียวกับ
กับการหาสนามไฟฟ้ารวม

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

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

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

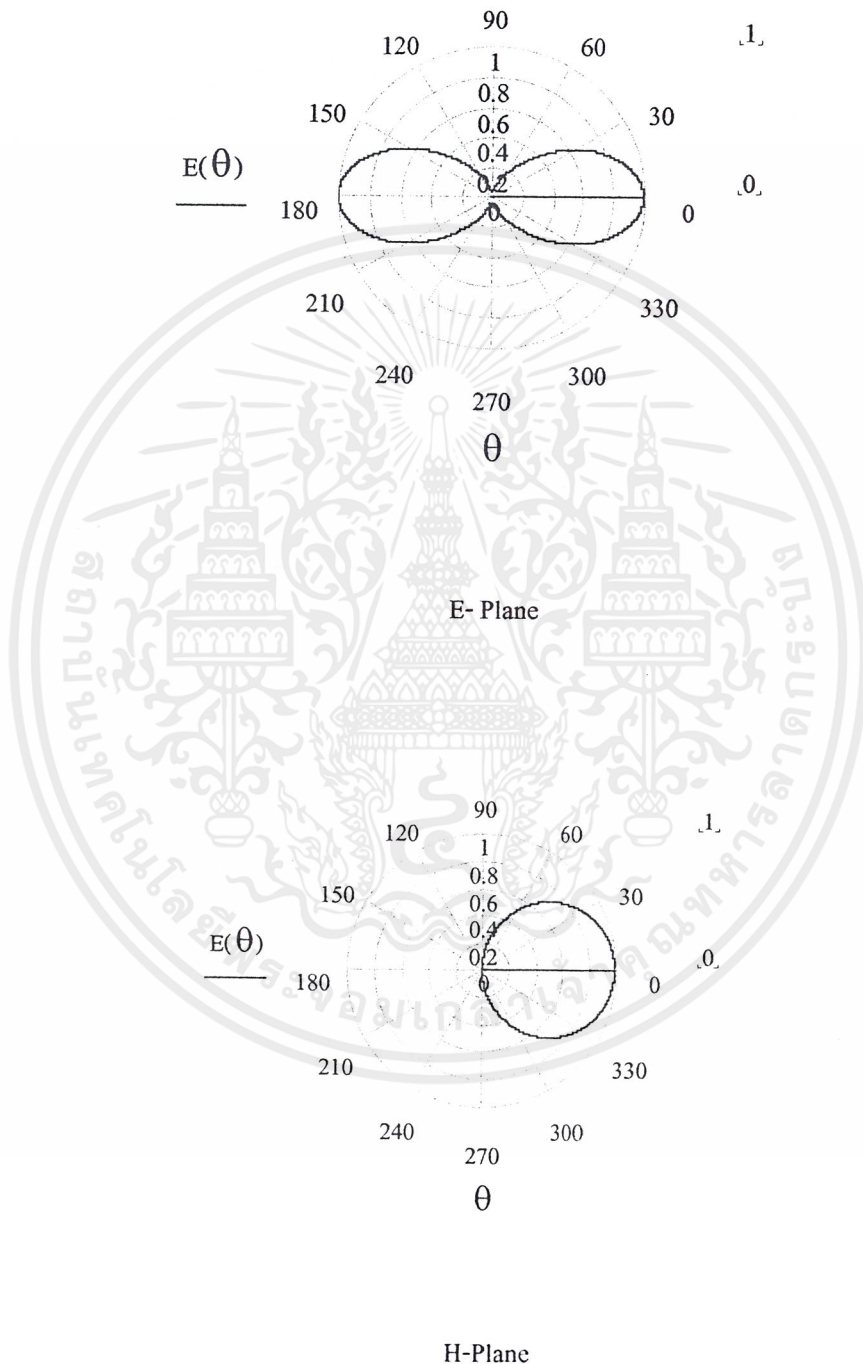
H-Plane ($\phi = 0$)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

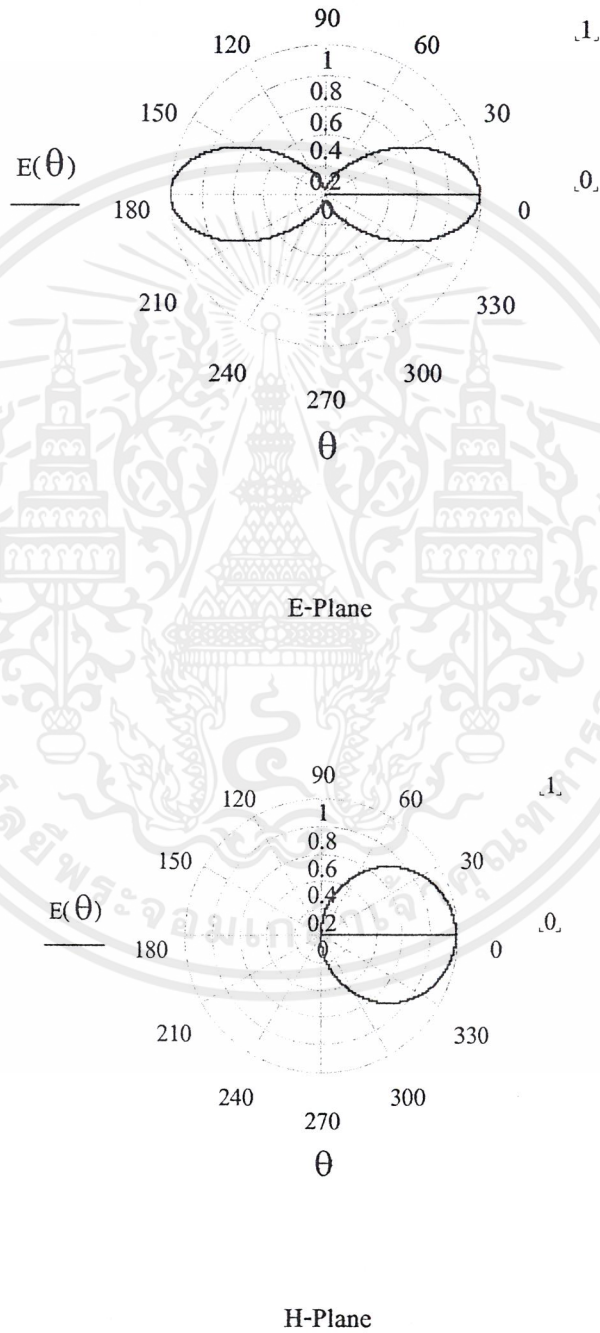
เมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 6.0 วิเคราะห์สนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์ที่ใช้สมการที่ (2.78) และ สมการที่ (2.80) จะได้แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-Plane และระนาบ H-Plane ดังรูปที่ 2.10 ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 แพทเทิร์นสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์ที่ใช้สมการที่ (2.82) และสมการที่ (2.84) จะได้แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-Plane ดังรูปที่ 2.11 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 แพทเทิร์นสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11 จะพบว่าอาร์เรย์เฟลคเตอร์จะมีผลเฉพาะแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระนาบ E-Plane เท่านั้น แต่จะไม่มีผลกับแพทเทิร์นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระนาบ H-Plane เลย

2.4 อาร์เรย์ (Array)

โดยทั่วไปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเดี่ยวซึ่งมีแพทเทิร์นค่อนข้างกว้างและมีแกนแคบ ในบางงานที่ที่ต้องการใช้สายอากาศที่มีแกนสูง การเพิ่มแกนนี้อาจทำได้โดยการเพิ่มขนาดของสายอากาศเดี่ยวทำให้คุณสมบัติในการชี้ทิศทางดีขึ้นก็ตาม แต่ยังมีวิธีอื่นที่จะเพิ่มแกนของสายอากาศโดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของสายอากาศ ที่นำมาทำเป็นเอเลเมนต์ (Element) ซึ่งทำได้โดยการจัดเอเลเมนต์ที่แพร่กระจายคลื่นให้เหมาะสมทั้งทางด้านไฟฟ้าและและรูปทรงซึ่งเรียกว่าอาร์เรย์ (Array)ซึ่งปกติจะเลือกให้แต่ละเอเลเมนต์เหมือนกัน ในการหา สนามลัพธ์ของอาร์เรย์สามารถหาได้โดยการบวกเวกเตอร์สนามของสนามที่แพร่กระจายในแต่ละเอเลเมนต์ซึ่งสนามจะรวมกันในทิศทางที่ต้องการติดต่อสื่อสาร และหักล้างกันในทิศทางที่ไม่ต้องการติดต่อสื่อสาร สายอากาศไมโครสตริปใน 1 เอเลเมนต์จะประกอบด้วยสายอากาศแบบปากเปิด 2 ตัววางอาร์เรย์กันในทิศทางที่เราต้องการ ในการออกแบบนี้จะเป็นการอาร์เรย์แบบที่มีการวางตัวเป็นเส้นตรงหรือ เรียกว่า Linear Array ในการอาร์เรย์แบบวางตัวเป็นเส้นตรงเดียวกันและมีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นไม่เป็น 0 ตัวแปรที่จะกำหนดลักษณะสมบัติของสายอากาศอาร์เรย์แบบนี้มีอยู่สองตัว คือระยะห่างระหว่างสายอากาศและขนาดของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศในแต่ละเอเลเมนต์ ซึ่งรวมถึงเฟสของกระแสด้วยจากตัวแปรสองชนิดนี้สามารถแบ่งสายอากาศอาร์เรย์ที่มีการเรียงตัวเป็นเส้นตรงออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

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 ยังสามารถแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.4.1 บรอดไซด์อาร์เรย์ (Broadside Array)

บรอดไซด์อาร์เรย์เป็นอาร์เรย์ที่การแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนอาร์เรย์ เพื่อจะทำให้อาร์เรย์เฟลคเตอร์ ของยูนิฟอร์มลิเนียร์อาร์เรย์ มีค่าสูงสุดชี้ในทิศทาง บรอดไซด์กับแนวแกน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาร์เรย์ทุกเอเลเมนต์จะต้องเป็นเฟสเดียวกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างเอเลเมนต์จะเป็นเท่าไรก็ได้สำหรับยูนิฟอร์มอาร์เรย์ที่มีเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศเท่ากับ 0 และระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละเอเลเมนต์เท่ากับ $n\lambda_d$ เมื่อ n คือจำนวนเอเลเมนต์ของสายอากาศที่นำมาอาร์เรย์กัน (1,2,3,...,n) และ λ_d คือความยาวคลื่นในสารไดอิเล็กตริก นอกจากสนามจะมีค่าสูงสุดในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแกนอาร์เรย์และสนามจะมีค่าสูงสุดในทิศทางตามแนวแกนอาร์เรย์ คือในทิศทาง 0 องศา และในทิศทาง 180 องศา

แต่ถ้าเราต้องการที่จะให้สนามที่แพร่กระจายให้มีค่าสูงสุดเฉพาะในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแกนอาร์เรย์เท่านั้น เมื่อเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศเท่ากับ 0 แล้วจะต้องกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละเอเลเมนต์ไม่ให้เท่ากับ $n\lambda_d$ ก็จะได้สนามที่แพร่กระจายเฉพาะในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแกนอาร์เรย์ดังกล่าว

2.4.2 เอนไฟด์อาร์เรย์ (End-fire Array)

เอนไฟด์อาร์เรย์เป็นอาร์เรย์ที่มีการแพร่กระจายคลื่นค่าสูงสุดในทิศทางแนวแกนอาร์เรย์สามารถกำหนดให้แพทเทอ์นมีค่าสูงสุดที่ทิศทาง 0 องศา หรือ 180 องศาซึ่งสามารถกำหนดได้จากค่าเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศเท่ากับ $-kl$ เมื่อ k คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $2\pi/\lambda$ และ l คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละเอเลเมนต์ สนามจะมีทิศทางแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทาง 0 องศา และถ้าค่าเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศเท่ากับ kl สนามจะมีทิศทางแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทาง 180 องศา

ถ้าระยะห่างระหว่างเอเลเมนต์เท่ากับ $n\lambda_d$ นอกจากจะป้อนเอนไฟด์อาร์เรย์ยังมีค่าสูงสุดของแพทเทอ์นในทิศทางบรอดไซด์อาร์เรย์ด้วย นอกจากนี้ในทิศทางเอนไฟด์ยังชี้ทั้งในทิศทาง 0 องศา และ 180 องศา อีกด้วย ดังนั้นเมื่อระยะห่างระหว่างเอเลเมนต์เท่ากับ $n\lambda_d$ สนามจะมีค่าสูงสุดอยู่ในทั้งสองทิศทาง

2.4.3 การอาร์เรย์ของสายอากาศไมโครสตริปจำนวน 4 เอเลเมนต์

การศึกษาในโครงการนี้ได้นำเอาสายอากาศไมโครสตริปจำนวน 4 เอเลเมนต์มาอาร์เรย์กัน จะเห็นได้ว่าการวางตัวของสายอากาศไมโครสตริปนั้นจะวางตัวอาร์เรย์กันในแนวแกน x ดังนั้นเราสามารถที่จะหาค่าอาร์เรย์แฟคเตอร์ในแนวแกน x ได้จากสมการที่ (2.2) โดยในการออกแบบนั้นจะเป็นดังรูปที่ 2.14 ซึ่งวิธีในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอเลเมนต์นั้นจะกล่าวรายละเอียดในบทต่อไป

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

$$\begin{aligned}\cos \gamma &= \mathbf{a}_x \cdot \mathbf{a}_r = \mathbf{a}_x \cdot (\mathbf{a}_x \sin \theta \cos \phi + \mathbf{a}_y \sin \theta \sin \phi + \mathbf{a}_z \cos \theta) \\ &= \sin \theta \cos \phi\end{aligned}\quad \dots(2.85)$$

ดังนั้นเราสามารถที่จะหาค่าอาร์เรย์แฟคเตอร์ในแนวแกน x ได้ดังสมการที่ (2.86)

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

เมื่อกำหนดให้

N = การอาร์เรย์กันของสายอากาศในแนวแกน x จำนวน 4 เอลิเมนต์

ดังนั้นในการหาสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลิเมนต์ที่สามารถที่จะหาได้โดยการนำเอาสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลิเมนต์คูณกับอาร์เรย์แฟคเตอร์ในแนวแกน x จะได้

$$\begin{aligned}\text{E-Plane} \left(\phi = \frac{\pi}{2} \right) \\ E_r = E_\phi = 0\end{aligned}\quad \dots(2.87)$$

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

เมื่อ

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

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

โดยกำหนดให้

l_1 = ระยะห่างระหว่างสายอากาศปากเปิดสองตัวในสายอากาศแต่ละเอลิเมนต์

l_2 = ระยะห่างระหว่างสายอากาศไมโครสตริปในแนวแกน x

β_1 = ความแตกต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศชุดที่ 1

β_2 = ความแตกต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศชุดที่ 2

ในการทำงานเดียวกันในระนาบ H-plane สามารถที่จะหาสนามไฟฟ้ารวมได้จากการนำเอาสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลิเมนต์คูณกับอาร์เรย์แฟคเตอร์ในแนวแกน x เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H-Plane ($\phi = 0$)

$$E_r = E_\theta = 0 \quad \dots(2.91)$$

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

... (2.92)

ในการหาสนามแม่เหล็กรวมของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลิเมนต์สามารถที่จะหาได้เช่นเดียวกับการหาสนามไฟฟ้ารวม

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

$$H_r = H_\theta = 0 \quad \dots(2.93)$$

$$H_\phi = \left[\frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \sin \theta\right)}{\frac{kw}{2} \sin \theta} \right] \left[\sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi_1} \right] \left[\sum_{n=1}^4 e^{j(n-1)\psi_2} \right] \quad \dots(2.94)$$

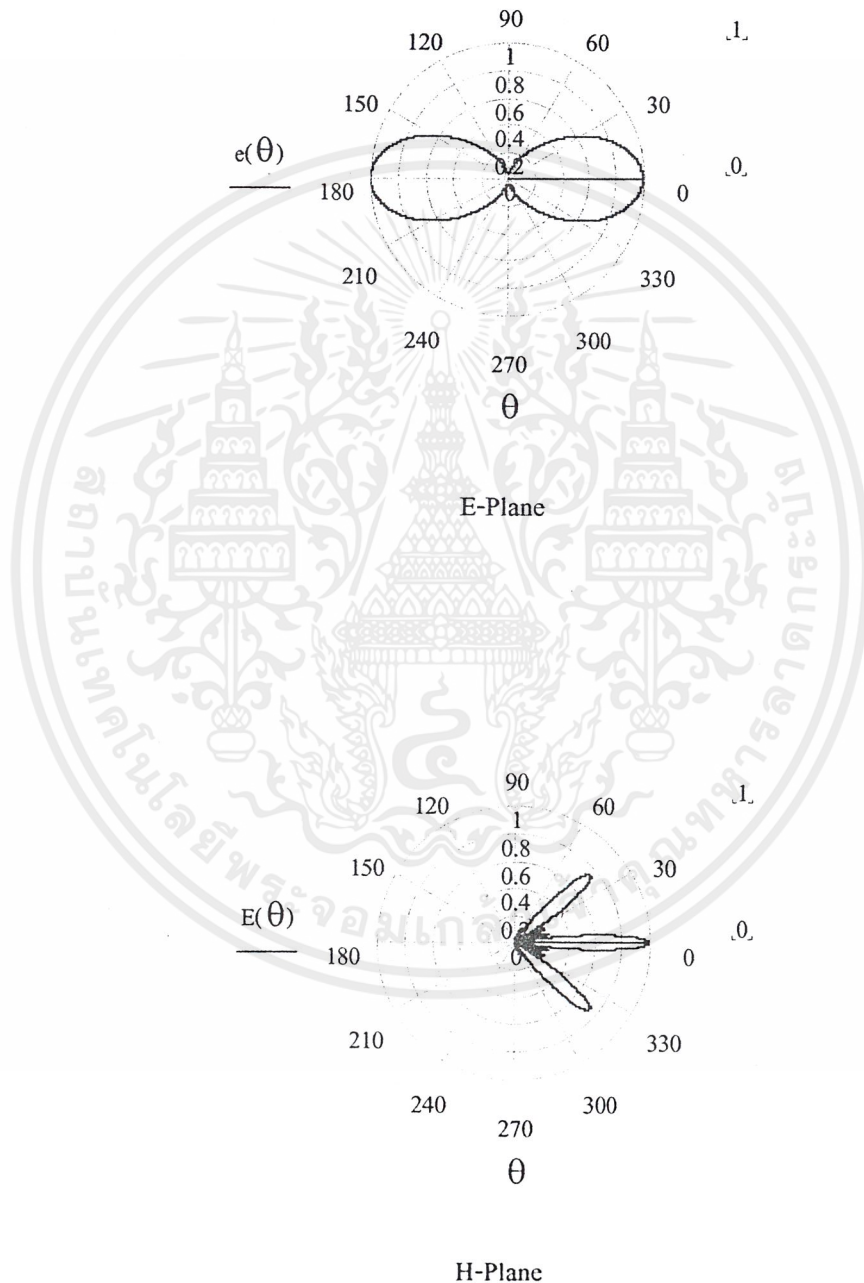
H-Plane ($\phi = 0$)

$$H_r = H_\phi = 0 \quad \dots(2.95)$$

$$H_\theta = \cos \theta \left[\frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin \theta\right)}{\frac{kh}{2} \sin \theta} \right] \left[\sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi_1} \right] \left[\sum_{n=1}^4 e^{j(n-1)\psi_2} \right] \quad \dots(2.96)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

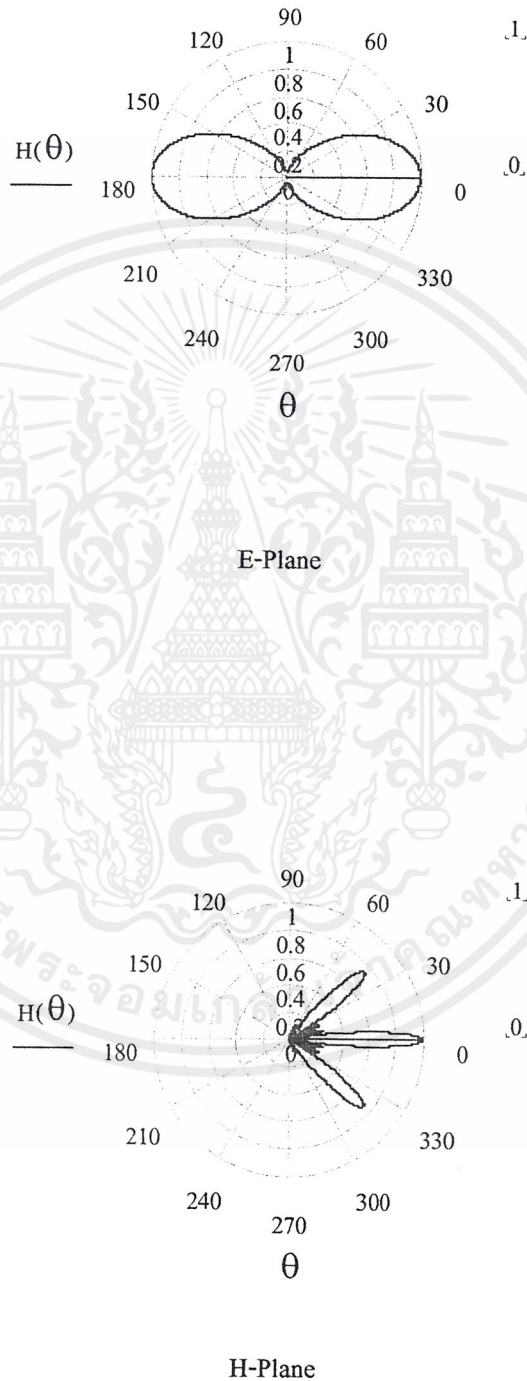
เมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 7.0 วิเคราะห์สนามไฟฟ้าของสายอากาศ ไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลิเมนต์ โดยใช้สมการที่ (2.88) และสมการที่ (2.92) จะได้แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-Plane และ ระนาบ H-Plane ดังรูปที่ 2.12 ตามลำดับ



รูปที่ 2.12 แพทเทิร์นสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

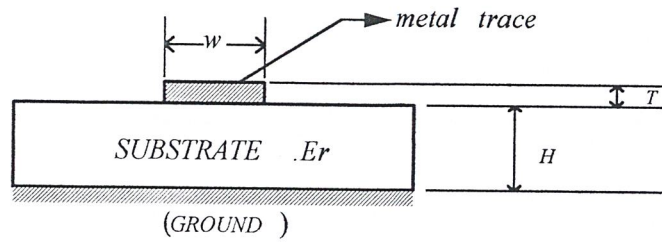
ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลิเมนต์โดยใช้สมการที่ (2.94) และสมการที่ (2.96) จะได้แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-Plane ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 แพทเทิร์นสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 8 เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สายส่งแบบไมโครสตริป



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างทางกายภาพของสายส่งไมโครสตริป

แถบตัวนำกว้าง w หนา t ถูกวางอยู่บนสารสับสเตรทไดอิเล็กตริก ที่มีค่าคงตัว ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เป็น ϵ_r สารสับสเตรทที่ใช้มีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น อลูมินาไดออกไซด์ ซึ่งมีค่า ϵ_r แปรเปลี่ยนตั้งแต่ 2 ไปจนถึง 12 ข้างบนสารไดอิเล็กตริกจะเป็นอากาศที่มีค่า $\epsilon_r = 1$

สายส่งแบบไมโครสตริปถูกใช้เป็นส่วนประกอบของ MIC เนื่องจากทำได้ด้วยราคาถูก อุปกรณ์ลัมพ์แบบพาสซีฟ ก็สามารถถูกสร้างอยู่บนสารสับสเตรทชั้นเดียวกันได้ ขาอุปกรณ์แอกทีฟ และพวงจยต่าง ๆ ก็สามารถเชื่อมต่อกับแถบโลหะได้โดยตรง ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีความกว้าง w สูง h และโลหะมีความหนาน้อยมาก ($t/h \leq 0.005$)

กรณี $w/h \leq 1$

$$Z_0 = 60 \ln(8h/w + w/4h) / (\epsilon_e)^{1/2} \quad \dots(2.97)$$

เมื่อ

$$\epsilon_e = (\epsilon_r + 1)/2 + 0.5(\epsilon_r - 1)(1 + 12h/w)^{-1/2} \quad \dots(2.98)$$

กรณี $w/h \geq 1$

$$Z_0 = \frac{120\pi / (\epsilon_e)^{1/2}}{w/h + 1.393 + 0.667 \ln(w/h + 1.44)} \quad \dots(2.99)$$

เมื่อ $w/h \leq 2$

$$w/h = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad \dots(2.100)$$

เมื่อ $w/h \geq 2$

$$w/h = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad \dots(2.101)$$

เมื่อ

$$A = \frac{Z_0}{60} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right)^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad \dots(2.102)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\epsilon_r^{1/2}} \quad \dots(2.103)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

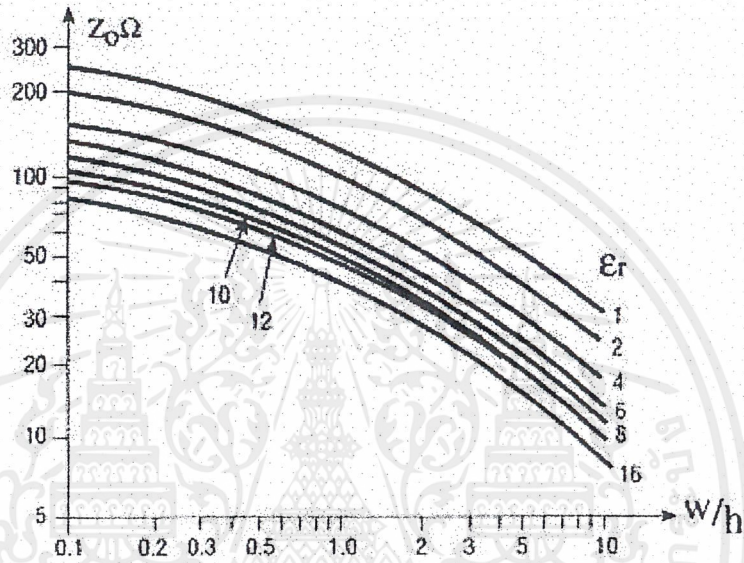
เมื่อแถบ w มีความหนา ค่า w ในสูตรจะถูกแทนด้วย w_e

เมื่อ $w/h \geq \pi/2$

$$W_e = W + \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \frac{2h}{t}\right) \quad \dots(2.104)$$

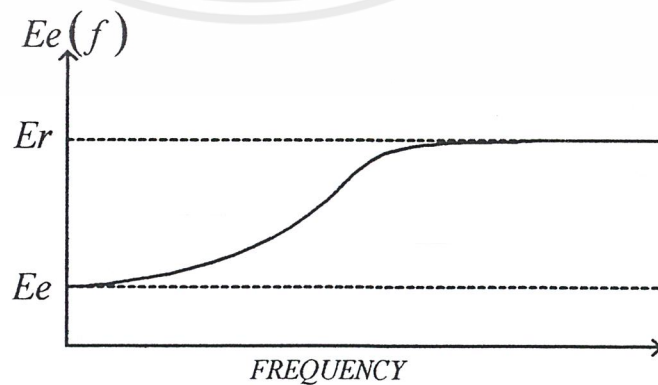
เมื่อ $w/h \leq \pi/2$

$$W_e = W + \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t}\right) \quad \dots(2.105)$$



รูปที่ 2.15 Variation of Z_o for Different Dielectric Constant and Aspect Ratio

สายส่งไมโครสตริปจะมีคุณสมบัติ dispersive โดยธรรมชาติ นั่นคือการที่ ϵ_r แปรค่าตามความถี่ ตามรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 คุณสมบัติดิสเพอร์ชัน $\epsilon_r(f)$ ในไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของสายส่งไมโครสตริปเป็นลักษณะกึ่ง TEM ดังนั้นสมการพื้นฐานเกี่ยวกับความยาวคลื่นในสายส่งไมโครสตริป คือ

$$f\lambda_g = \frac{c}{(\epsilon_r)^{1/2}} \quad \dots(2.106)$$

เมื่อ λ_g คือความยาวคลื่นในไมโครสตริป

c คือความเร็วแสง

ϵ_e คือ effective dielectric constant

f คือความถี่

ความเร็วเฟสในสายส่งไมโครสตริป คือ

$$V_p = \frac{c}{(\epsilon_e)^{1/2}} \quad \dots(2.107)$$

ส่วนกลไกในการสูญเสียทางไฟฟ้าของสายส่งไมโครสตริปคือ conductor loss และ dielectric loss ตามปรกติแล้วค่า conductor loss จะมีค่าอย่างไรก็ตามสารบางอย่าง เช่น อลูมินา ที่ความถี่สูง dielectric loss จะมีค่ามากกว่า

2.6 การออกแบบตัวแบ่งกำลัง (Power Divider)

เครื่องมือพื้นฐานสำหรับแบ่งกระจายกำลังระหว่างพอร์ทเอาต์พุต n พอร์ทตามการกระจายกำลังงานตามต้องการ คือ ตัวแบ่งเพาเวอร์ n ทางหลายๆ ตัว โดย $m < n$ และถ้าเลือก $m = 2$ ตัวแบ่งนี้จะทำให้ได้อัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ค่าน้อย มีค่าน้อยสุดจะปรากฏอยู่ที่ อินพุต และจะไม่มี การกวนกันของการแพร่กระจายเพาเวอร์ที่ เอาต์พุตพอร์ท การแยกดังกล่าวอาจทำโดยวิธีตัวแบ่งเพาเวอร์แบบวิลคินสัน (Wilkinson Power Divider) ซึ่งใช้ตัวต้านทานเป็นตัวแยกแต่มีข้อเสียคือ แบนด์วิดท์แคบ และมีการต่อตัวต้านทานทำให้โครงสร้างยุ่งยากกว่าการเป็นโครงข่ายแบบระนาบ (Planar Network) ธรรมดา

ตัวแบ่งเพาเวอร์แบบ non-isolating output ที่มีแบนด์วิดท์กว้างตัวหนึ่ง คือ T-junction การออกแบบ T-junction ต้องเป็นไปตามเงื่อนไข

$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$$

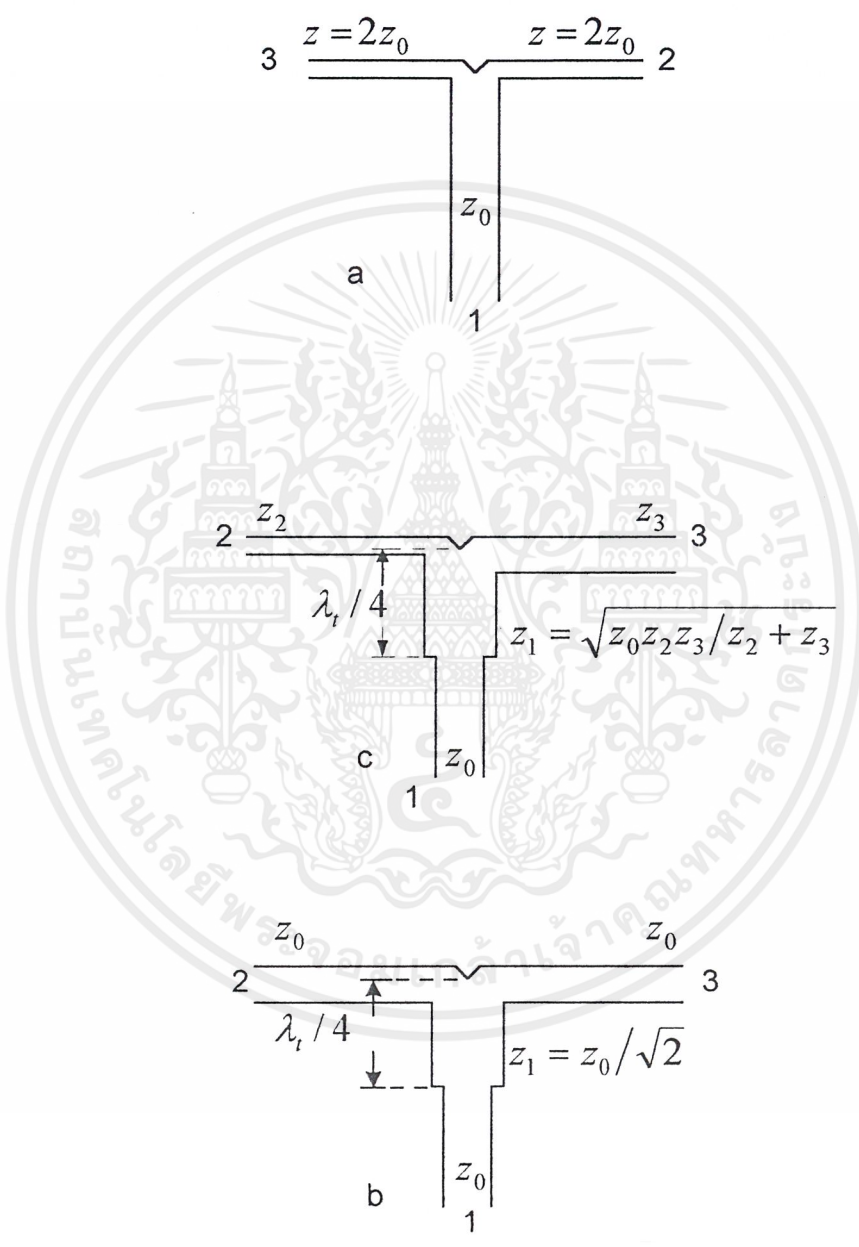
เมื่อ Z_{in} , Z_1 และ Z_2 คืออิมพีแดนซ์ของสายอินพุต และ เอาต์พุต ตามลำดับ

ดังนั้นการออกแบบระบบป้อนเพาเวอร์แบบ corporate จึงต้องเลือกอัตราส่วนการแบ่งเพาเวอร์ในแต่ละตัวแบ่งอย่างถูกต้อง เพื่อให้ได้การกระจายเพาเวอร์ที่เอาต์พุต ตามการต้องการแบบดังกล่าวอาจทำในรูปของเพลท 3 ชั้น (triplat) หรือไมโครสตริป ซึ่งต้องคำนวณความกว้างของสายเพื่อไม่ให้อิมพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แดนที่ตามต้องการ ในตัวแบ่งพาเวอร์แบบไม่สมมาตรการผิดพลาดทางเฟสอาจเกิดขึ้นที่จุดหักมุมต่างๆ ซึ่งอาจชดเชยได้โดยการปรับความยาวของสายป้อน นอกจากนี้ถ้าทำในรูป triplate นอกจากจะชดเชยการสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นแล้ว เรายังไม่ต้องชดเชยกับการที่ค่าคงตัวทางเฟส (Phase constant) ขึ้นกับความกว้างของไมโครสตริปด้วย

รายละเอียดการออกแบบตัวแบ่งพาเวอร์แบบ T-junction ตามรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.17 ตัวแบ่งกำลังแบบ T-junction แบบธรรมดาและแบบมีการแปลงอิมพีแดนซ์

พอร์ทอินพุตต้อง match และเอาต์พุตต้อง terminate อย่างเหมาะสม เช่น ถ้าอินพุตเป็น 50 โอห์ม เอาต์พุตแต่ละเส้นต้องเป็น 100 โอห์ม (กรณีแบ่งพาเวอร์แบบเท่ากัน) และควรจะมีการตัดเป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปตัว V 90 องศา เพื่อช่วยในการ match การแปลงอิมพีแดนซ์ไปเป็น 50 โอห์ม ที่เอาท์พุท ต้องใช้ step transformer หรือการ taper ดังรูป 3.4b

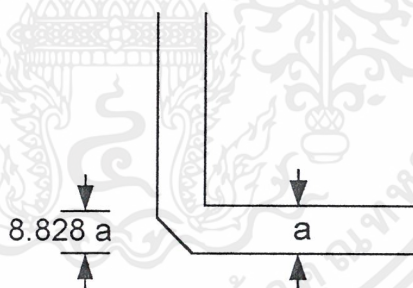
สำหรับกรณีที่แบ่งเพาเวอร์ที่ไม่เท่ากัน ทำได้โดยการใช้สายที่มีอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ตามต้องการที่พอร์ทเอาท์พุทและต้องทำการ matching ที่จุดต่อ (junction) ดังแสดงในรูป 2.9c

ถ้าเราใช้ไมโครสตริปแทน triplate ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้าน dispersive ของสายส่งด้วยค่าคงตัวทางเฟสของสายส่งไมโครสตริปขึ้นกับทั้ง ความถี่และอิมพีแดนซ์ของสาย ดังนั้นถ้าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากันในแต่ละสาย จะต้องมีการปรับความยาวให้ได้เฟสที่เอาท์พุทตามต้องการ สถานะต่าง ๆ ที่กล่าวมา จะตรงกับความต้องการของเราที่ความถี่ ๆ หนึ่งเท่านั้น

คุณลักษณะของตัวแบ่งเพาเวอร์แบบนี้ถูกจำกัดโดยการ isolation ที่ค่อนข้างต่ำระหว่างพอร์ทเอาท์พุท ถ้าพอร์ทเหล่านี้ไม่แมทซ์ซึ่ง เพาเวอร์บางส่วนจะถูกสะท้อนกลับไปยังอินพุท และบางส่วนจะถูก couple ไปยังพอร์ทเอาท์พุทอีกพอร์ทหนึ่ง ดังนั้นการกระจายเพาเวอร์ที่เอาท์พุทจะถูกบิดเบือน (distort) ไป ซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในการออกแบบสายอากาศที่มีไซเคิลโอบค้ำ

ตัวแบ่งเพาเวอร์แบบนี้มีข้อจำกัดของอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ คือมีค่ามากกว่า 2 มาก ๆ ไม่ได้ เนื่องจากมีปัญหาในการสร้างเส้นที่มีขนาดแคบที่สุด (อิมพีแดนซ์ต่ำสุด) ในทางปฏิบัติ

สำหรับการตัดมุมบริเวณ T-junction จะทำการตัดมุมบริเวณตรงกลางลงไปเป็นรูปดั่งวี 90 องศาและการหักมุมจะหักมุมดังรูปที่ 2.18 การหักมุมจะช่วยลดผลของความไม่ต่อเนื่องในโครงสร้างไมโครสตริปลงไปได้



รูปที่ 2.18 แสดงการหักมุมของสายส่งแบบไมโครสตริป

2.7 พารามิเตอร์ของสายอากาศ

2.7.1 กำลังงานที่แพร่กระจาย

กำลังงานที่แพร่กระจายจากตัวสายอากาศนั้นหาได้จากการอินทิเกรตพอยดิงเวกเตอร์เหนือพื้นที่ที่แพร่กระจายคลื่นดังสมการที่ 2.108 โดยสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับแถบตัวนำและแผ่นกราวด์ส่วนสนามแม่เหล็กจะขนานกับขอบตัวนำในส่วนของ การสูญเสียในสายอากาศไมโครสตริปจะเกิดจากการสูญเสียในตัวนำ

$$Pr = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \iint_{\text{aperture}} (\hat{E} \times \hat{H}) d\hat{s} \quad \dots(2.108)$$

2.7.2 ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น

ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อค่า W มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าความยาวคลื่นหลายๆหาได้จากสมการคือ

$$Rr = \frac{90\lambda_0^2}{W^2} \quad W \ll \lambda_0 \quad \dots(2.109)$$

$$Rr = \frac{120\lambda_0}{W} \quad W \gg \lambda_0 \quad \dots(2.110)$$

ตัวประกอบคุณภาพที่ สัมพันธ์กับความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น หาได้จากสมการที่ 2.112 ซึ่ง W คือพลังงานที่สะสมที่เรโซแนนซ์ Pr คือพลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศ

$$Pr = \frac{1}{4} \epsilon_0 \epsilon_r E_x^2 h L W \quad \dots(2.111)$$

$$Qr = \frac{c\sqrt{\epsilon_e}}{4f_r h} \quad \dots(2.112)$$

ความต้านทานสมมูลของการสูญเสียในทองแดง (Rc) และการสูญเสียในไดอิเล็กตริก

$$Rc = 0.00027 \sqrt{f_r} \frac{L}{W} Q_r^2 \quad \dots(2.113)$$

$$Rc = \frac{30 \tan \delta}{\epsilon_r} \frac{h \lambda_0}{L W} Q_r^2 \quad \dots(2.114)$$

ดังนั้นตัวประกอบคุณภาพคือ

$$Q_i = \frac{Q_r R_r}{R_r} \quad \dots(2.115)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $R_t = R_r + R_d = R_c$

$$R_r = \frac{R_r}{2} \quad \dots(2.116)$$

ประสิทธิภาพของสายอากาศคืออัตราส่วนของกำลังการแผ่กระจายคลื่นออกไปต่อพลังงานที่ไม่ได้รับเข้ามาซึ่งสามารถอธิบายในเทอมของความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นคือ

$$\eta\% = \frac{R_r}{R_r} \times 100 \quad \dots(2.117)$$

2.7.3 ไครเรคตีวิตี

ไครเรคตีวิตีเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นสูงสุดในทิศทางบีมหลักต่อค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นพลังงานที่แผ่ออกไปสำหรับหนึ่งช่องแผ่กระจายคลื่นจะได้ไครเรคตีวิตีคือ

$$D = \frac{W^2 \pi^2}{I \lambda_0} \quad \dots(2.118)$$

$$I = \int_0^\pi \sin^2\left(\frac{k_0 W \cos \theta}{2}\right) \tan^2 \theta \sin \theta d\theta \quad \dots(2.119)$$

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่ประกอบด้วยสองช่องแผ่กระจายคลื่นจะได้ไครเรคตีวิตีในแนวระนาบสนามไฟฟ้าคือ สำหรับกรณีสายอากาศไมโครสตริปจะประกอบด้วยช่องเปิดสองช่องที่วางห่างกันจะได้ไครเรคตีวิตีในแนวระนาบสนามไฟฟ้าคือ

$$D_w = \frac{12D}{1 + g_{12}} \quad \dots(2.120)$$

$$g_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \frac{\sin^2\left(\frac{\pi \omega \cos \theta}{\lambda_0}\right) \tan^2 \theta \sin \theta J_0\left(\frac{2\pi L}{\lambda_0} \sin \theta\right)}{G} d\theta \quad \dots(2.121)$$

- $J_0(x)$ คือเบสเซลฟังก์ชันอันดับศูนย์
- ω คือความกว้างของสายอากาศ
- L คือความยาวของสายอากาศ
- g_{12} คือนอมโมเมนต์มิววลคอดัคแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $g_{12} \ll 1$

$$D_w = 2D \quad \dots(2.122)$$

และ

$$D_w \cong 6.6 \quad w \ll \lambda_0 \quad \dots(2.123)$$

$$D_w = \frac{8w}{\lambda_0} \quad w \gg \lambda_0 \quad \dots(2.124)$$

2.7.4 อัตราขยายของสายอากาศ

อัตราการขยายของสายอากาศหาได้จากสมการ

$$G_e = \eta D_w \quad \dots(2.125)$$

เมื่อ

η คือประสิทธิภาพของสายอากาศ

D_w คือ ไดเรกทิวิตี

อัตราการขยายของสายอากาศนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของสาร ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นและ

ϵ_r มีค่าลดลง

2.7.5 บีมวิทซ์

บีมวิทซ์ (Beam width) คือความกว้างของมุมซึ่งจะเท่ากับมุมระหว่างทิศทางหลักซึ่งอัตราขยายมีค่าลดลง -3 dB ดังสมการ

$$\theta_{BH} = 2 \cos^{-1} \left(\frac{1}{2 \left(1 + \frac{k_0 w}{2} \right)} \right)^{1/2} \quad \dots(2.126)$$

$$\theta_{BE} = 2 \cos^{-1} \left(\frac{7.03}{(3k_0^2 L^2 + k_0 h^2)} \right)^{1/2} \quad \dots(2.127)$$

เมื่อ

θ_{BH} คือมุมที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของบีมหลักในแนวระนาบของสนามแม่เหล็ก

θ_{BE} คือมุมที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของบีมหลักในแนวระนาบของสนามไฟฟ้า

บีมวิคท์ของสายอากาศไมโครสตริปหนึ่งตัวสามารถเพิ่มได้โดยเลือกขนาดของสายอากาศที่เล็กลง ดังนั้นขนาดของความกว้างของสายอากาศและความยาวของสายอากาศจึงเล็กน้อยลงด้วย สำหรับที่ความถี่เรโซแนนซ์อาจจะต้องเลือกใหม่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ในทางกลับกันเมื่อความกว้างบีมจะต้องเพิ่มขึ้นด้วยดังนั้นก็เป็ผลทำให้อัตราการขยายลดลงแต่จะไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ

2.7.6 แบนวิคท์

แบนวิคท์ของสายอากาศไมโครสตริปสำหรับสายนำสัญญาณที่ $VSWR < S$ สามารถที่จะหาได้จากสมการ

$$BW = \frac{s-1}{Q_T \sqrt{s}} \quad \dots(2.128)$$

ข้อจำกัดเรื่องแบนวิคท์ ก็เป็นข้อเสียอย่างหนึ่งของ สายอากาศชนิดนี้เพราะมีค่าประมาณ 5-10 เปอร์เซนต์ แต่ก็สามารถที่จะเพิ่มแบนวิคท์ได้โดยเพิ่มความเป็นตัวนำให้กับตัวสายอากาศโดยอาจจะทำเป็นช่องในตัวของสายอากาศหรือเพิ่มอุปกรณ์ที่เป็นตัวนำเข้าไปเพื่อทำให้การแมทซ์ของตัวแพร่กระจายคลื่นกับสายนำสัญญาณดีขึ้น



บทที่ 3

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

จากทฤษฎีที่กล่าวมาในบทที่ 2 เพื่อหาสมการในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปซึ่งจะได้ทำการออกแบบตัวแผ่นแพร่กระจายคลื่นแบบสี่เหลี่ยม ซึ่งในบทนี้จะนำสมการเหล่านั้นมาออกแบบตามข้อกำหนดในหัวข้อ 3.1 ซึ่งการออกแบบจะแสดงในหัวข้อ 3.2

3.1 ข้อกำหนดเกี่ยวกับการออกแบบ

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่มีแบบตัวแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสี่เหลี่ยมจะออกแบบให้ใช้งานที่ความถี่ 2 GHz โดยที่ใช้แผ่นพิมพ์สองหน้าที่มีแผ่นไดอิเล็กตริกแบบอีพ็อกซีซึ่งมีค่าคงที่สัมพัทธ์ (ϵ_r) มีค่าประมาณ 4.45 ซึ่งสามารถทดสอบหาค่าได้โดยดูได้ในภาคผนวกโดยที่ความหนาของสารไดอิเล็กตริก (h) ซึ่งมีค่า 1.59 mm.

3.2 การออกแบบแผ่นแพร่กระจายคลื่น

ขั้นตอนแรกของการออกแบบหลังจากกำหนดความถี่ (f_r) ที่จะใช้งานที่ 2 GHz และข้อกำหนดต่างๆในข้างต้นมาออกแบบความกว้าง (W) ของตัวแพร่กระจาย ดังสมการที่ 3.1

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_r} (\epsilon_r + 1)^{-1/2} \quad \dots(3.1)$$

เมื่อ

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

$$f_r = \text{ความถี่ใช้งาน} = 2 \text{ GHz}$$

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

จะได้

$$W = 45.4336 \text{ mm.}$$

ขั้นตอนมาคำนวณหาความยาว (L) ของตัวแพร่กระจายคลื่น โดยจะพิจารณาจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (ϵ_{reff}) และการขยายตัวตามแนวยาว (∇L) ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4

$$L = \frac{c}{2 f_r \sqrt{\epsilon_e}} - 2 \nabla L \quad \dots(3.2)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} \quad \dots(3.3)$$

$$\nabla L = 0.412h \left[\frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \right] \quad \dots(3.4)$$

นำค่า W ที่คำนวณหาได้ในข้างต้นแทนในสมการที่ 3.3 ก็จะได้

$$\epsilon_e = 4.171$$

นำค่า W และ ϵ_e ที่คำนวณได้แทนในสมการที่ 3.4 เพื่อหาค่า ∇L ก็จะได้

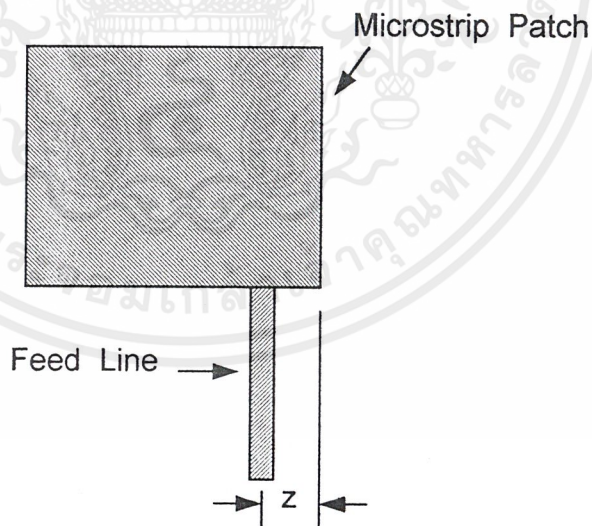
$$\nabla L = 0.73366 \text{ mm.}$$

นำค่า ∇L ที่ได้คำนวณหาค่า L ดังสมการที่ 3.2 ก็จะได้

$$L = 45.4336 \text{ mm.}$$

3.3 การคำนวณหาจุดป้อนสัญญาณแผ่นตัวแปรกระจายคลื่น

ขั้นตอนต่อไปจะทำการคำนวณและออกแบบหาจุดป้อนสัญญาณ ให้กับแผ่นกระจายคลื่นที่โดยที่ กำหนดค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) มีค่าเป็น 50 โอห์ม ซึ่งจะทำให้การคำนวณหาระยะจุดป้อนสัญญาณ (z) แก่แผ่นกระจายคลื่นได้ จากสมการที่ 3.5



รูปที่ 3.1 รูปแบบการป้อนสัญญาณแก่สายอากาศ

$$Y_{in}(z) = 2G \left[\cos^2(\beta z) + \frac{G^2 + B^2}{Y_0^2} \cdot \sin^2(\beta z) - \frac{B}{Y_0} \sin(2\beta z) \right]^{-1} \dots(3.5)$$

$$B = \frac{k_0 \Delta L \sqrt{\epsilon_e}}{Z_0} \dots(3.5)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \dots(3.7)$$

เมื่อ

Z = ตำแหน่งใด ๆ จากขอบของตัวสายอากาศ

β = ค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น

G = ค่าความนำของตัวสายอากาศ

Z_0 = ค่าความต้านทานคุณลักษณะของสายส่งมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม

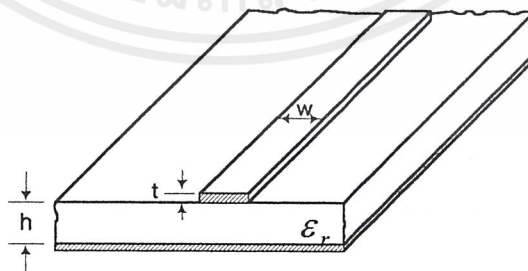
ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งจุดป้อนสัญญาณจะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขอบของตัวสายอากาศไมโครสตริปกับตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลทำให้ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป มีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ดังนั้นจะต้องระมัดระวังในเรื่องของตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณให้แก่สายอากาศไมโครสตริป ซึ่งเป็นจุดหนึ่งที่สำคัญมากในการนำไปปฏิบัติ และนำไปออกแบบ เมื่อใช้โปรแกรม Mathcad 6.0 วิเคราะห์ จะได้ค่า

ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) = 50 โอห์ม

ที่ตำแหน่งห่างจากขอบตัวสายอากาศ (Z) = 1.15 เซนติเมตร

3.4 การออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

การออกแบบสายส่งสัญญาณไมโครสตริปโดยทฤษฎีในบทที่ 2 มาใช้ในการออกแบบ โดยคำนวณหาความกว้างของแถบตัวนำโดยที่กำหนดคิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งมีค่า 50 โอห์ม



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายส่งไมโครสตริป

เมื่อ $w/h \leq 2$

$$w/h = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \dots(3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $w/h \geq 2$

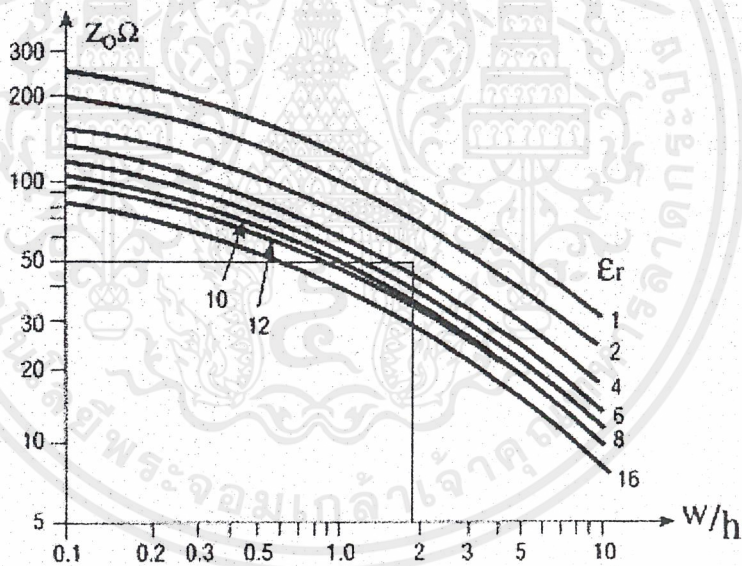
$$w/h = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad \dots(3.9)$$

เมื่อ

$$A = \frac{Z_0}{60} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right)^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad \dots(3.10)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\epsilon_r^{1/2}} \quad \dots(3.11)$$

โดยที่ค่า w/h สามารถหาค่าจากตารางรูปที่ 3.3 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2 แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณตามเงื่อนไขของสมการในข้างต้น



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริป

เมื่อ

w = ความกว้างของสายส่ง

t = ความหนาของแถบตัวนำ

h = ความหนาของฉนวนที่มีค่าประมาณ 1.58750 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

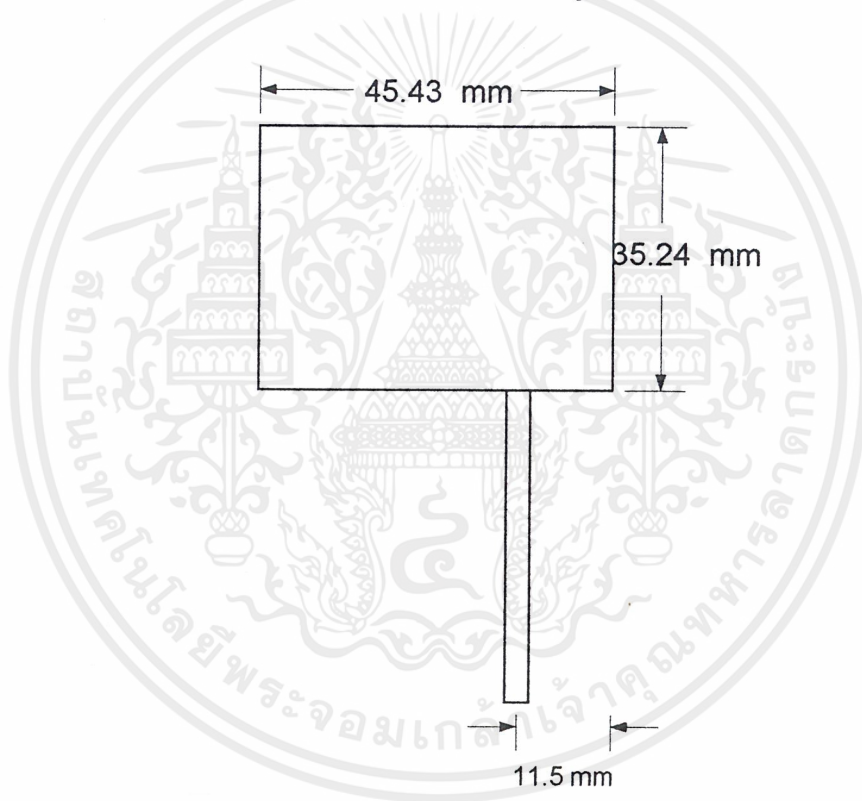
$\epsilon_r =$ ค่าคงที่สัมพัทธ์ของวัสดุที่นำมาทำชั้นสเตรทมีค่าเท่ากับ 4.45

เนื่องอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งที่กำหนดมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม โดยใช้ข้อกำหนดและเงื่อนไขการใช้สมการในข้างต้นในการคำนวณซึ่งใช้สมการที่ 3.8 ก็จะได้ค่าความกว้างของสายส่งไมโครสตริป

$$W = 3 \text{ มิลลิเมตร.}$$

3.5 สายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์

จากการออกแบบในข้างต้น ที่ได้ออกแบบแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมีขนาดความกว้าง 45.43 มิลลิเมตร และมีความยาว 35.24 มิลลิเมตร และมีระยะของการป้อนสัญญาณเป็น 11.5 มิลลิเมตรจากขอบแผ่นแพร่กระจายคลื่น โดยใช้สายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป ซึ่งมีความกว้าง 3 มิลลิเมตร ซึ่งสายอากาศที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 3.4



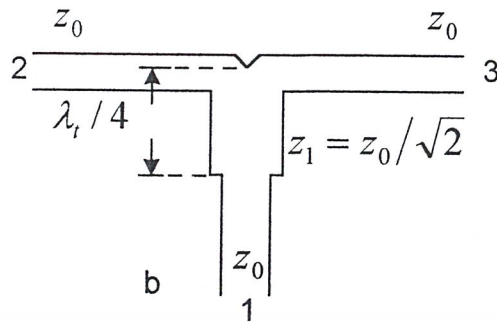
รูปที่ 3.4 รูปแสดงสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์

3.6 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอลเมนต์

สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ที่จะออกแบบนี้โดยจะออกแบบให้สายอากาศทั้งสองตัวมีเฟสเดียวกันโดยใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่มีอิมพีแดนซ์ (Z_0) เท่ากับ 50 โอห์มและใช้ตัวแบ่งกำลังแบบ T-junction ที่พอร์ทอินพุตและพอร์ทเอาต์พุตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม โดยใช้ควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Quarterwave Transformer) ในการแมทซิ่งซึ่งเราสามารถคำนวณจากทฤษฎีใน

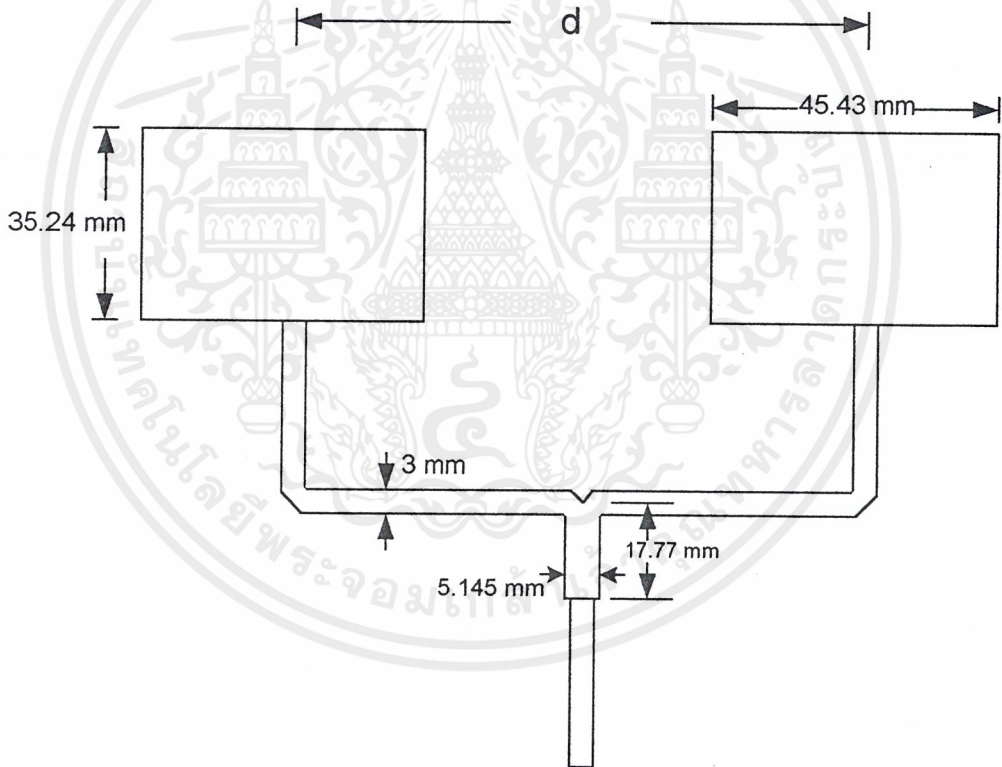
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวแบ่งกำลังโดยควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่คำนวณมาได้มีอิมพีแดนซ์ที่มีเท่ากับ 35.35 โอห์ม และมีความกว้างเท่ากับ 5.14 มิลลิเมตร โดยใช้ความยาวที่มีค่า $\lambda_g / 4$ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตัวแบ่งกำลังแบบ T-junction ที่ใช้ในการป้อนสัญญาณ

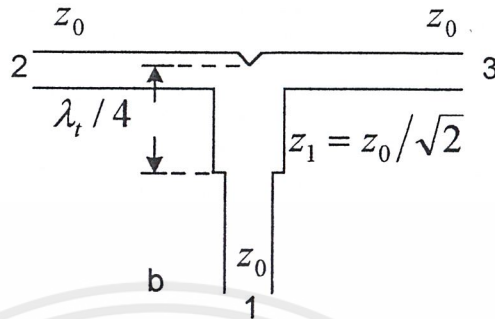
สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอเลเมนต์ ที่ออกแบบจะออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแต่ละตัวมีระยะห่าง (d) เท่ากับ 0.5λ , 0.65λ และ 0.75λ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกันซึ่งลักษณะการวางแบบคอลิเนียร์แสดงดังรูปที่ 3.6



3.7 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอเลเมนต์

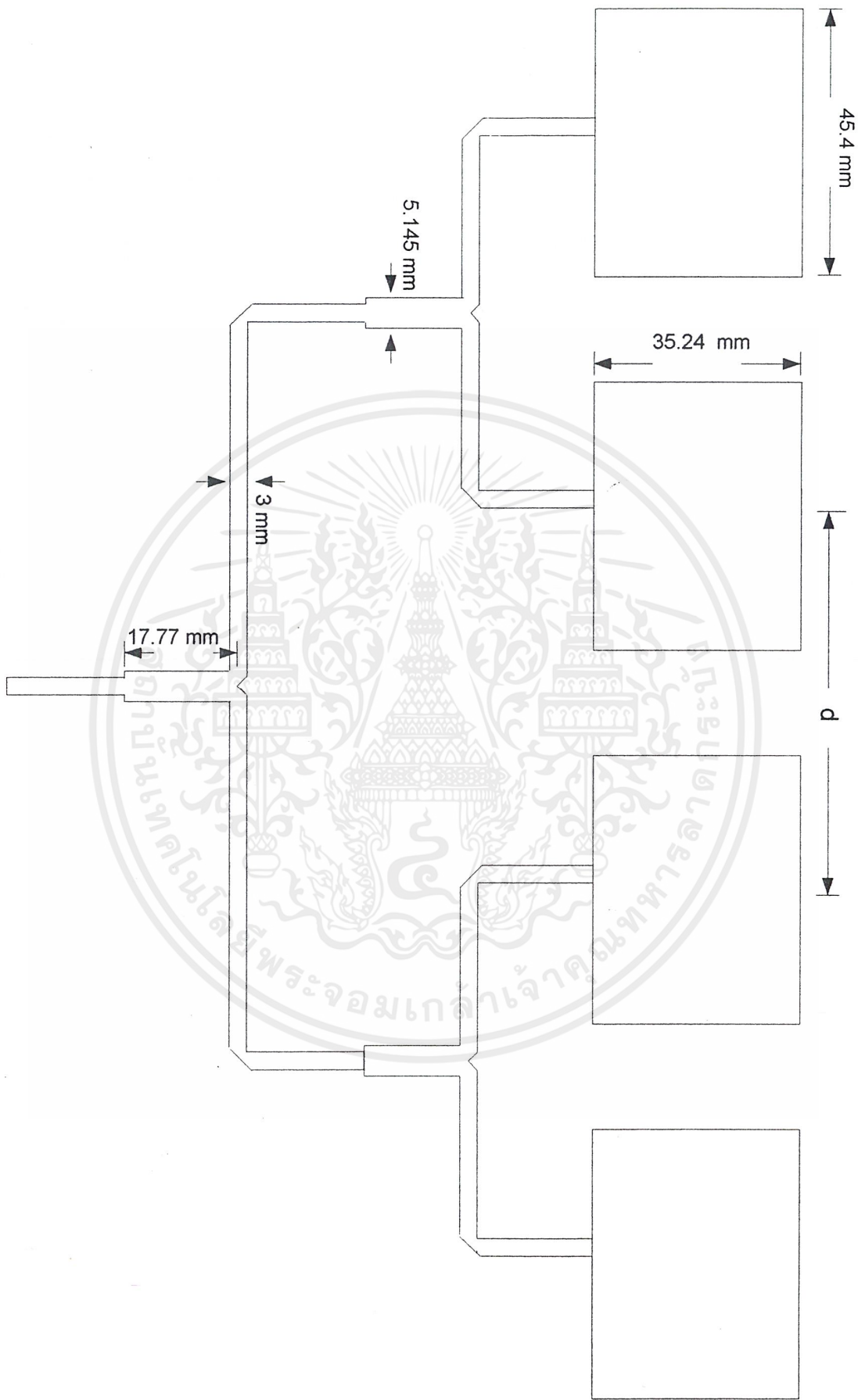
สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ที่จะออกแบบนี้ โดยจะออกแบบให้สายอากาศทั้งสี่ตัวมีเฟสเดียวกันซึ่งมีลักษณะการวางตัวแบบคอลิเนียร์ โดยใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่มีอิมพีแดนซ์ (Z_0) เท่ากับ 50 โอห์ม และใช้ตัวแบ่งกำลังแบบ T-junction โดยที่พอร์ทอินพุตและพอร์ทเอาต์พุตตัวแบ่งกำลังมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม โดยใช้ควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์(Quarterwave Tranformer) ในการแมตซ์ซิ่ง ซึ่งเราสามารถคำนวณจากทฤษฎีในการออกแบบตัวแบ่งกำลังโดยควอเตอร์เวฟทรานส์

เมอร์ที่คำนวณมาได้มีอิมพีแดนซ์ที่มีเท่ากับ 35.35 โอห์ม และมีความกว้างเท่ากับ 5.14 มิลลิเมตร ซึ่งมีวิธีคำนวณเช่นเดียวกันกับการคำนวณความกว้างของสายส่งแบบไมโครสตริป โดยให้ความยาวของ คอเวเตอร์เวฟทรานฟอร์มเมอร์ ที่มีค่า $\lambda_g / 4$ ซึ่งมีค่าประมาณ 17.77 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 ลักษณะตัวแบ่งสัญญาณแบบ T-junction

โดยในการออกแบบสายอากาศแบบไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลิเมนต์ที่กำหนดให้มีระยะห่าง (d) ระหว่างเอลิเมนต์เท่ากับ 0.65 เมตร และ 0.42 เมตรอีกหนึ่งตัวเพื่อจะได้เปรียบเทียบข้อแตกต่างในการวางตัวของสายอากาศซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 สาขาอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดลอง

หลังจากได้ออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปในบทที่ 3 แล้วในบทนี้จะนำสายอากาศไปทดสอบคุณสมบัติ โดยทั่วไปแล้วการระบุคุณสมบัติของสายอากาศจะมีดังนี้คือ ความถี่เรโซแนนท์ อิมพีแดนซ์ อัตราส่วนคลื่นนิ่งรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น เกน ซึ่งที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของสายอากาศที่ช่วยในการตัดสินใจของผู้ที่จะเลือกสายอากาศไปใช้งานดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงการทดสอบคุณสมบัติดังที่กล่าวมา

4.1 การทดสอบหาค่า การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ, อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอิมพีแดนซ์

ในการทดสอบสายอากาศนี้จะแสดงผลในรูปแบบของค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ(Return Loss), อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR) และ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศทั้งสามค่านี้มีข้อเด่นในการแสดงผลที่แตกต่างกัน กล่าวคือค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะสามารถแสดงผลได้ทุกค่าตลอดย่านความถี่ส่วนอัตราส่วนคลื่นนิ่งเป็นค่าที่โดยทั่วไปจะค่อนข้างมากที่สุดในการหาแถบความถี่ของสายอากาศก็มักจะหาจากอัตราส่วนคลื่นนิ่ง แต่ข้อด้อยของอัตราส่วนคลื่นนิ่งก็คือในบางแถบความถี่จะมีสูงมากจนไม่สามารถแสดงผลได้ครบถ้วน ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศก็จะแสดงทั้งค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ ซึ่งจะทำให้ในการเปรียบเทียบกับค่าในทางทฤษฎีและใช้ในการคำนวณเพื่อปรับจูนสายอากาศในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์แตกต่างจากค่าที่ออกแบบไว้ และจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาในการแสดงผลการทดสอบจะแสดงผลทั้งสามค่าในกรณีที่ยังไม่ได้ปรับจูนและกรณีที่ปรับจูนด้วยสตัดเดี่ยว (Single -Stub Tuner)

4.1.1 สายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์

เป็นการแสดงผลการทดลองของสายอากาศไมโครสตริปที่เสร็จโดยไม่ได้ปรับจูนอะไรเลยซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงผลที่ได้คือ

$$SWR = 1.5642 : 1$$

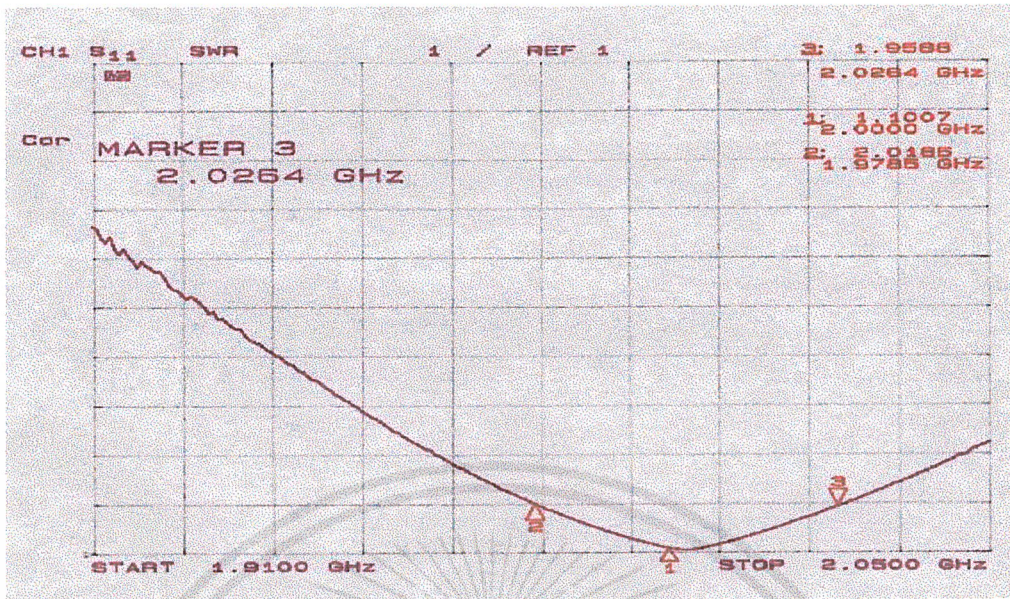
$$Z_{in} = 73.836 + j6.8867 \quad \text{โอห์ม}$$

ผลการทดลองที่ได้แสดงว่าสายอากาศที่ออกแบบ ค่าของอินพุทอิมพีแดนซ์ยังไม่ได้เท่ากับ 50 โอห์มซึ่งมีผลต่อการนำไปใช้งานจึงต้องมีการปรับปรุงสายอากาศเพื่อให้พลังงานที่ส่งออกไปมากที่สุดจึงมีการปรับอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้ได้ 50 โอห์ม ตามต้องการโดยวิธีการปรับแมทซ์ซึ่งนำมาให้ผลที่ได้หลังจากการปรับแมทซ์ซึ่งทำให้ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์มีค่าใกล้เคียงอินพุทอิมพีแดนซ์ที่ต้องการซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ผลที่ได้คือ

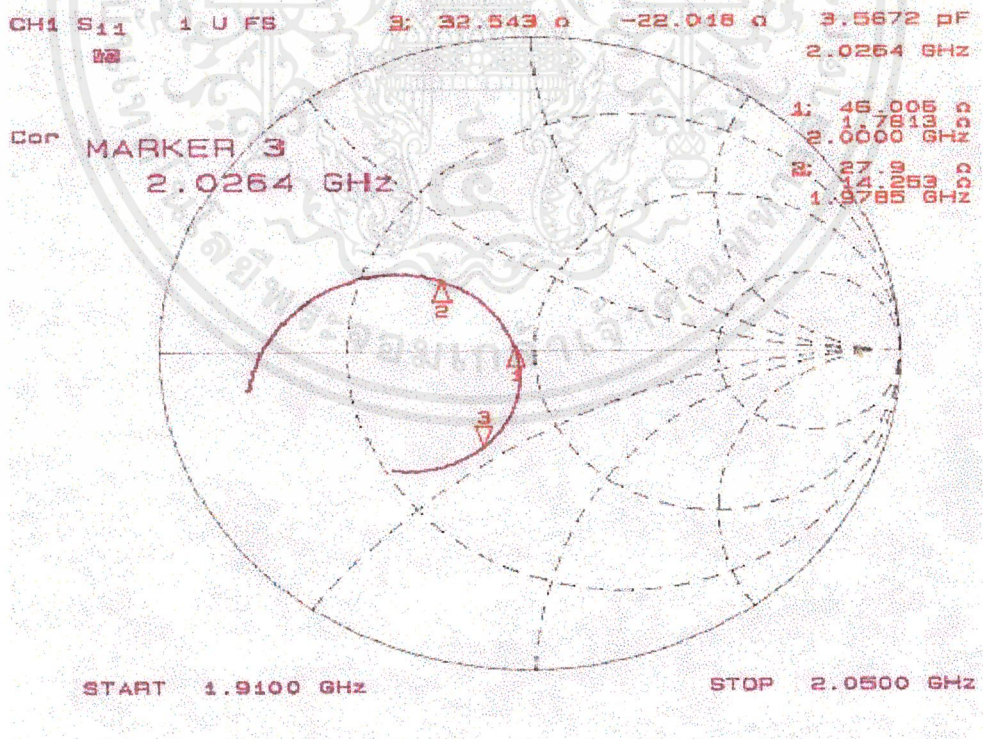
$$SWR = 1.1007 : 1$$

$$Z_{in} = 46.006 + j1.7813 \quad \text{โอห์ม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

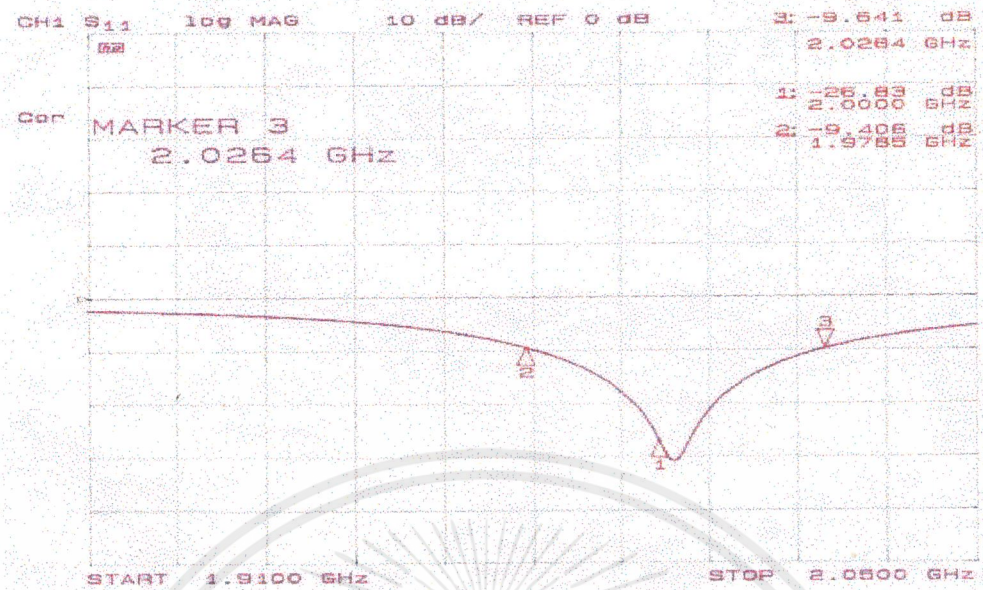


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่า SWR ของสายอากาศไมโครสตริป

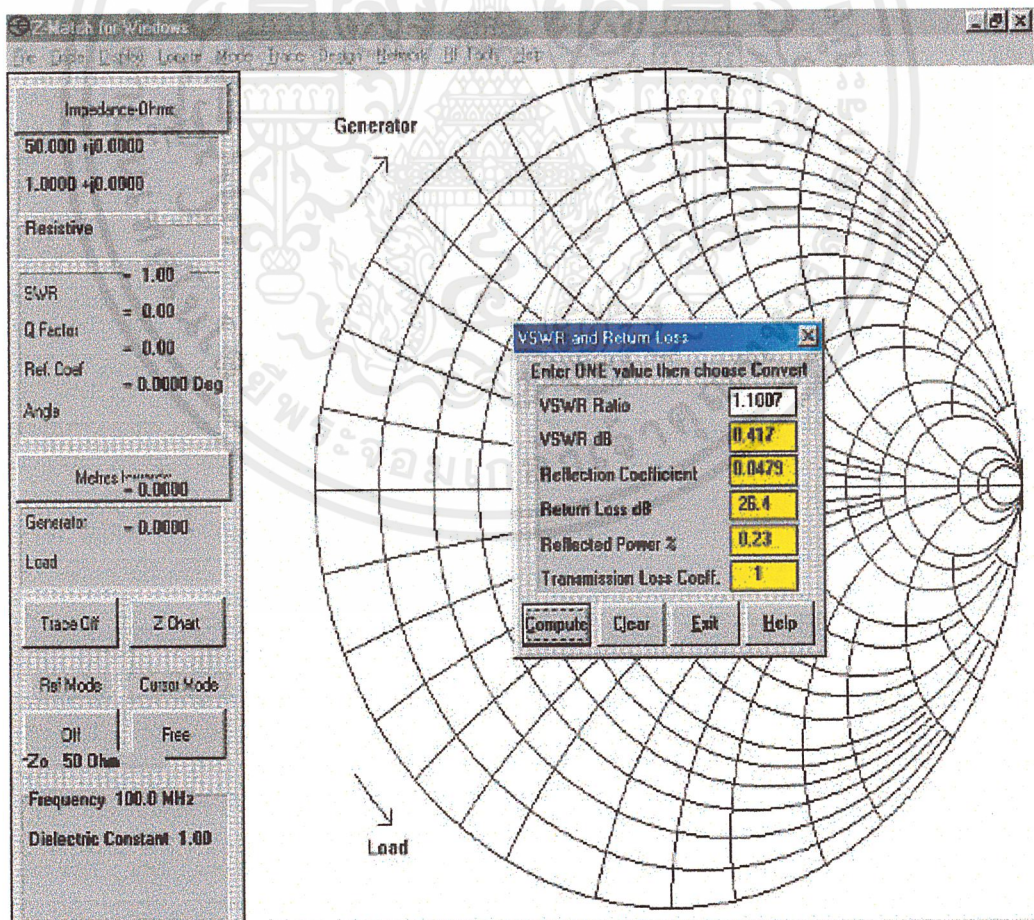


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



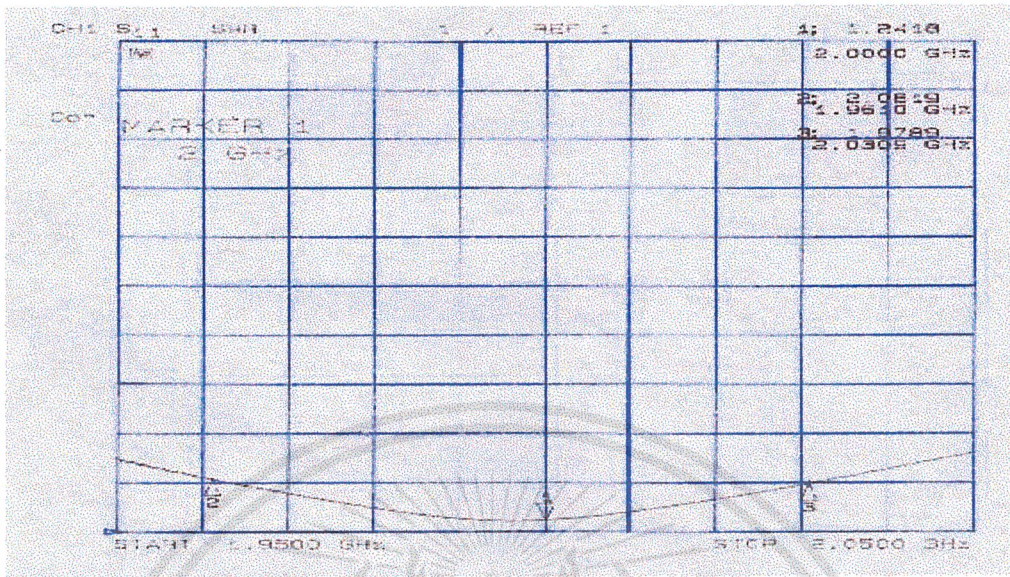
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่า Return Loss ของสายอากาศไมครอสตรีป



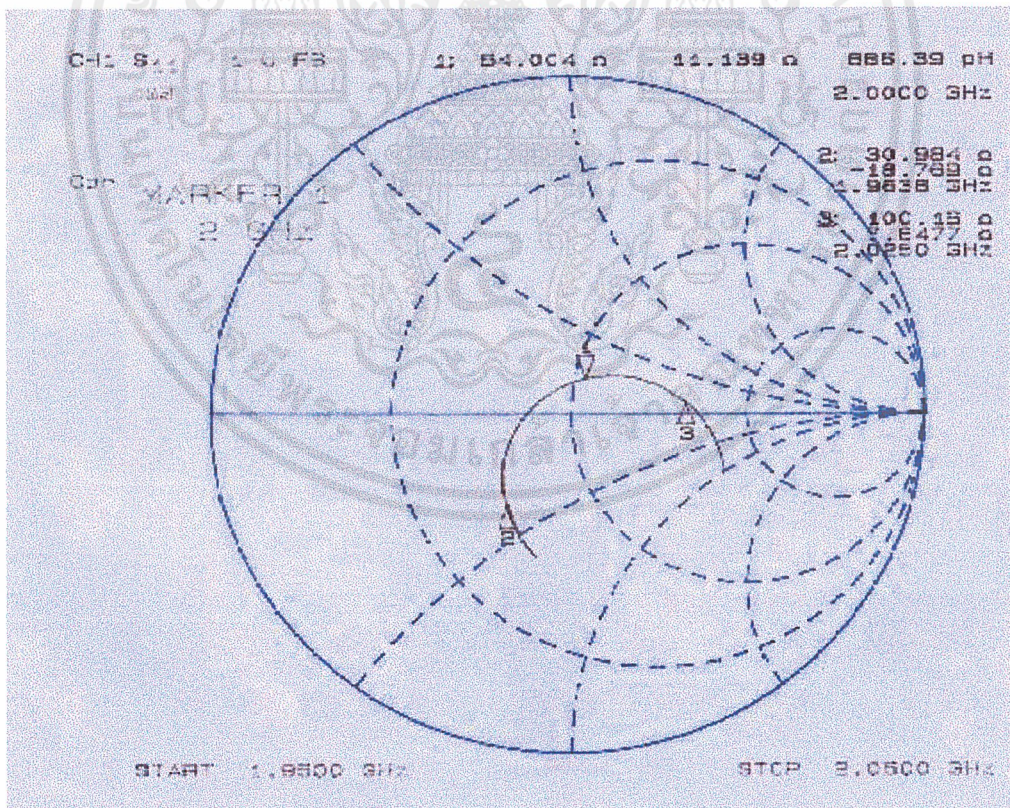
รูปที่ 4.4 แสดงผลสรุปของ SWR และค่า Return Loss โดยใช้ Z-match

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เlemenต์

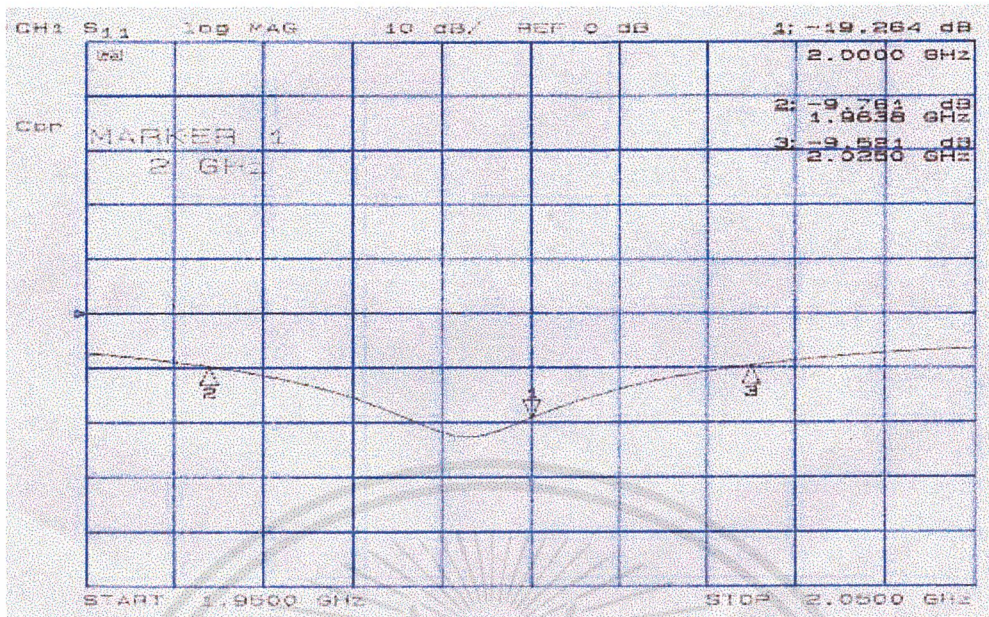


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า SWR ของสายอากาศที่ระยะ (d = 0.75)

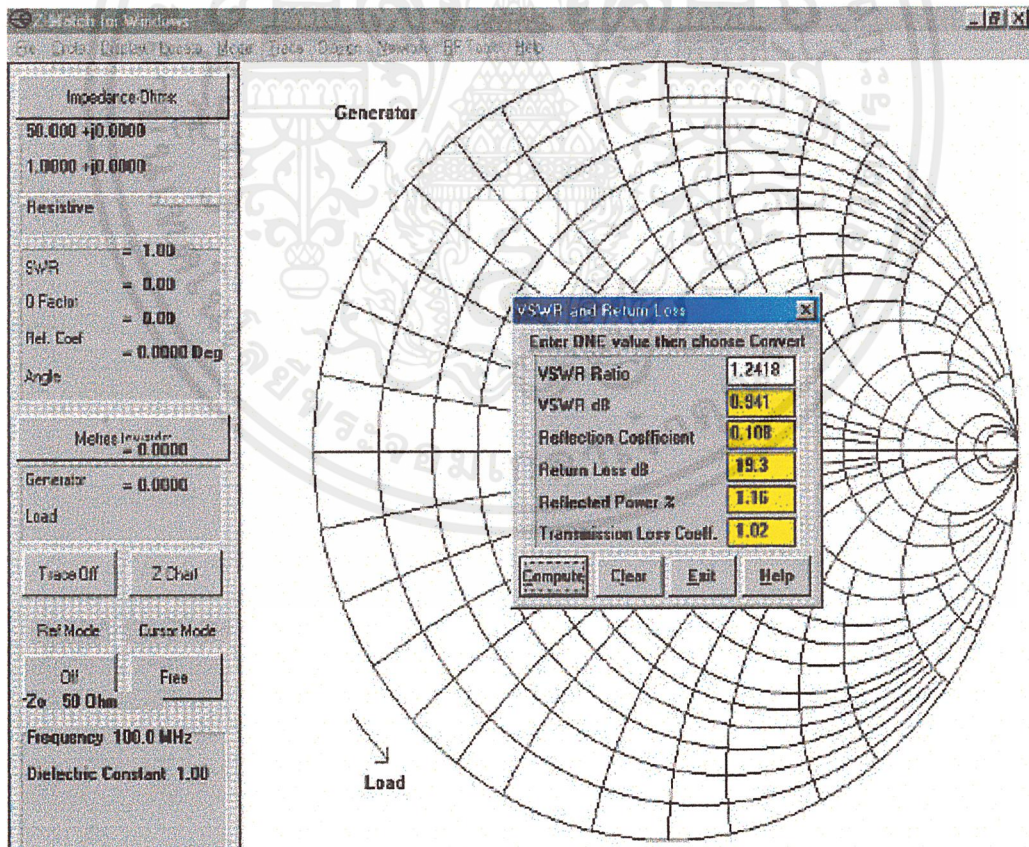


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ระยะ(d = 0.75)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

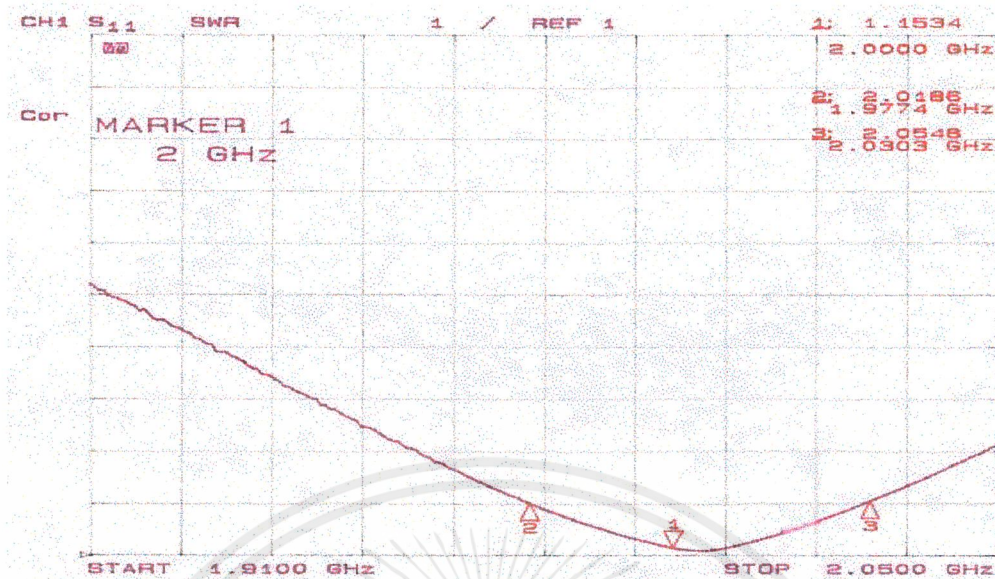


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่า Return Loss ของสายอากาศที่ระยะ ($d = 0.75$)

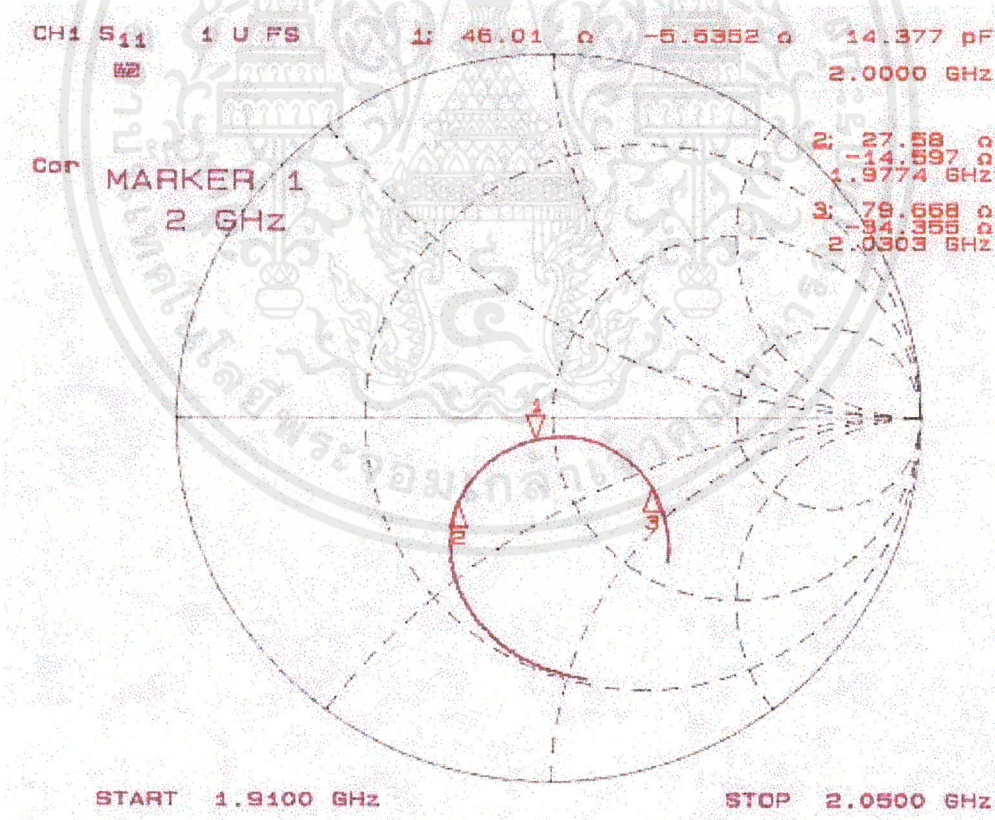


รูปที่ 4.8 แสดงผลสรุปของ SWR และค่า Return Loss ที่ระยะ $d = 0.75$ โดยใช้ Z-match

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

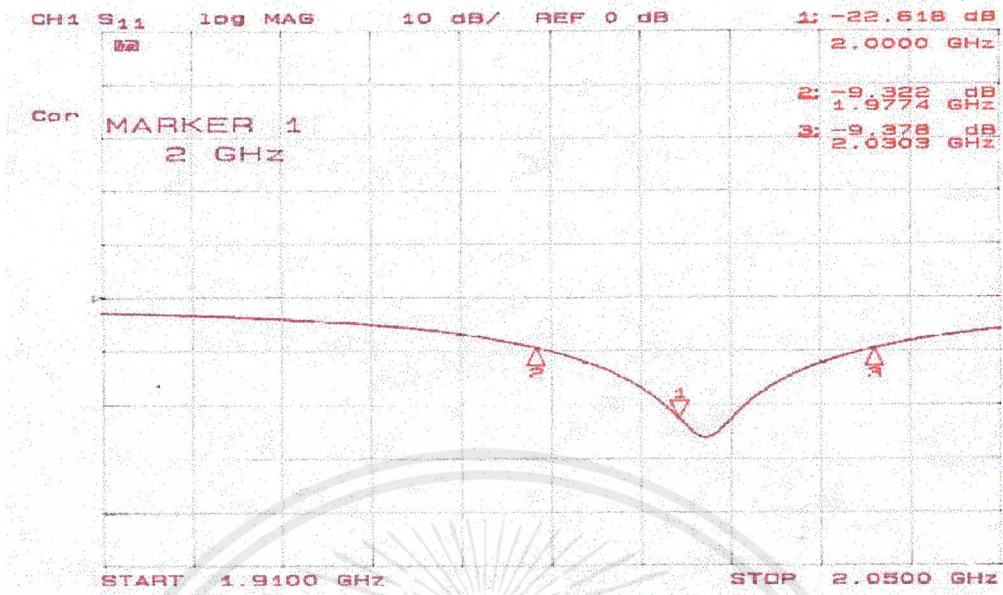


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่า SWR ของสายอากาศที่ระยะ ($d = 0.65$)

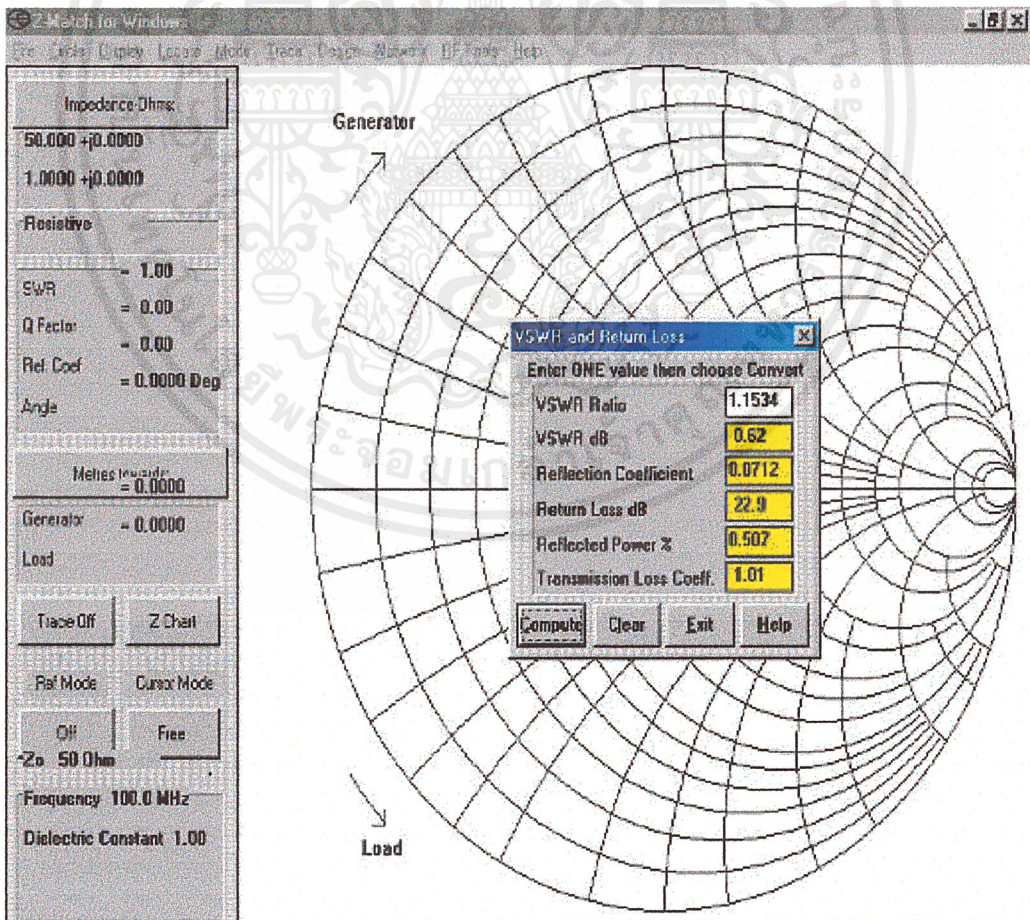


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ระยะ ($d = 0.65$)

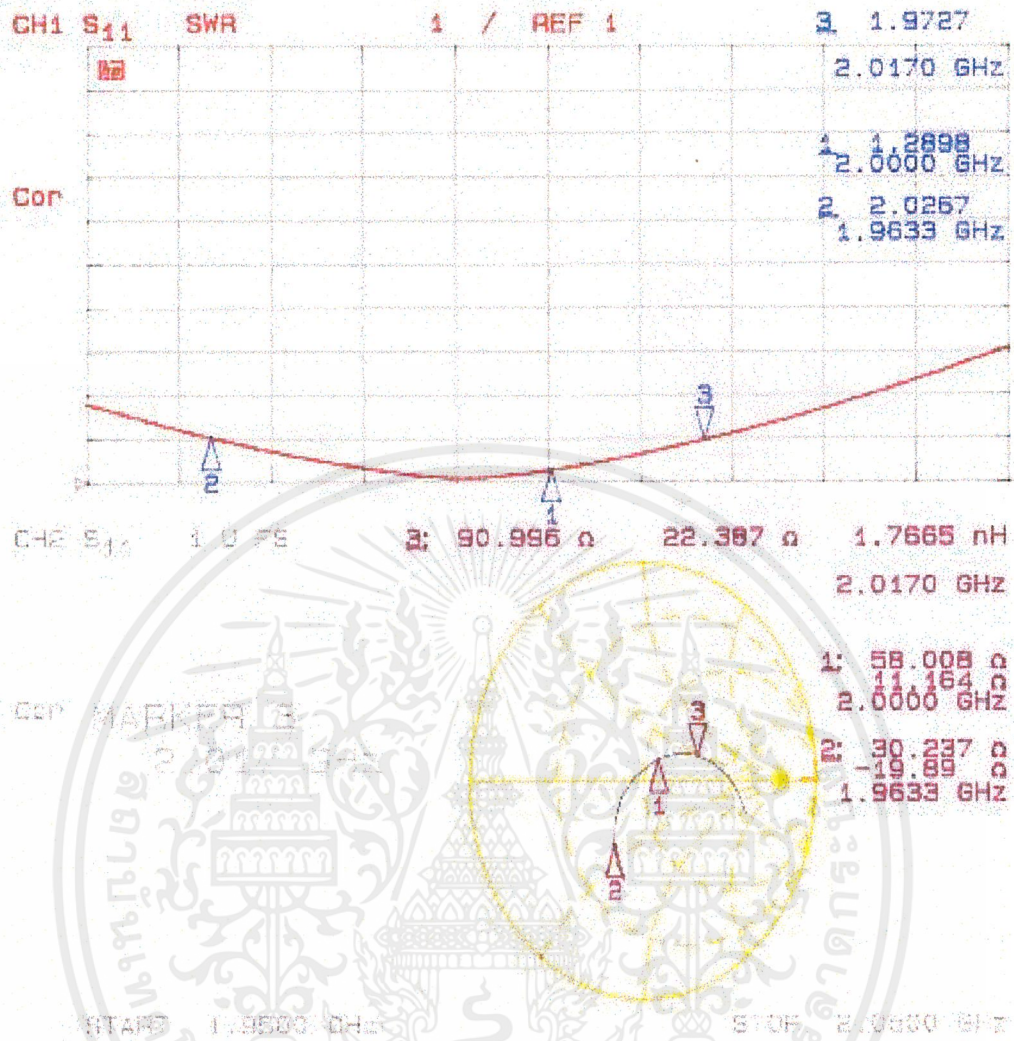
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่า Return Loss ของสายอากาศที่ระยะ (d = 0.65)

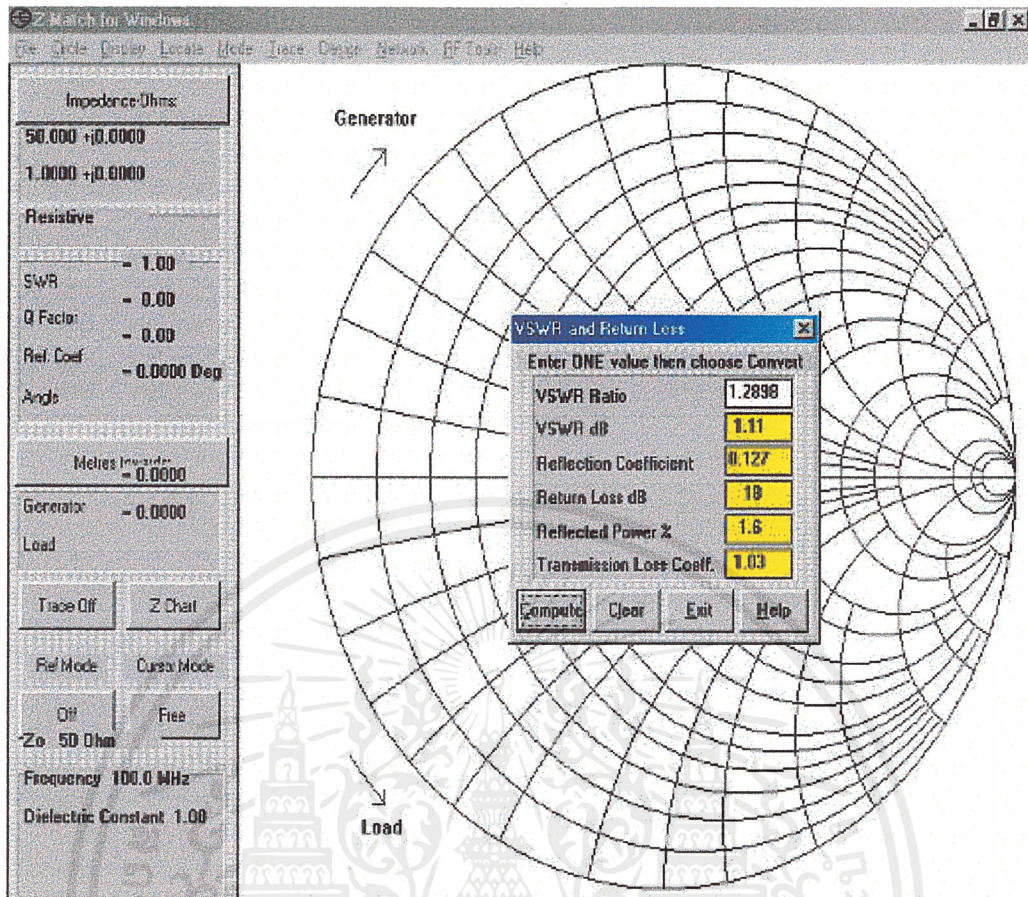


รูปที่ 4.12 แสดงผลสรุปของ SWR และค่า Return Loss ที่ระยะ d = 0.65 โดยใช้ Z-match เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่า SWR และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ระยะ (d = 0.5)

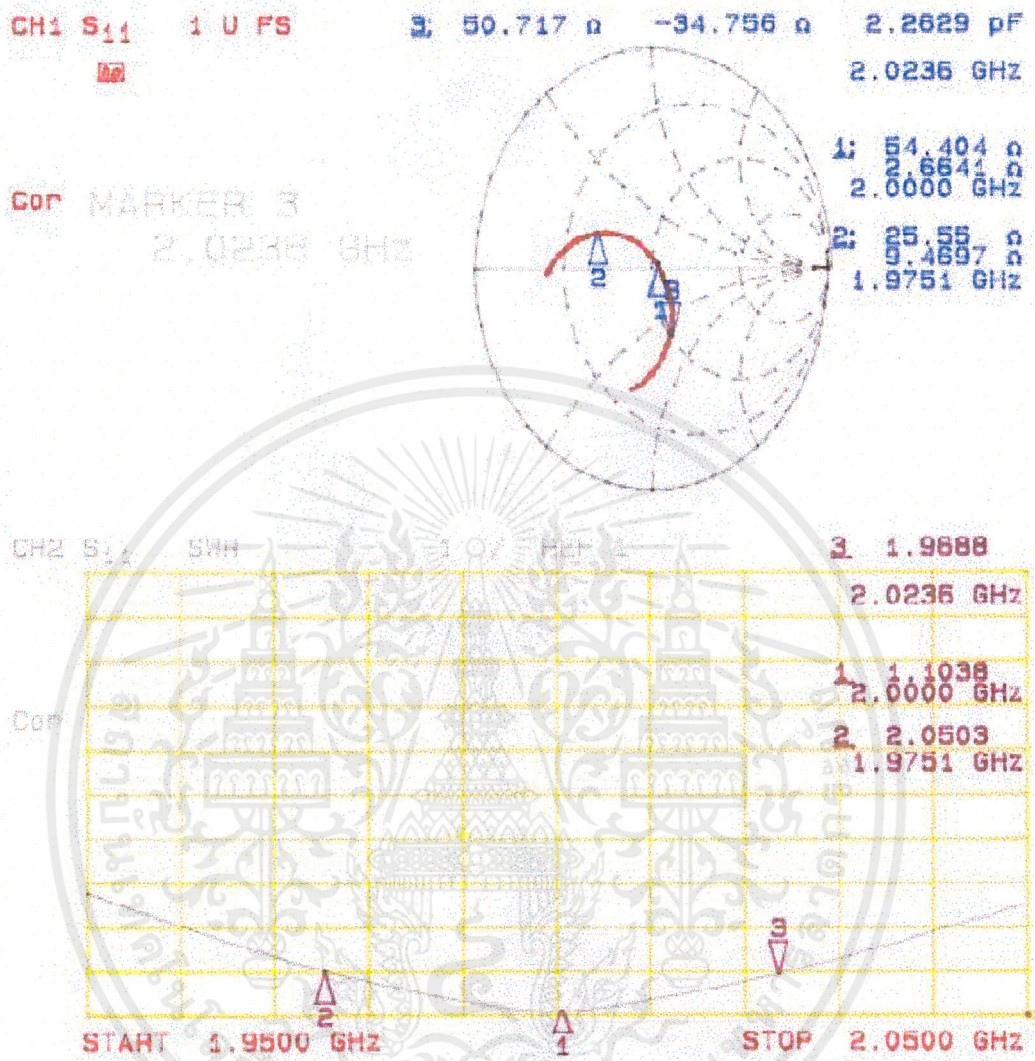
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



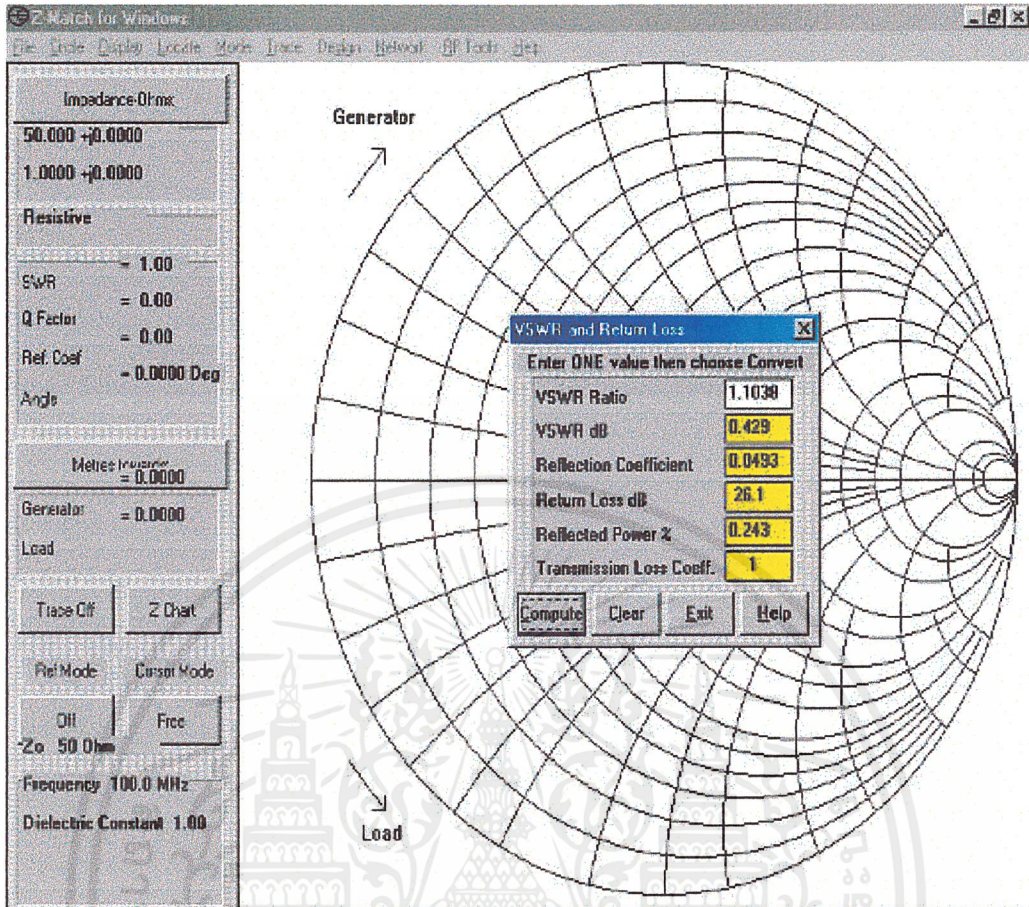
รูปที่ 4.14 แสดงผลสรุปของ SWR และค่า Return Loss ที่ระยะ $d = 0.5$ โดยใช้ Z-match

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลเมนต์

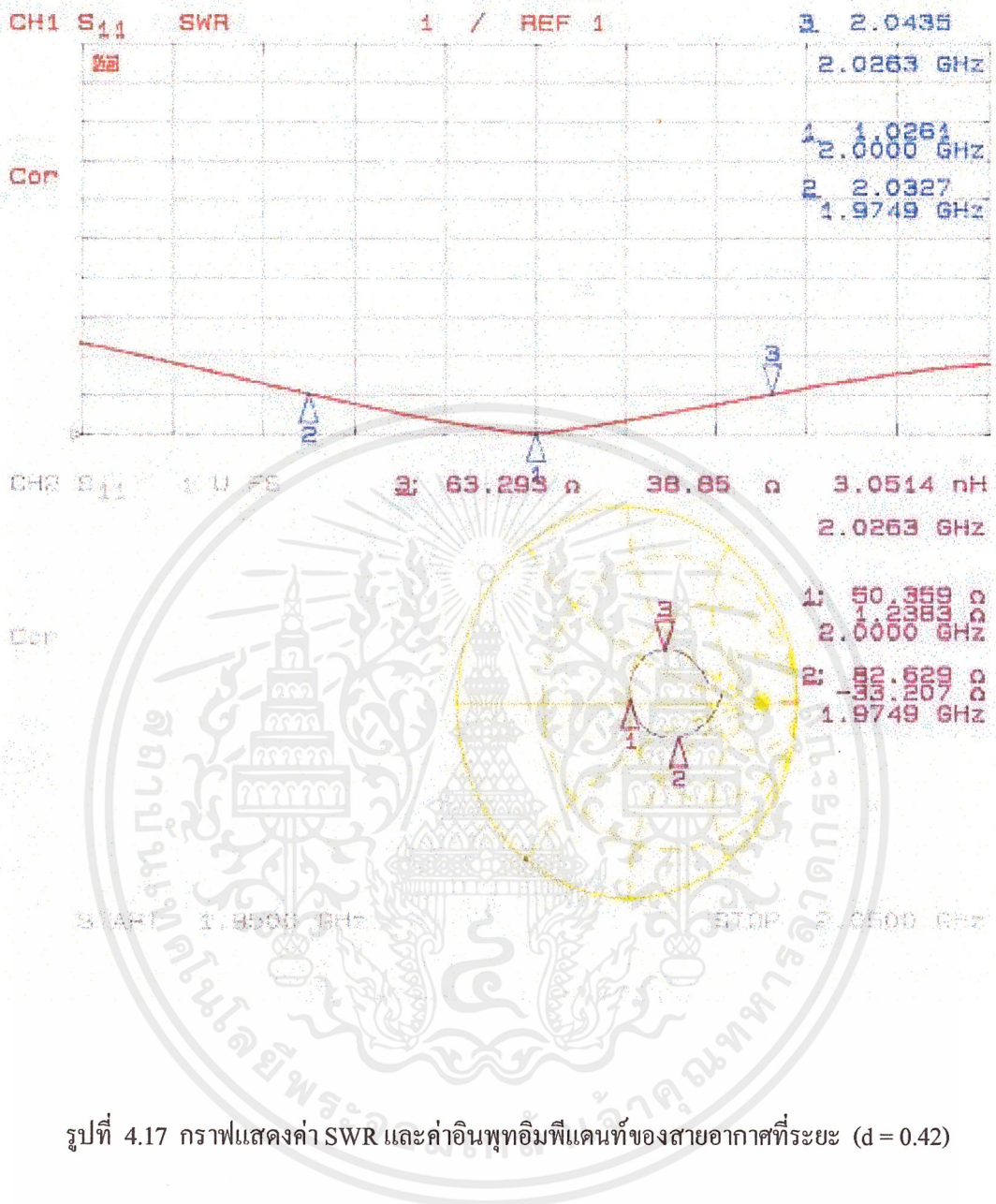
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่า SWR และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ระยะ ($d = 0.65$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



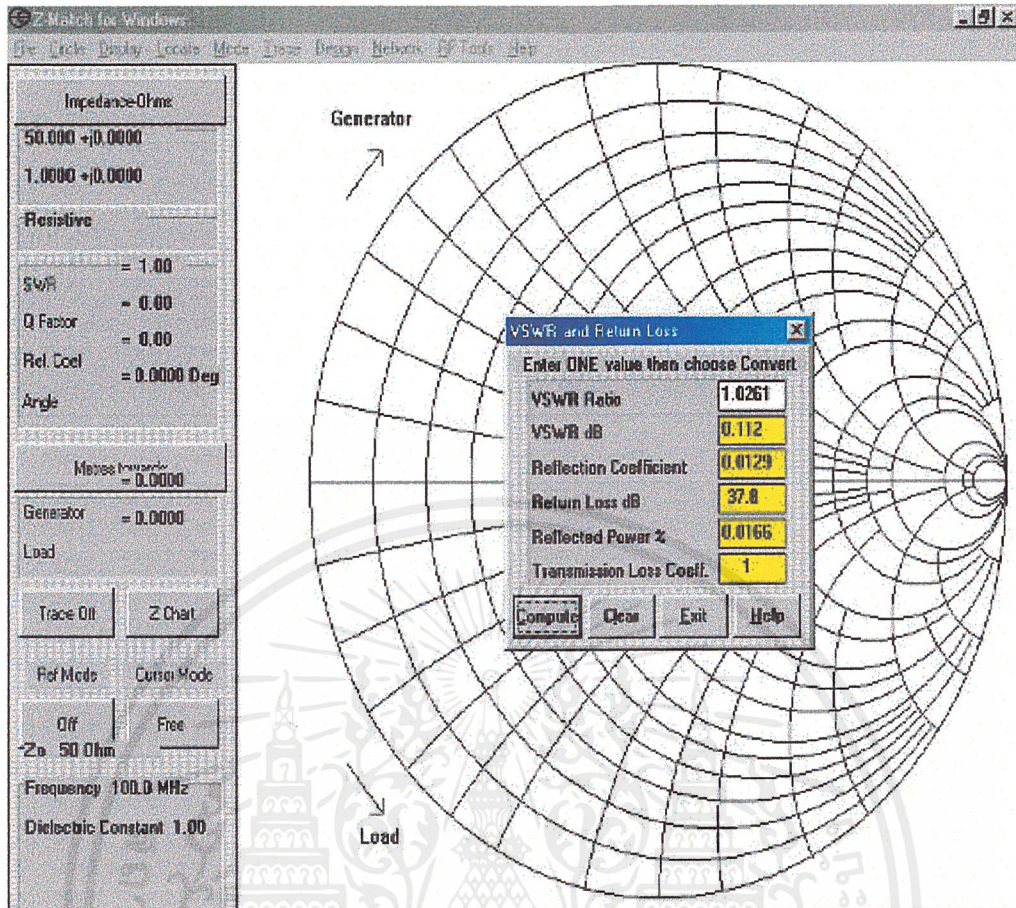
รูปที่ 4.16 แสดงผลสรุปของ SWR และค่า Return Loss ที่ระยะ $d = 0.65$ โดยใช้ Z-match

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่า SWR และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ระยะ (d = 0.42)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

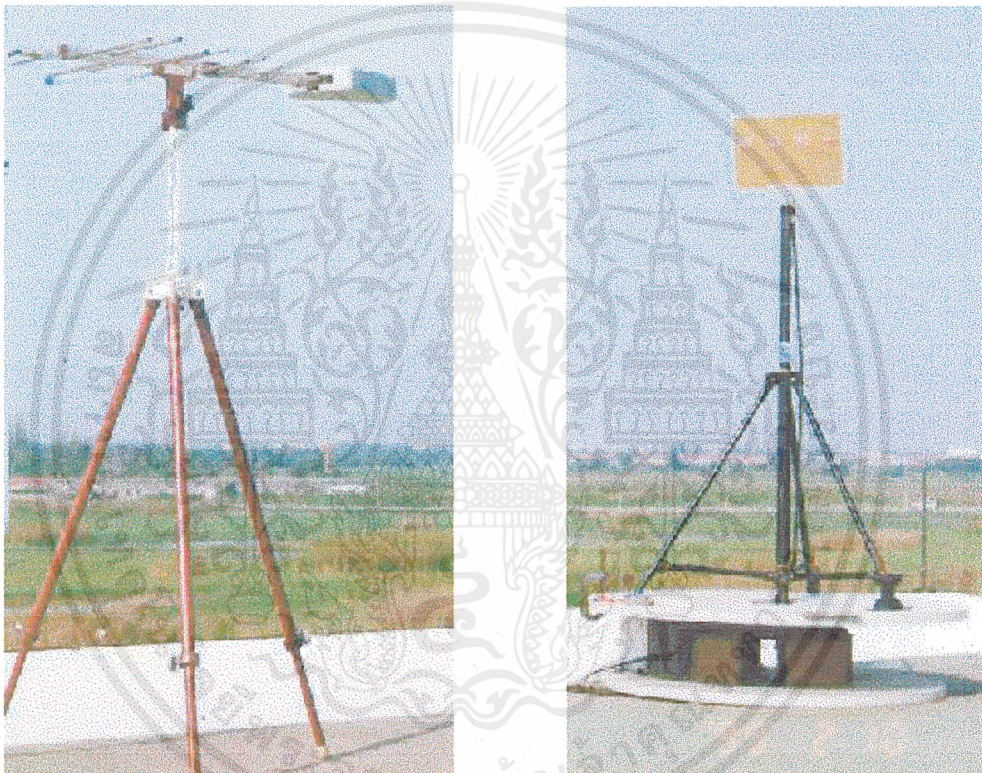


รูปที่ 4.18 แสดงผลสรุปของ SWR และค่า Return Loss ที่ระยะ $d = 0.42$ โดยใช้ Z-match

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

การจัดวางเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แสดงดังภาพที่ 4.19 ซึ่งได้ทดสอบบริเวณคาเฟ่ตึกสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สายอากาศส่ง เป็นสายอากาศ Log periodic Antenna ซึ่งจะมีตัวควบคุมการหมุน (ไม่ได้แสดงในภาพ) อยู่ในตัวอาคาร ชั้นถัดลงไป ตัวสายอากาศทดสอบต่อไปยังเครื่องรับต้องใช้สายนำสัญญาณยาวถึง 10 m ต่อเข้าเครื่องรับ ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer ไม่ได้แสดงในภาพ) รุ่น HP8566B



รูปที่ 4.19 แสดงภาคส่งสัญญาณ และ ภาครับสัญญาณ สายอากาศทดสอบ

ในการหาสนามระยะไกล (Far Field : R) ของสายอากาศเพื่อหาระยะทดสอบ (Test Range) ที่เหมาะสมจะหาจาก

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda_0}$$

เมื่อ D คือ มิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ

λ_0 คือ ความยาวคลื่นในอากาศที่ความถี่ 2 GHz

สนามระยะไกลของสายอากาศทดสอบ $R_s \geq 2.5$ m เมื่อ $D_s = 45.5$ cm

(มิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศทดสอบ (D_s) วัดในแนวทแยงมุม)

ระยะทดสอบที่น้อยที่สุดที่สามารถทำการทดสอบได้ Minimum Test Range ก็คือ สนามระยะไกลที่มีค่ามากที่สุดของสายอากาศส่งหรือรับในตัวหนึ่ง ซึ่งในที่นี้ก็คือระยะ 2.5 m

ในการทดสอบนี้ใช้ระยะทดสอบ 2.5 m และอ่านค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ทุก ๆ 1 องศา เพื่อนำไปพล็อตกราฟซึ่งจะแสดงรูปแบบการแพร่กระจาย ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า และในระนาบสนามแม่เหล็ก จะแสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยซึ่งแสดงผลดังต่อไปนี้

การคำนวณหาเกน, โครเรคทีวิตีและประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริป

ในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ออกแบบใช้งานที่ความถี่ 2 GHz ซึ่งมีความยาวคลื่นเท่ากับ 0.15 เมตร และสายอากาศมีระยะ Far Field ที่ 2.5 เมตรซึ่งสามารถหาค่า Freespace Loss จากสมการ

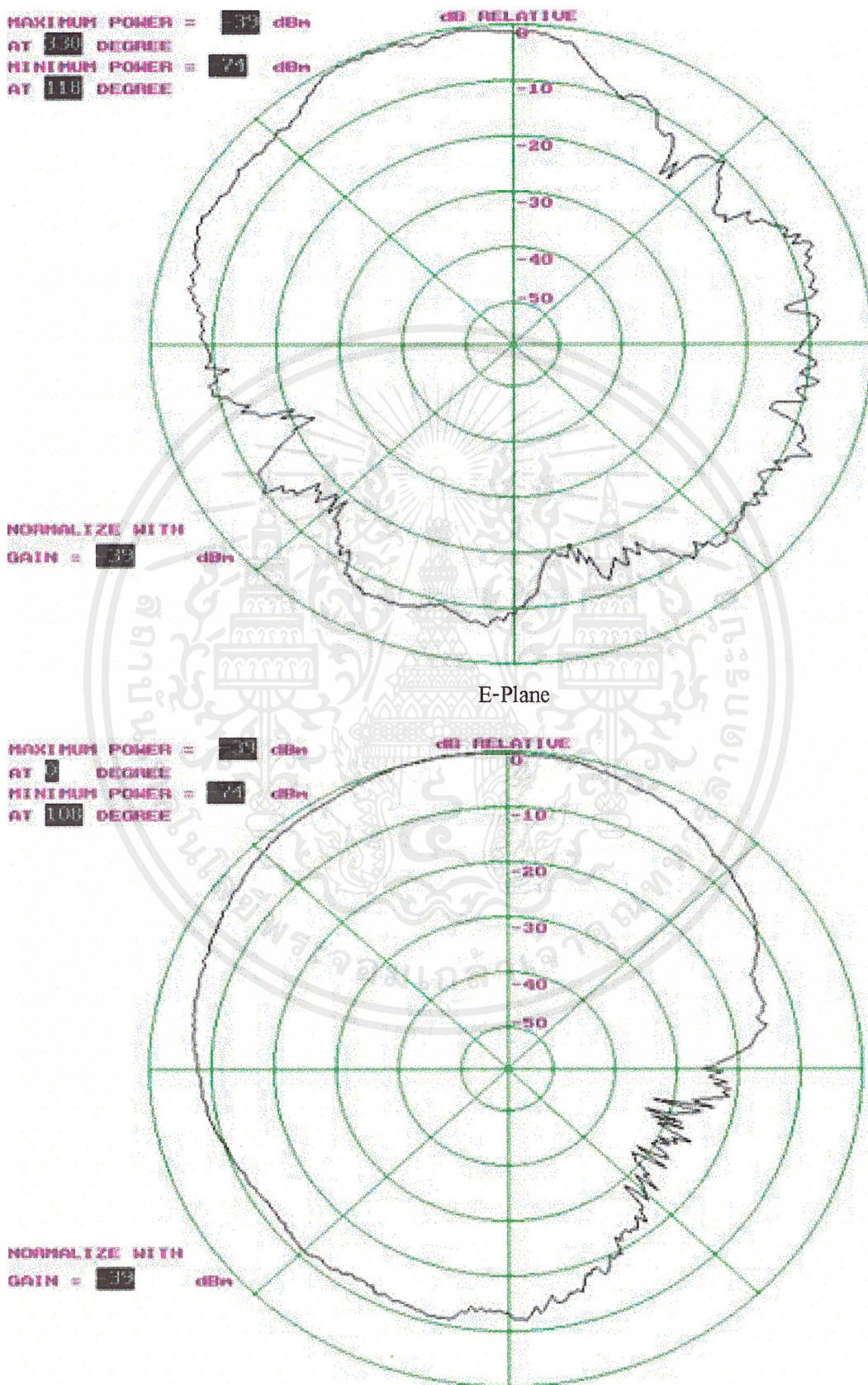
$$L_s = 20 \log \left[\frac{4\pi r}{\lambda} \right]$$

ซึ่งค่า Freespace Loss ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ

$$L_s = 46.4211 \text{ dB}$$

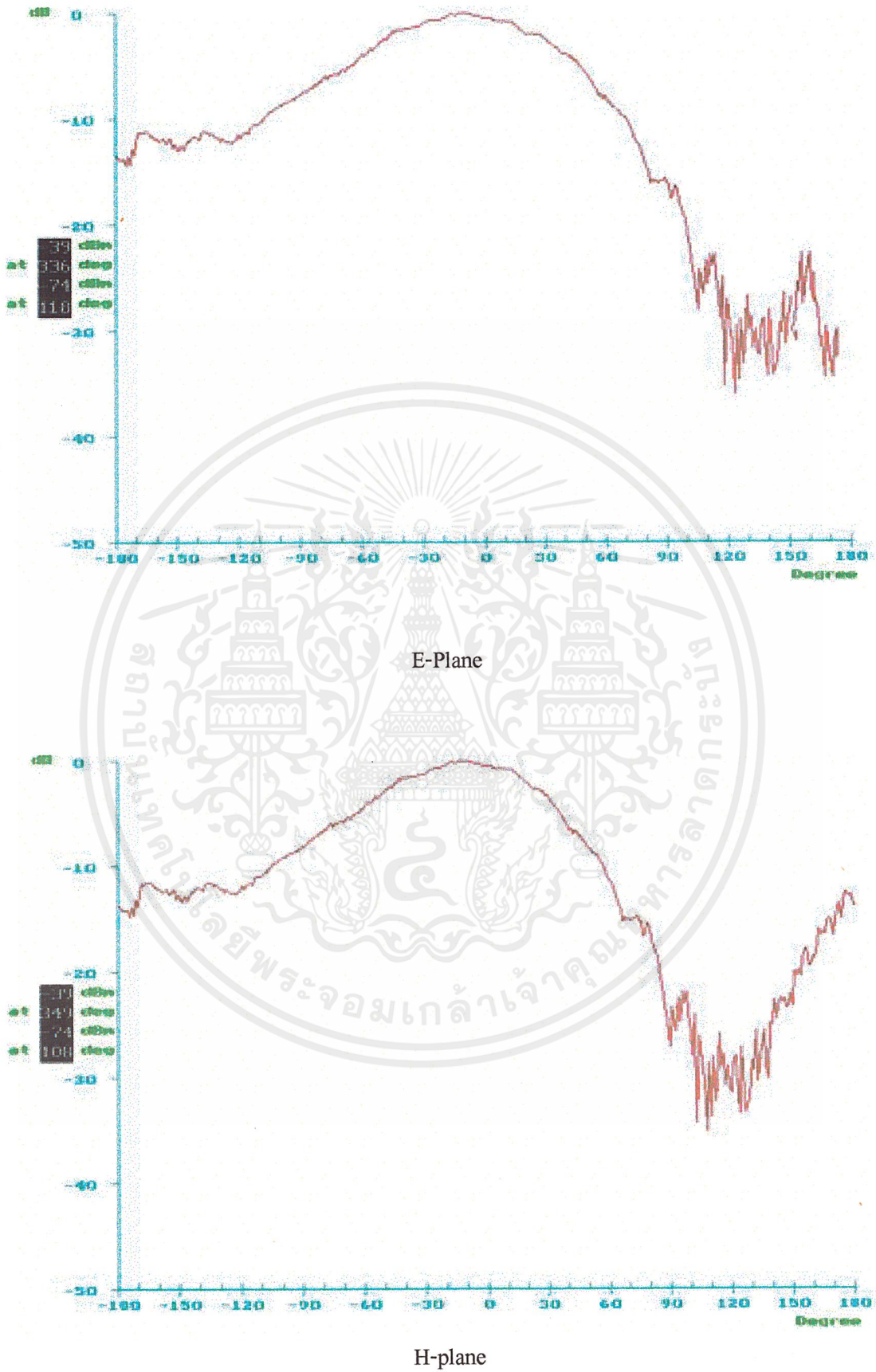
ในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นซึ่งสายอากาศทางด้านส่งกำหนดให้มีกำลังในการส่ง (P_t) มีค่าเท่ากับ 10 วัตต์ (10 dBm) ซึ่งมีเกน (Gt) เท่ากับ 8.5 dBi และมี Loss ในสายส่งทั้งทางด้านรับ (L_{f1}) และด้านส่ง (L_{f2}) มีค่าเท่ากับ 7 dBm

4.2.1 สายอากาศไมโครสตริป 1 เlemenต์



รูปที่ 4.20 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 1 เlemenต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกณฑ์จากการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสามารถคำนวณหาเกณฑ์ได้จากสมการ ดังนี้

$$G_r = P_r - P_t - G_t + L_s + L_{f1} + L_{f2}$$

เมื่อ คือ อัตราเพิ่มกำลังของสายอากาศรับ

P_r คือ กำลังที่รับได้ทางด้านรับ (-39 dBm)

P_t คือ กำลังส่งทางด้านส่ง (10 dBm)

G_t คือ อัตราเพิ่มกำลังทางด้านส่ง (8.5 dBi)

L_s คือ การสูญเสียพลังงานของคลื่นเมื่อส่งผ่านที่ว่างอิสระ (46.421 dB)

L_{f1} คือ การสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านส่ง (7 dBm)

L_{f2} คือ การสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านรับ (7 dBm)

ดังนั้นเกณฑ์ (G_r) ของสายอากาศที่เท่ากับ 2.921

จากการวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทำให้ทราบค่าบีมวิทท์ (Beam Width) ของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กจากรูปที่ 4.21 สามารถหา ไคเรคตีวิตี (D) ดังสมการ

$$D = 10 \log \left[\frac{41253}{\theta_E \theta_H} \right]$$

เมื่อ

θ_E คือ HPBW ในระนาบของสนามไฟฟ้า เท่ากับ 90 องศา

θ_H คือ HPBW ในระนาบของสนามแม่เหล็ก เท่ากับ 80 องศา

D คือ ไคเรคตีวิตี

จากค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทท์ (HPBW) ในระนาบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากรูปที่ 4.21 ดังนั้นจะได้ค่าไคเรคตีวิตีเท่ากับ 7.581 dB

เมื่อทราบค่าไคเรคตีวิตี และ เกณฑ์ของสายอากาศแล้วสามารถจะหาประสิทธิภาพของสายอากาศได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta = \left(\frac{G}{D} \right) \times 100$$

เมื่อ

G คืออัตราขยายของสายอากาศ

D คือ ไคเรคตีวิตี

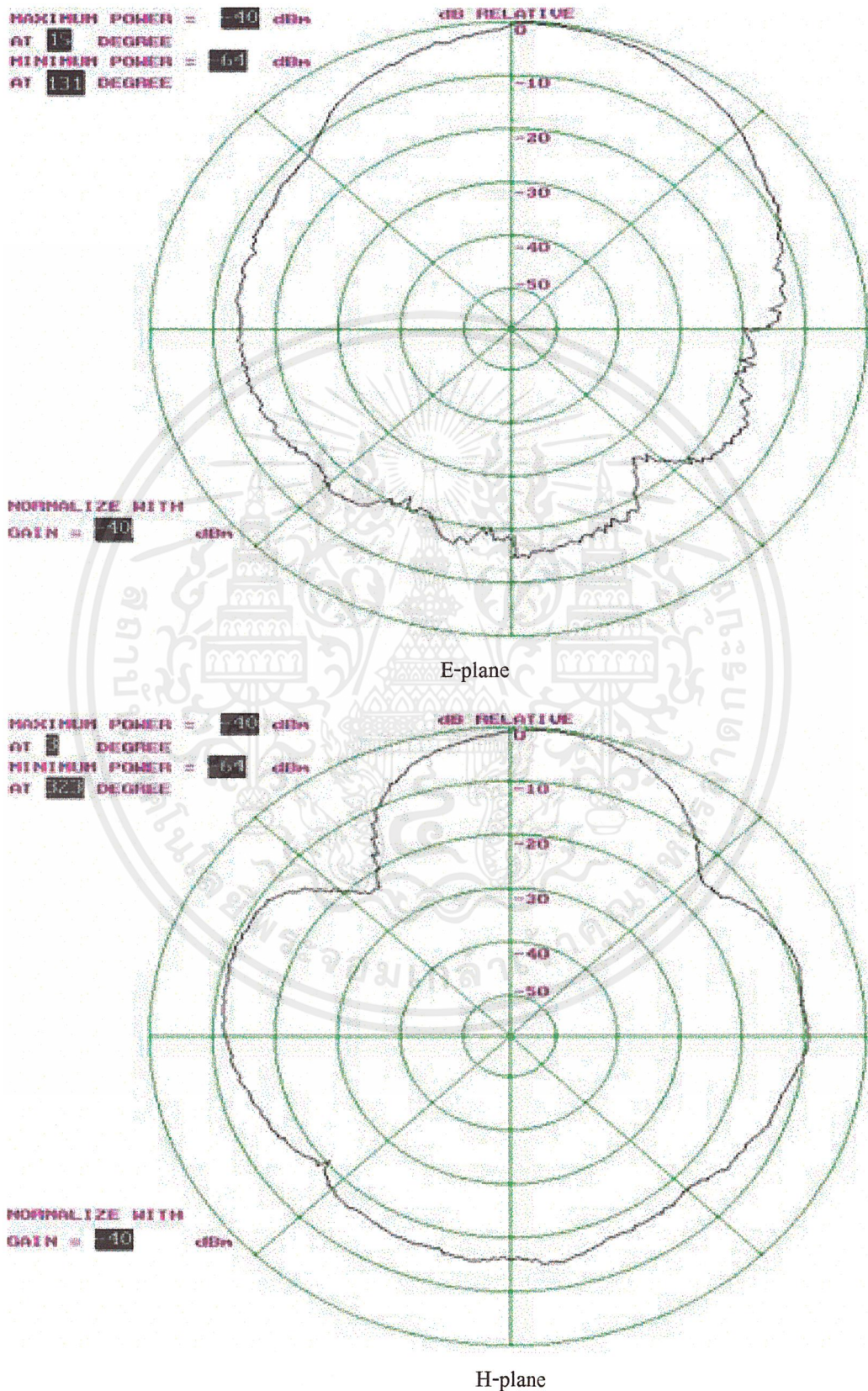
η คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ดังนั้นประสิทธิภาพของสายอากาศที่ได้เท่ากับ 50.98 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

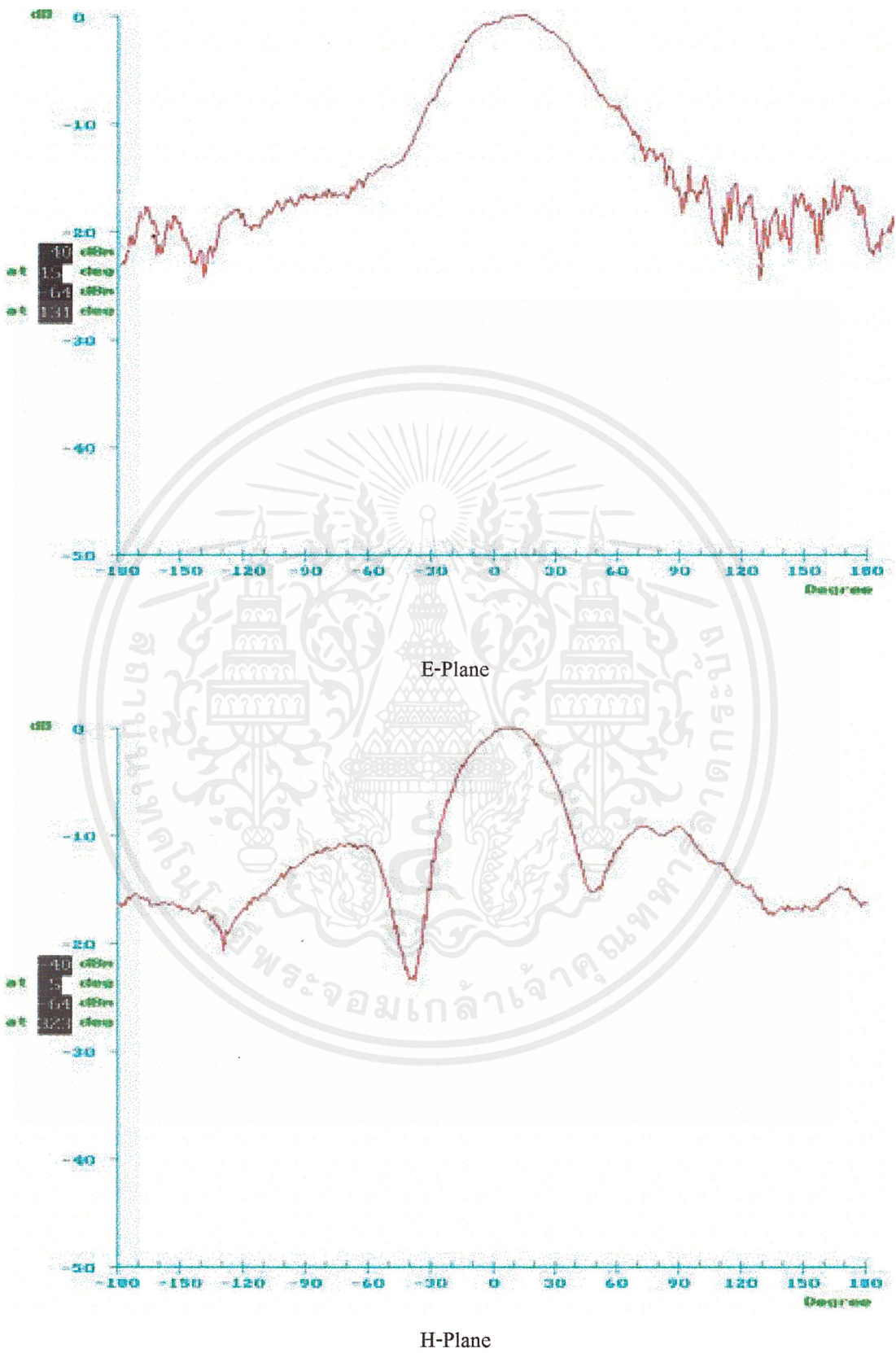
4.2.2 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอลเมนต์

4.2.2.1 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอลเมนต์ ที่ระยะ $d = 0.75$



รูปที่ 4.22 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 2 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 2 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกณฑ์การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสามารถคำนวณหาเกณฑ์ได้จากสมการ ดังนี้

$$G_r = P_r - P_t - G_t + L_s + L_{f1} + L_{f2}$$

เมื่อ คือ อัตราเพิ่มกำลังของสายอากาศรับ

P_r คือ กำลังที่รับได้ทางด้านรับ (-40 dBm)

P_t คือ กำลังส่งทางด้านส่ง (10 dBm)

G_t คือ อัตราเพิ่มกำลังทางด้านส่ง(8.5 dBi)

L_s คือ การสูญเสียพลังงานของคลื่นเมื่อส่งผ่านที่ว่างอิสระ(46.421 dB)

L_{f1} คือ การสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านส่ง (7 dBm)

L_{f2} คือ การสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านรับ (7 dBm)

ดังนั้นเกณฑ์ (G_r) ของสายอากาศที่เท่ากับ 1.921

จากการวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทำให้ทราบค่าบีมวิดท์ (Beam Width) ของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กจากรูปที่ 4.23 สามารถหา ไคเรคตีวิตี (D) ดังสมการ

$$D = 10 \log \left[\frac{41253}{\theta_E \theta_H} \right]$$

เมื่อ

θ_E คือ HPBW ในระนาบของสนามไฟฟ้า เท่ากับ 58 องศา

θ_H คือ HPBW ในระนาบของสนามแม่เหล็ก เท่ากับ 40 องศา

D คือ ไคเรคตีวิตี

จากค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (HPBW) ในระนาบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.23 ดังนั้นจะได้ค่าไคเรคตีวิตีเท่ากับ 12.499 dB

เมื่อทราบค่าไคเรคตีวิตี และ เกณฑ์ของสายอากาศแล้วสามารถจะหาประสิทธิภาพของสายอากาศได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta = \left(\frac{G}{D} \right) \times 100$$

เมื่อ

G คืออัตราขยายของสายอากาศ

D คือ ไคเรคตีวิตี

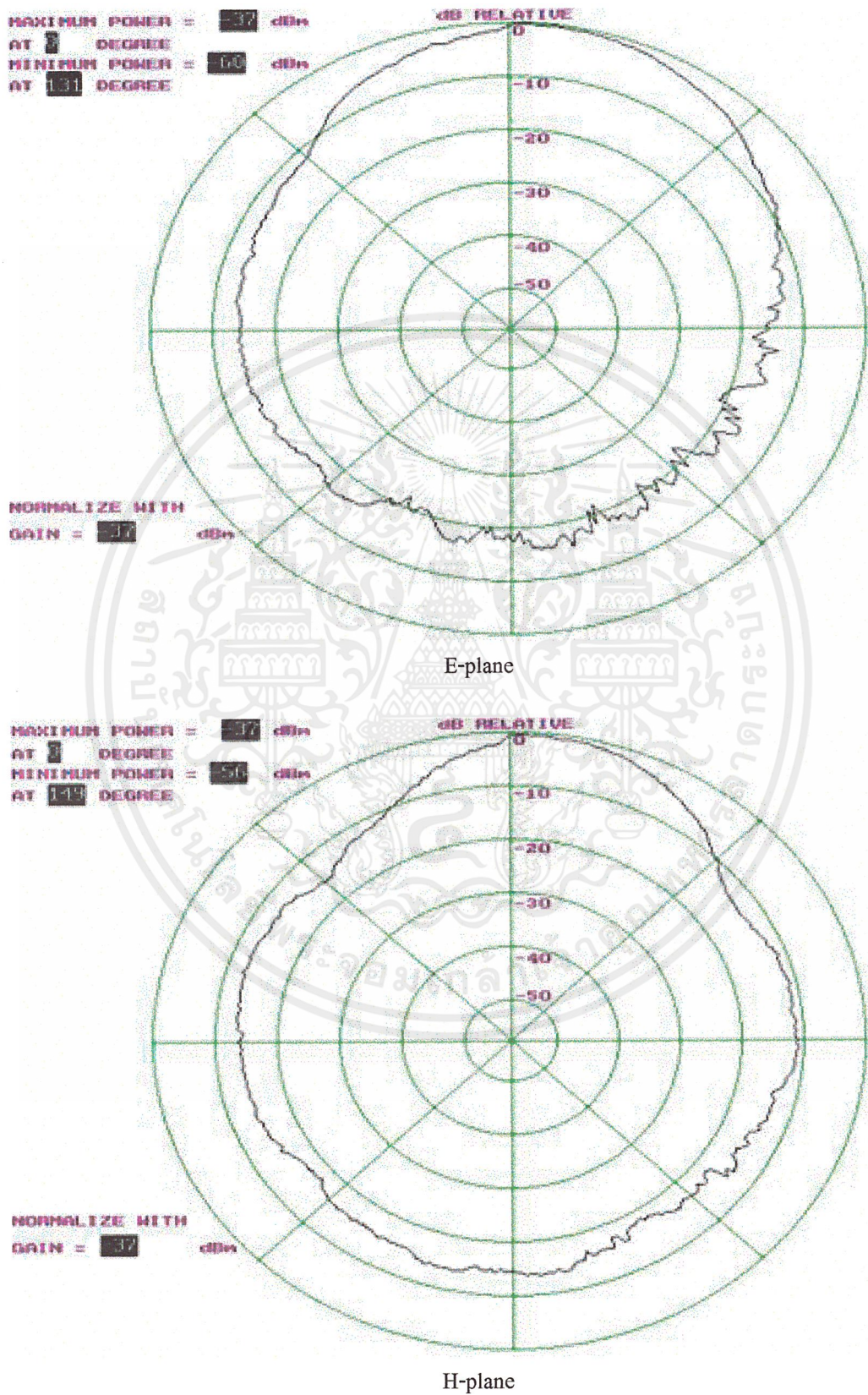
η คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ดังนั้นประสิทธิภาพของสายอากาศที่ได้เท่ากับ 10.804 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

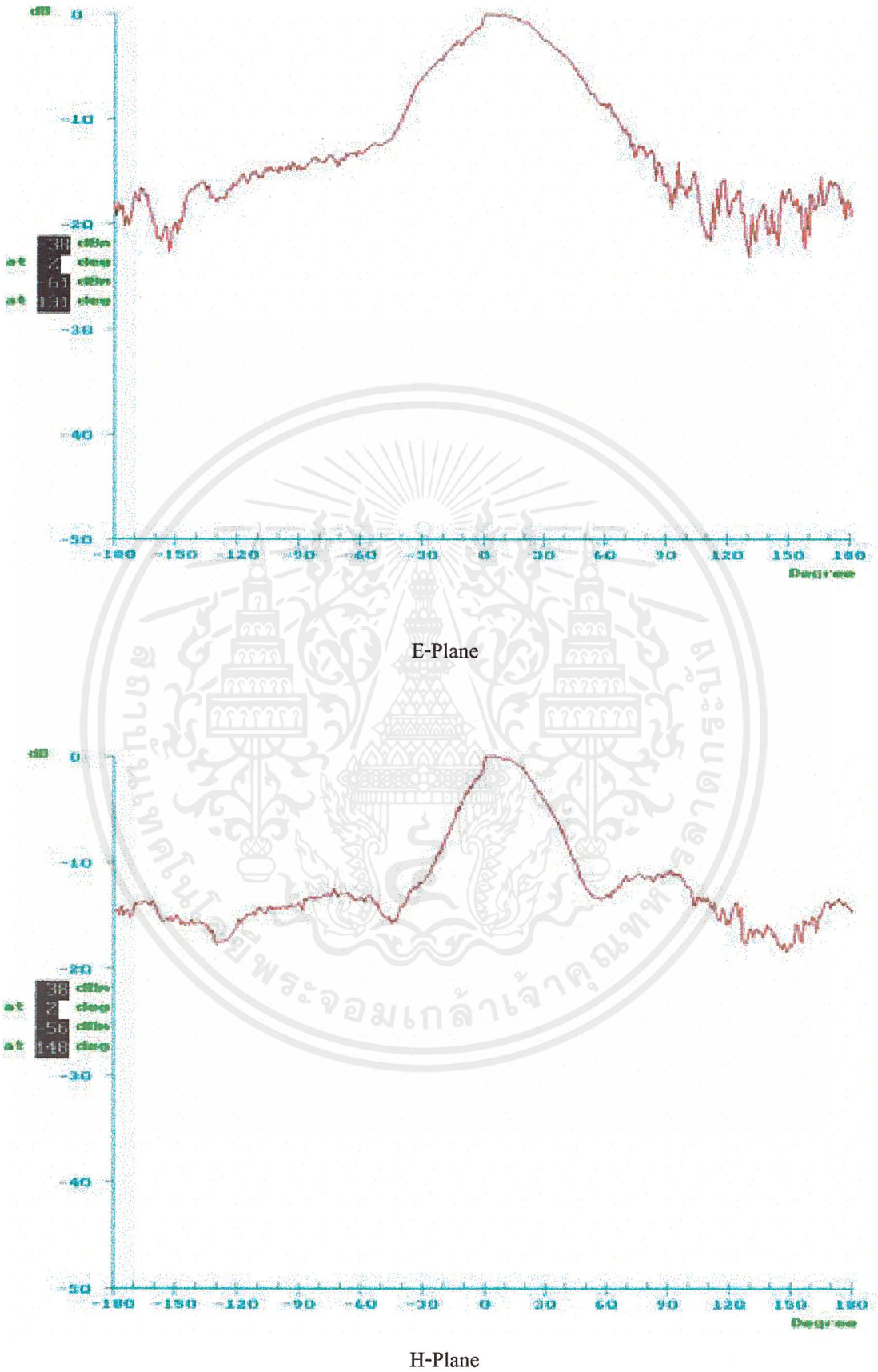
4.2.2 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เlemenต์

4.2.2.2 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เlemenต์ ที่ระยะ $d = 0.65$



รูปที่ 4.24 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 2 เlemenต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 2 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกณฑ์การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสามารถคำนวณหาเกณฑ์ได้จากสมการ ดังนี้

$$G_r = P_r - P_t - G_t + L_s + L_{f1} + L_{f2}$$

เมื่อ คือ อัตราเพิ่มกำลังของสายอากาศรับ

P_r คือ กำลังที่รับได้ทางด้านรับ (-37 dBm)

P_t คือ กำลังส่งทางด้านส่ง (10 dBm)

G_t คือ อัตราเพิ่มกำลังทางด้านส่ง (8.5 dBi)

L_s คือ การสูญเสียพลังงานของคลื่นเมื่อส่งผ่านที่ว่างอิสระ (46.421 dB)

L_{f1} คือ การสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านส่ง (7 dBm)

L_{f2} คือ การสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านรับ (7 dBm)

ดังนั้นเกณฑ์ (G_r) ของสายอากาศที่เท่ากับ 4.921

จากการวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทำให้ทราบค่าบีมวิดท์ (Beam Width) ของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กจากรูปที่ 4.25 สามารถหา ไครคติวิตี (D) ดังสมการ

$$D = 10 \log \left[\frac{41253}{\theta_E \theta_H} \right]$$

เมื่อ

θ_E คือ HPBW ในระนาบของสนามไฟฟ้า เท่ากับ 58 องศา

θ_H คือ HPBW ในระนาบของสนามแม่เหล็ก เท่ากับ 42 องศา

D คือ ไครคติวิตี

จากค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (HPBW) ในระนาบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.25 ดังนั้นจะได้ค่าไครคติวิตีเท่ากับ 12.287 dB

เมื่อทราบค่าไครคติวิตี และ เกณฑ์ของสายอากาศแล้วสามารถจะหาประสิทธิภาพของสายอากาศได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta = \left(\frac{G}{D} \right) \times 100$$

เมื่อ

G คือ อัตราขยายของสายอากาศ

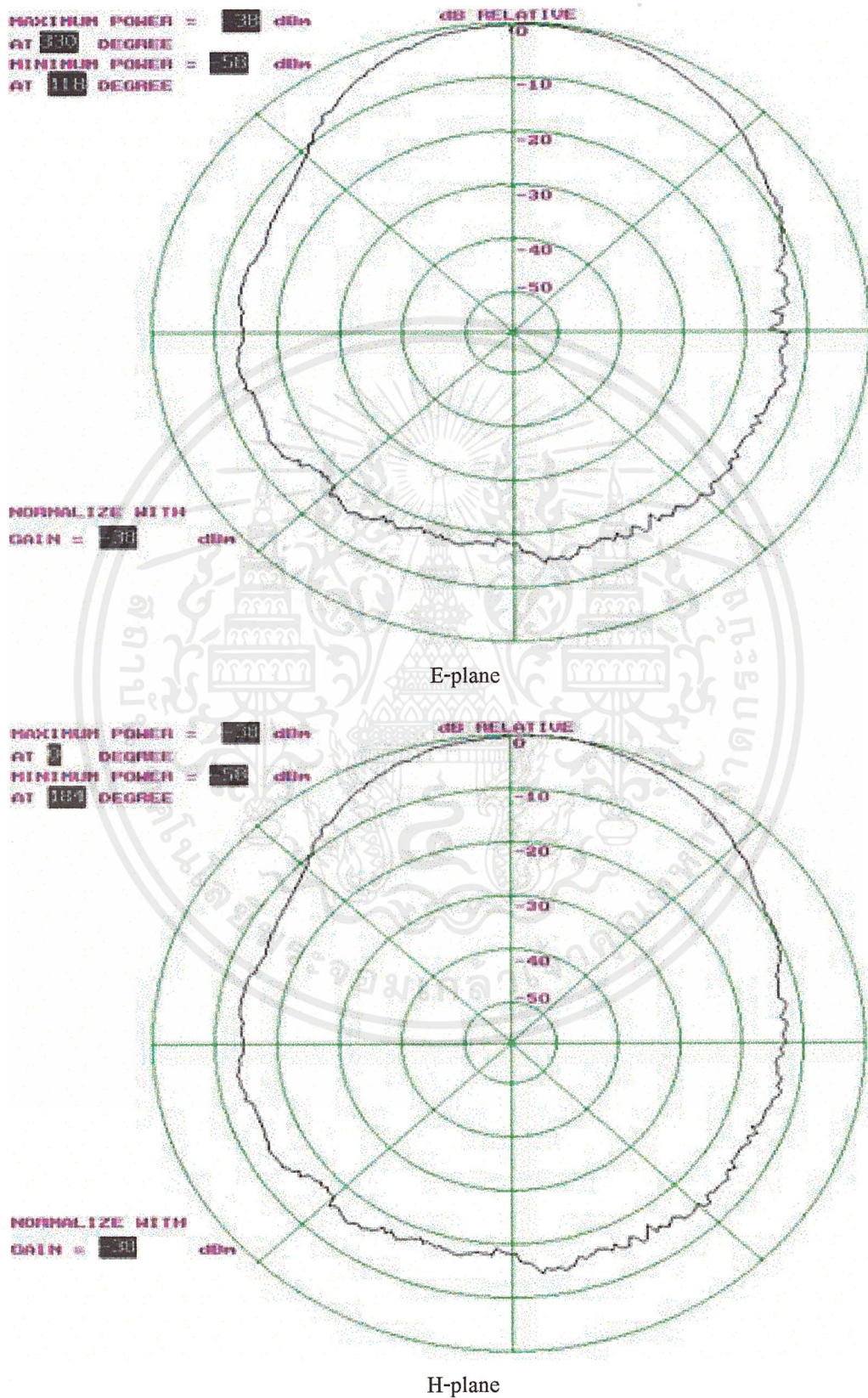
D คือ ไครคติวิตี

η คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ดังนั้นประสิทธิภาพของสายอากาศที่ได้เท่ากับ 29.059 %

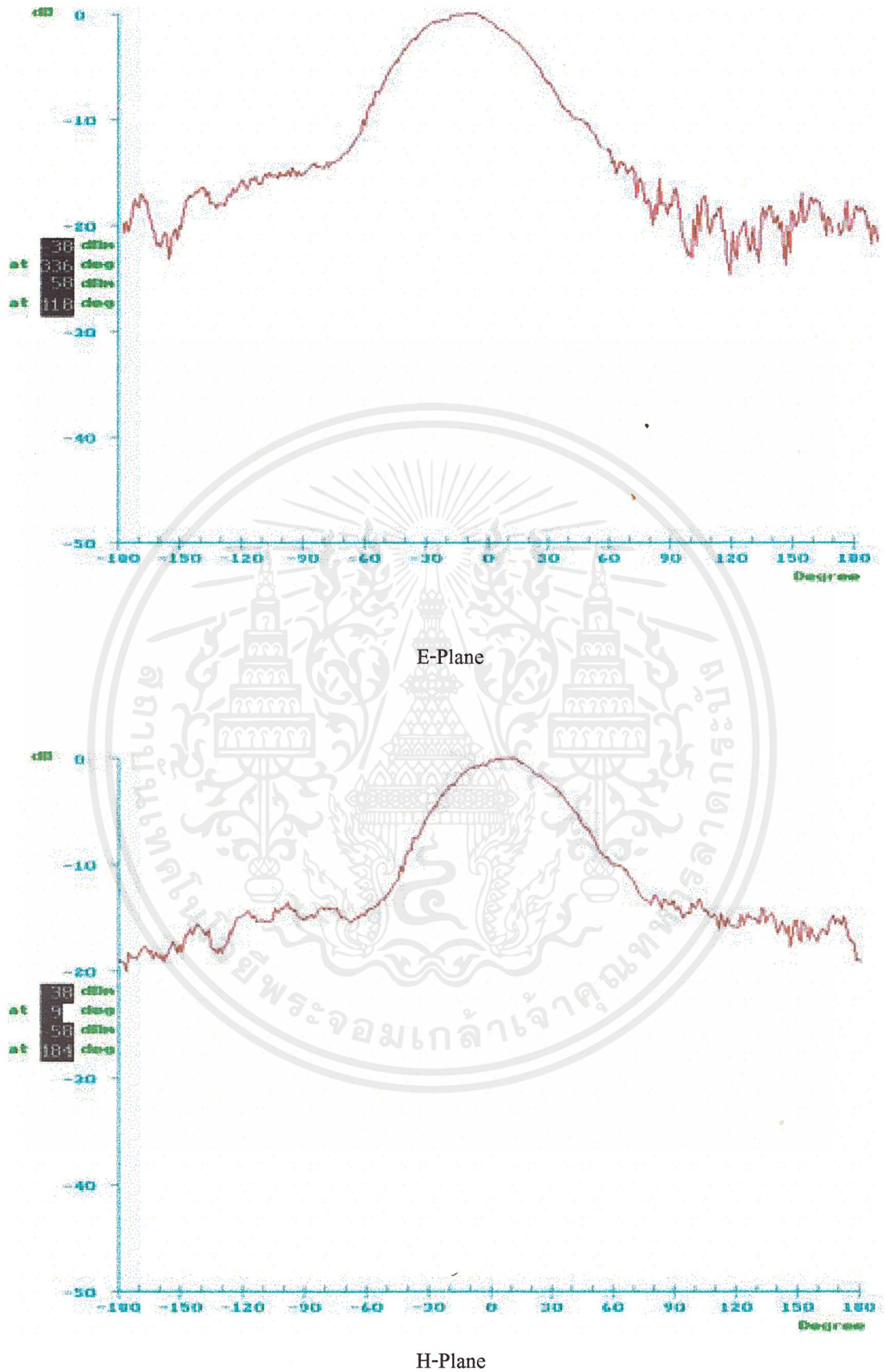
4.2.2 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอลเมนต์

4.2.2.3 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอลเมนต์ ที่ระยะ $d=0.5$



รูปที่ 4.26 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 2 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 2 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกณฑ์การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสามารถคำนวณหาเกณฑ์ได้จากสมการ ดังนี้

$$G_r = P_r - P_t - G_t + L_s + L_{f1} + L_{f2}$$

เมื่อ คือ อัตราเพิ่มกำลังของสายอากาศรับ

P_r คือ กำลังที่รับได้ทางด้านรับ (-38 dBm)

P_t คือ กำลังส่งทางด้านส่ง (10 dBm)

G_t คือ อัตราเพิ่มกำลังทางด้านส่ง (8.5 dBi)

L_s คือ การสูญเสียพลังงานของคลื่นเมื่อส่งผ่านที่ว่างอิสระ (46.421 dB)

L_{f1} คือ การสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านส่ง (7 dBm)

L_{f2} คือ การสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านรับ (7 dBm)

ดังนั้นเกณฑ์ (G_r) ของสายอากาศที่เท่ากับ 3.921

จากการวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทำให้ทราบค่าบีมวิทท์ (Beam Width) ของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กจากรูปที่ 4.27 สามารถหา ไครเรคตีวิตี (D) ดังสมการ

$$D = 10 \log \left[\frac{41253}{\theta_E \theta_H} \right]$$

เมื่อ

θ_E คือ HPBW ในระนาบของสนามไฟฟ้า เท่ากับ 60 องศา

θ_H คือ HPBW ในระนาบของสนามแม่เหล็ก เท่ากับ 58 องศา

D คือ ไครเรคตีวิตี

จากค่าฮาร์ฟเพนเวอร์บีมวิทท์ (HPBW) ในระนาบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.27 ดังนั้นจะได้ค่าไครเรคตีวิตีเท่ากับ 10.738 dB

เมื่อทราบค่าไครเรคตีวิตี และ เกณฑ์ของสายอากาศแล้วสามารถจะหาประสิทธิภาพของสายอากาศได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta = \left(\frac{G}{D} \right) \times 100$$

เมื่อ

G คือ อัตราขยายของสายอากาศ

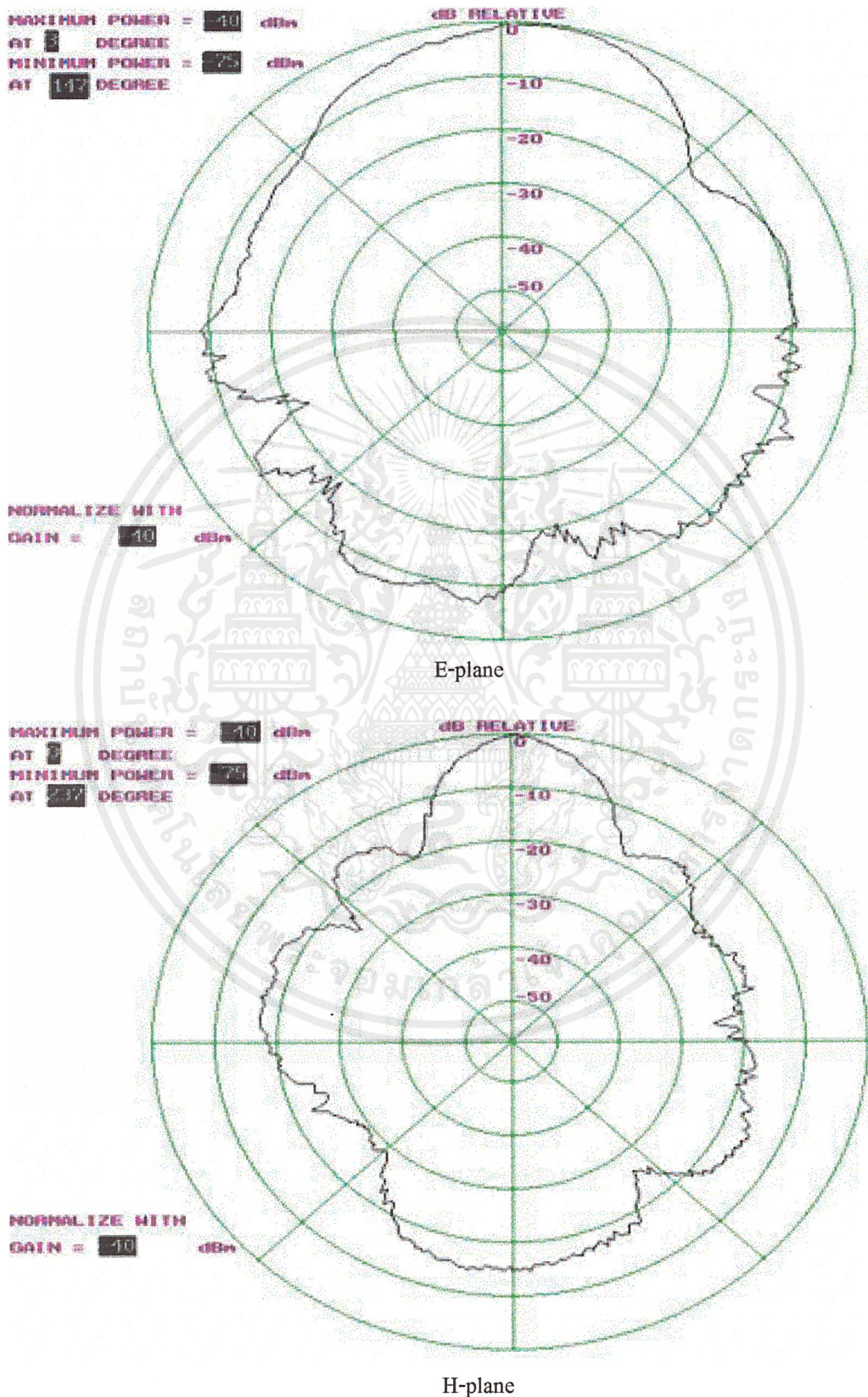
D คือ ไครเรคตีวิตี

η คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ดังนั้นประสิทธิภาพของสายอากาศที่ได้เท่ากับ 33.0780 %

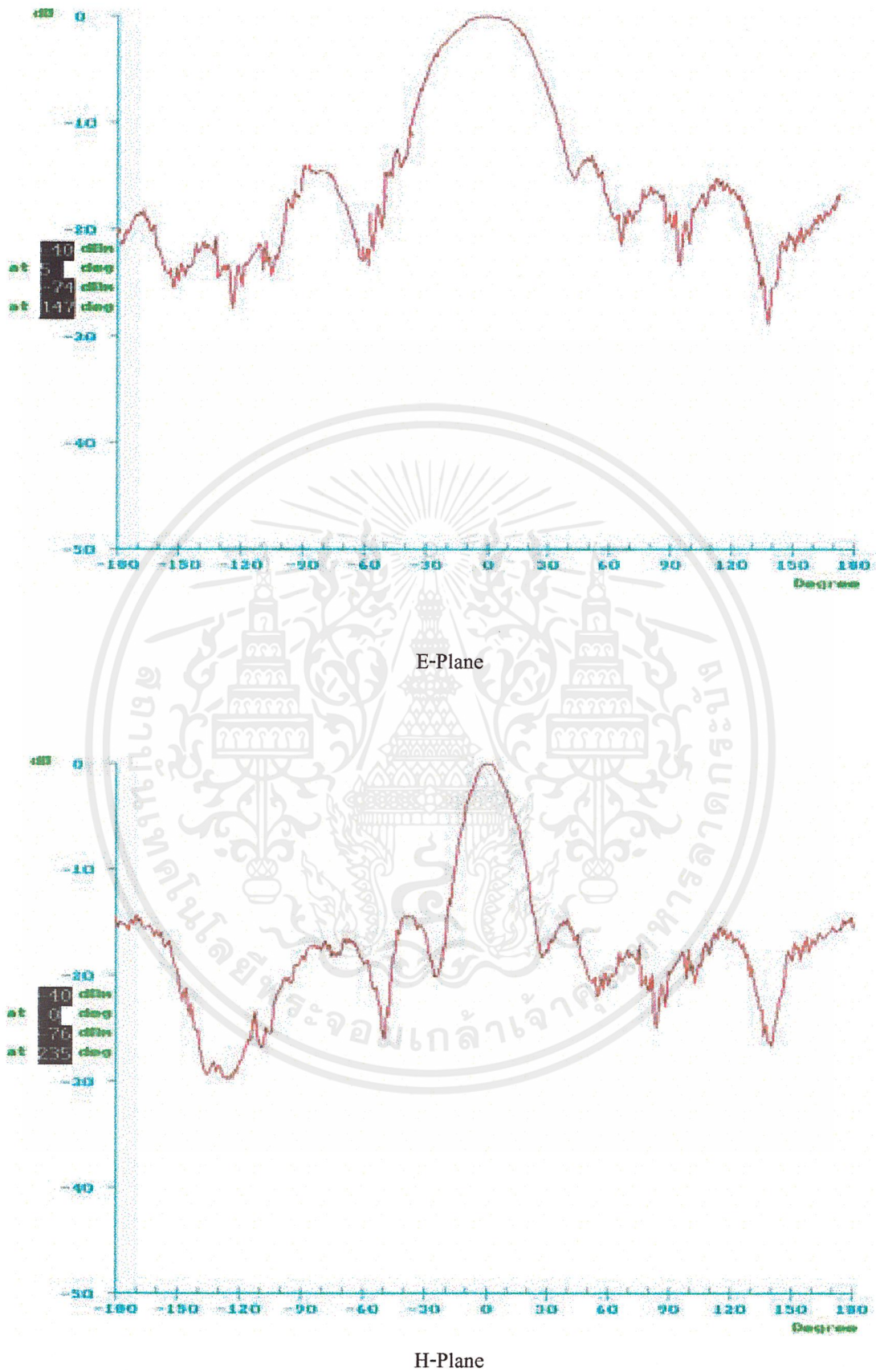
4.2.3 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เlemenต์

4.2.3.1 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เlemenต์ ที่ระยะ $d = 0.65$



รูปที่ 4.28 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 4 เlemenต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 4 เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกณฑ์การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสามารถคำนวณหาเกณฑ์ได้จากสมการ ดังนี้

$$G_r = P_r - P_t - G_t + L_s + L_{f1} + L_{f2}$$

เมื่อ คือ อัตราเพิ่มกำลังของสายอากาศรับ

P_r คือ กำลังที่รับได้ทางด้านรับ (-40 dBm)

P_t คือ กำลังส่งทางด้านส่ง (10 dBm)

G_t คือ อัตราเพิ่มกำลังทางด้านส่ง(8.5 dBi)

L_s คือ การสูญเสียพลังงานของคลื่นเมื่อส่งผ่านที่ว่างอิสระ(46.421 dB)

L_{f1} คือ การสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านส่ง (7 dBm)

L_{f2} คือ การสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านรับ (7 dBm)

ดังนั้นเกณฑ์ (G_r) ของสายอากาศที่เท่ากับ 1.921

จากการวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทำให้ทราบค่าบีมวิดท์ (Beam Width) ของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กจากรูปที่ 4.29 สามารถหา ไครเรคตีวิตี (D) ดังสมการ

$$D = 10 \log \left[\frac{41253}{\theta_E \theta_H} \right]$$

เมื่อ

θ_E คือ HPBW ในระนาบของสนามไฟฟ้า เท่ากับ 56 องศา

θ_H คือ HPBW ในระนาบของสนามแม่เหล็ก เท่ากับ 28 องศา

D คือ ไครเรคตีวิตี

จากค่าอาร์พีเพาเวอร์บีมวิดท์ (HPBW) ในระนาบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.29 ดังนั้นจะได้ค่าไครเรคตีวิตีเท่ากับ 14.201 dB

เมื่อทราบค่าไครเรคตีวิตี และ เกณฑ์ของสายอากาศแล้วสามารถจะหาประสิทธิภาพของสายอากาศได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta = \left(\frac{G}{D} \right) \times 100$$

เมื่อ

G คืออัตราขยายของสายอากาศ

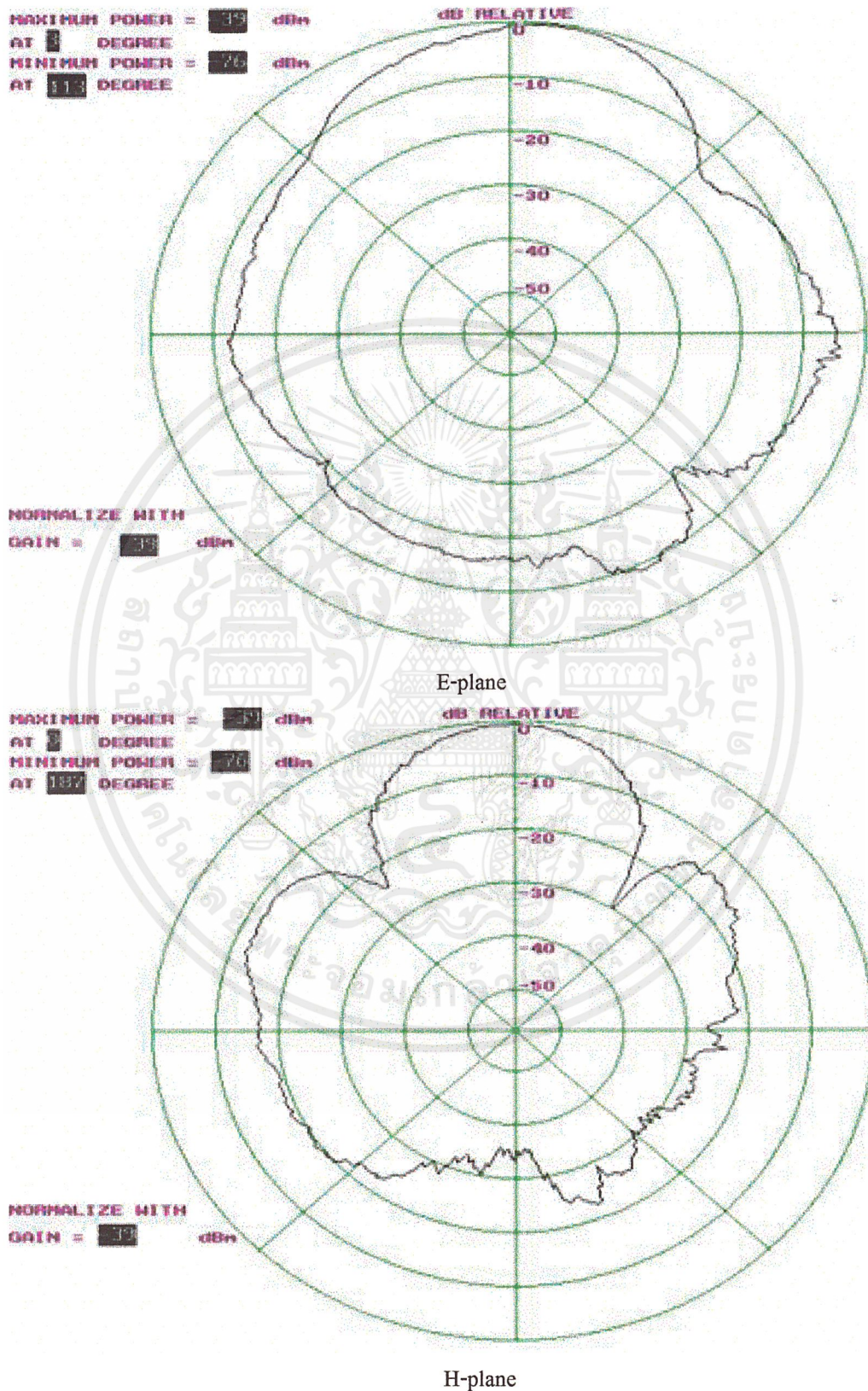
D คือ ไครเรคตีวิตี

η คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ

ดังนั้นประสิทธิภาพของสายอากาศที่ได้เท่ากับ 7.302 %

4.2.3 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลเมนต์

4.2.3.2 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลเมนต์ ที่ระยะ $d = 0.42$



รูปที่ 4.30 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป 4 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกณฑ์การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสามารถคำนวณหาเกณฑ์ได้จากสมการ ดังนี้

$$G_r = P_r - P_t - G_t + L_s + L_{f1} + L_{f2}$$

เมื่อ คือ อัตราเพิ่มกำลังของสายอากาศรับ

P_r คือ กำลังที่รับได้ทางด้านรับ (-39 dBm)

P_t คือ กำลังส่งทางด้านส่ง (10 dBm)

G_t คือ อัตราเพิ่มกำลังทางด้านส่ง(8.5 dBi)

L_s คือ การสูญเสียพลังงานของคลื่นเมื่อส่งผ่านที่ว่างอิสระ(46.421 dB)

L_{f1} คือ การสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านส่ง (7 dBm)

L_{f2} คือ การสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านรับ (7 dBm)

ดังนั้นเกณฑ์ (G_r) ของสายอากาศที่เท่ากับ 2.921

จากการวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทำให้ทราบค่าบีมวิทท์ (Beam Width) ของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กจากรูปที่ 4.31 สามารถหา ไครเรคตีวิตี (D) ดังสมการ

$$D = 10 \log \left[\frac{41253}{\theta_E \theta_H} \right]$$

เมื่อ

θ_E คือ HPBW ในระนาบของสนามไฟฟ้า เท่ากับ 58 องศา

θ_H คือ HPBW ในระนาบของสนามแม่เหล็ก เท่ากับ 38 องศา

D คือ ไครเรคตีวิตี

จากค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิทท์ (HPBW) ในระนาบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.31 ดังนั้นจะได้ค่าไครเรคตีวิตีเท่ากับ 12.722 dB

เมื่อทราบค่าไครเรคตีวิตี และ เกณฑ์ของสายอากาศแล้วสามารถจะหาประสิทธิภาพของสายอากาศได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta = \left(\frac{G}{D} \right) \times 100$$

เมื่อ

G คืออัตรายายของสายอากาศ

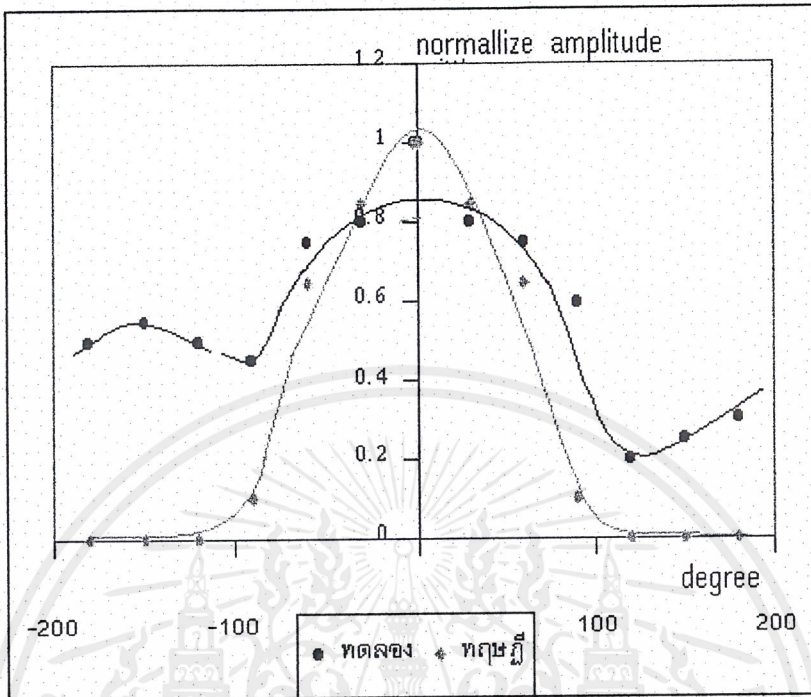
D คือ ไครเรคตีวิตี

η คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ

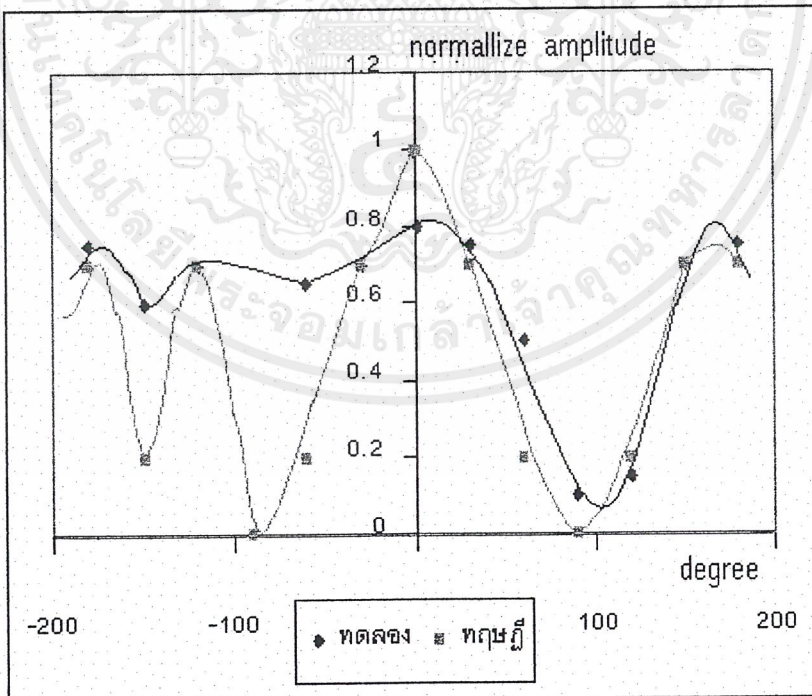
ดังนั้นประสิทธิภาพของสายอากาศที่ได้เท่ากับ 15.606 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นเมื่อเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี



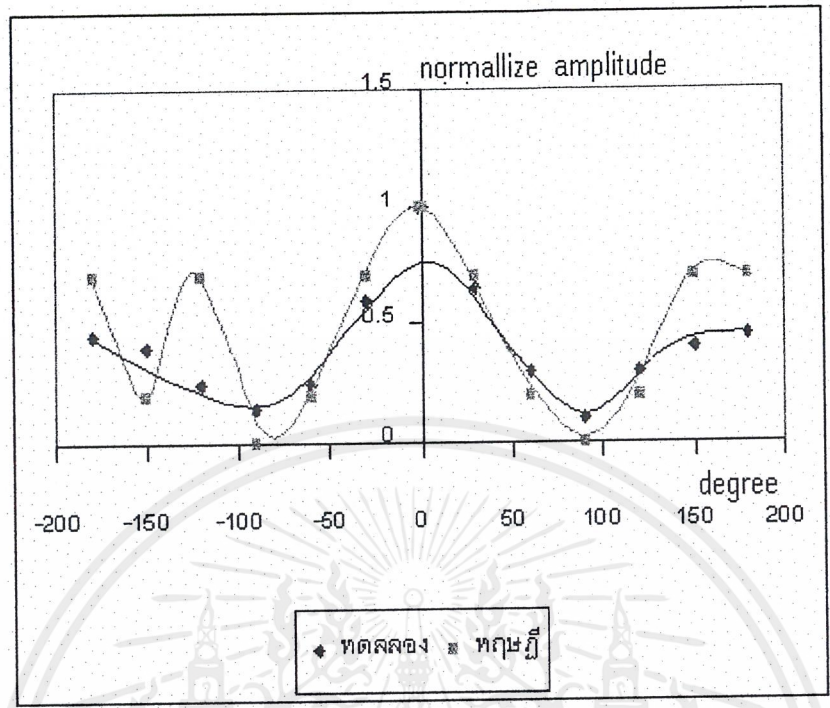
E-plane



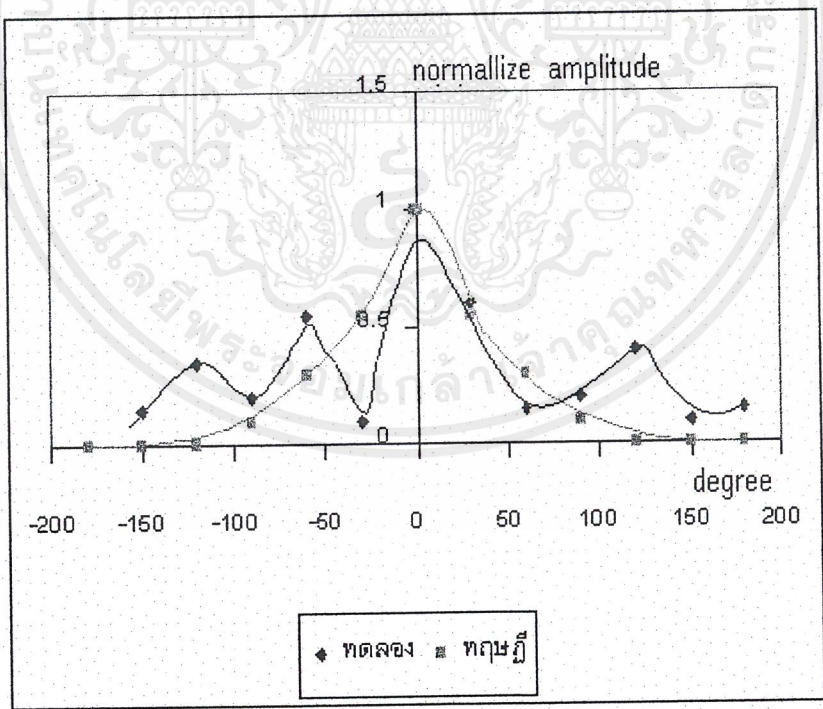
H-plane

รูปที่ 4.32 สายอากาศไมโครสตริป 1 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



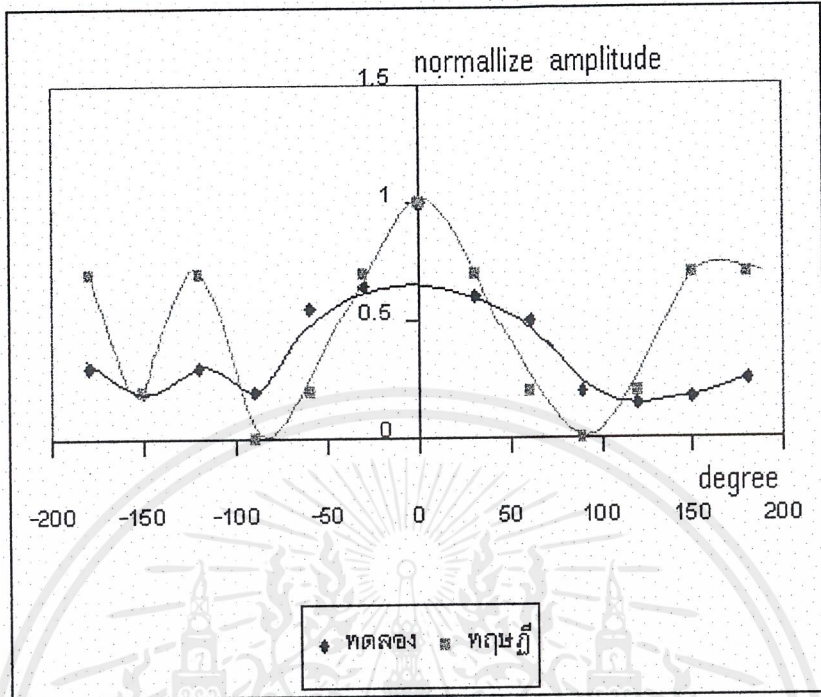
E-plane



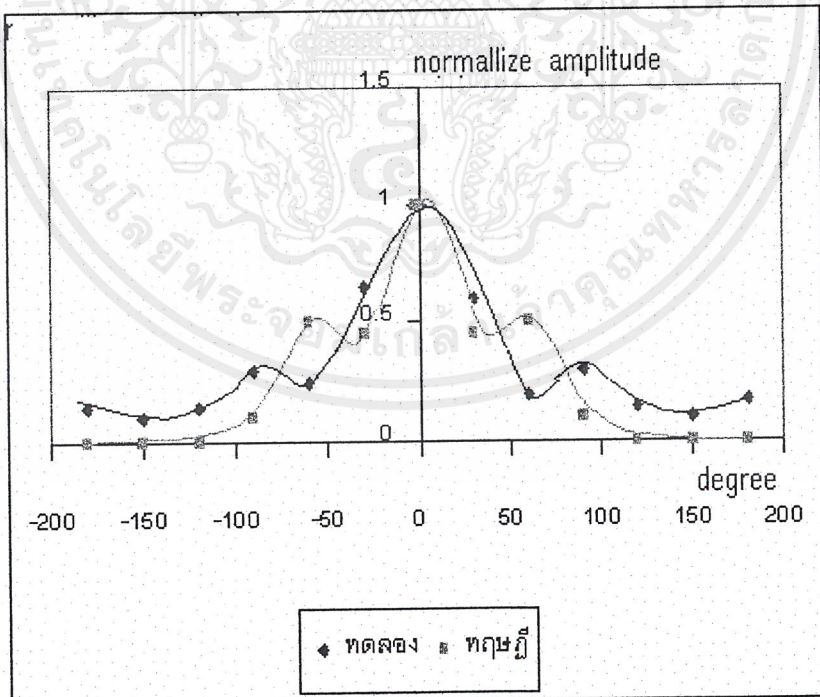
H-plane

รูปที่ 4.33 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เlemenที่ระยะ $d = 0.75$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



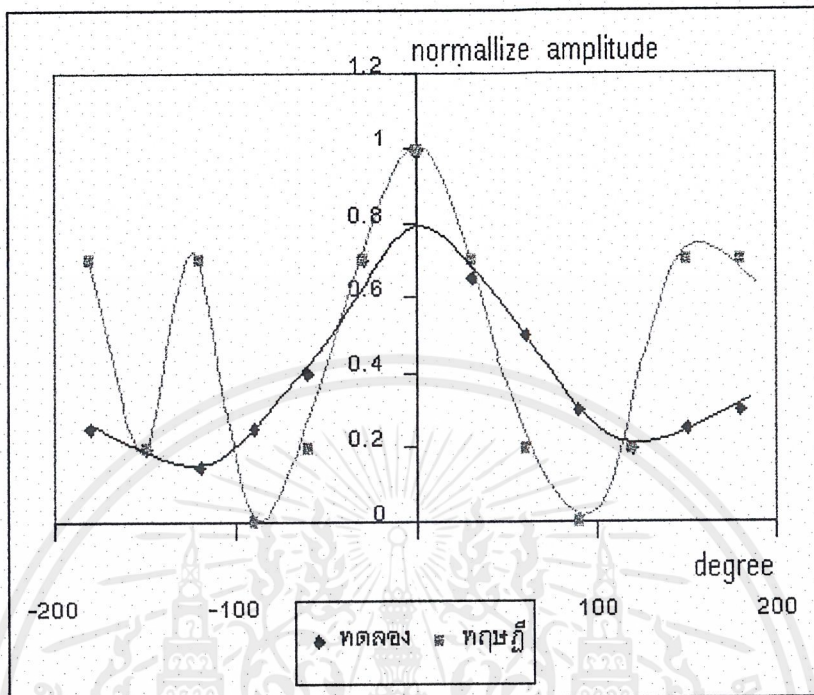
E-plane



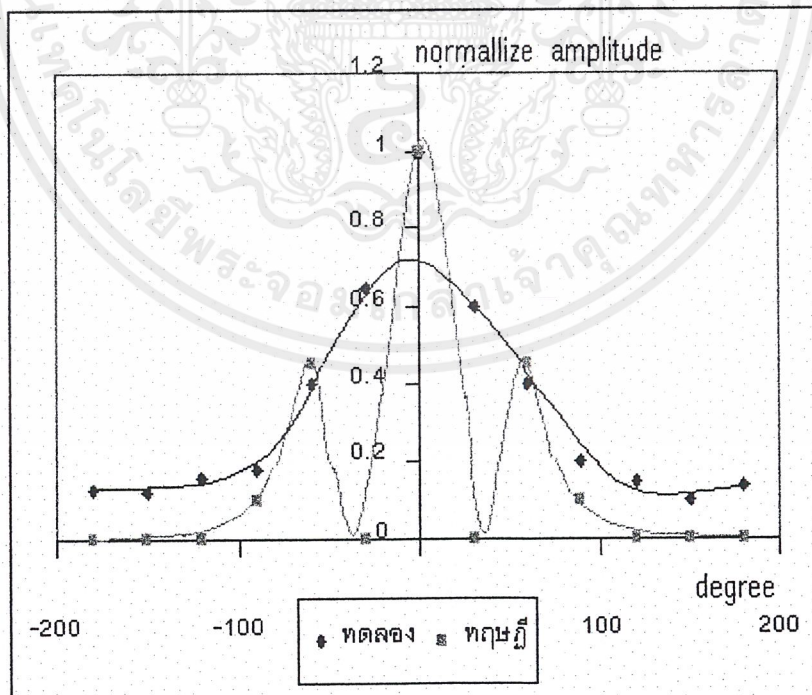
H-plane

รูปที่ 4.34 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอลเมนต์ที่ระยะ $d = 0.6\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



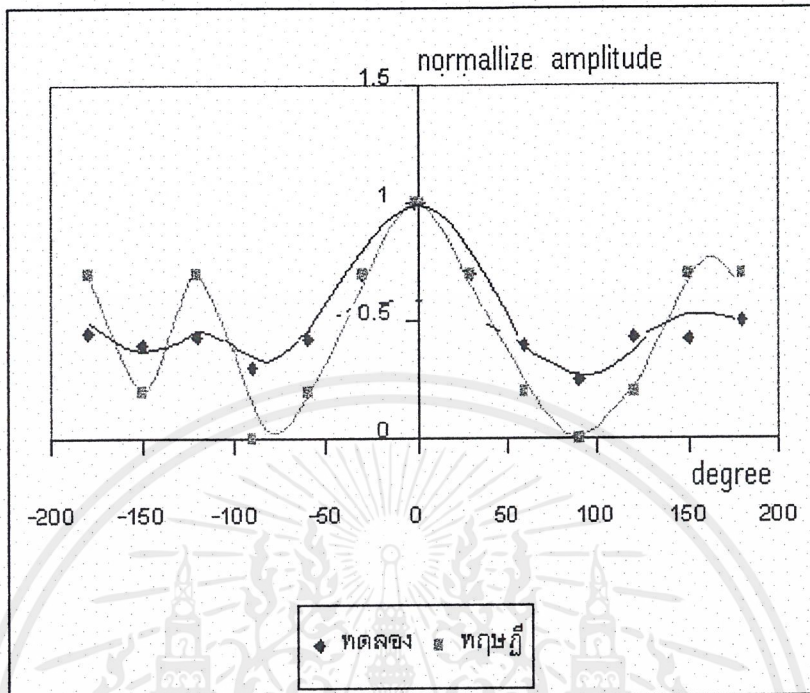
E-plane



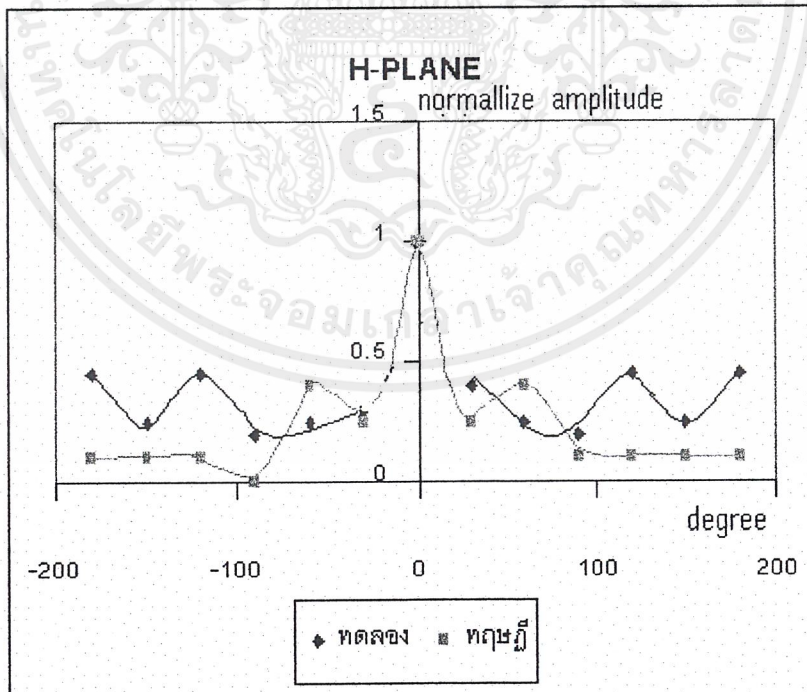
H-plane

รูปที่ 4.35 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เอลเมนต์ที่ระยะ $d = 0.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



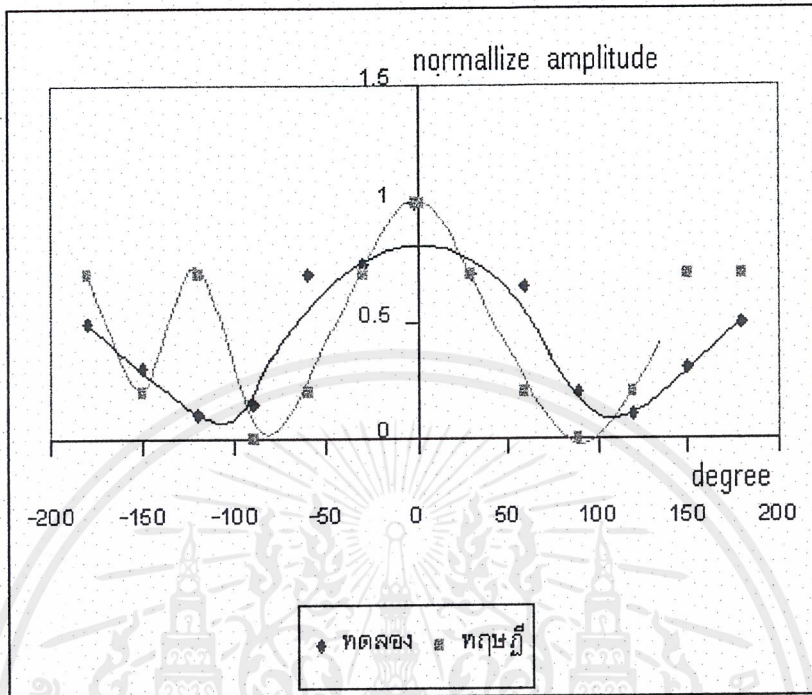
E-plane



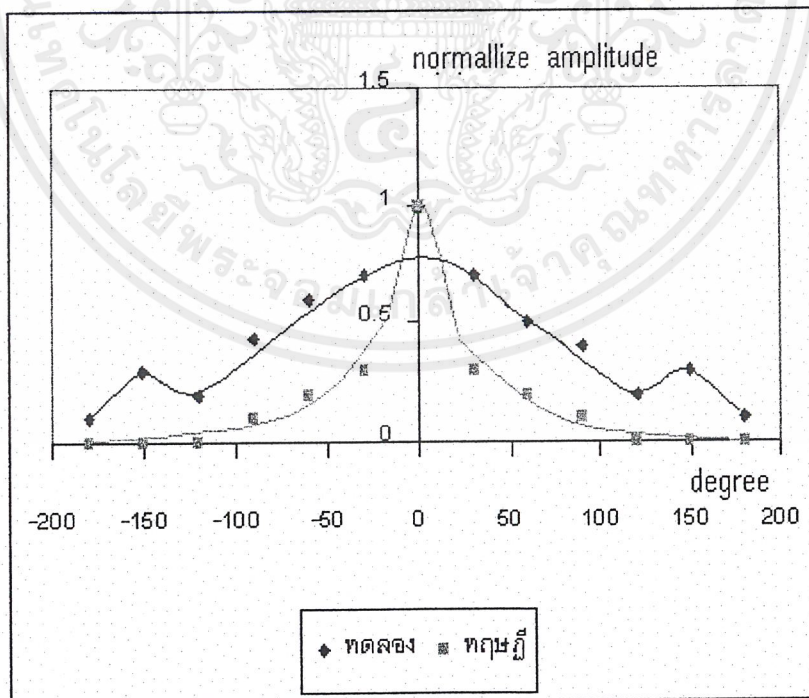
H-plane

รูปที่ 4.36 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เอลเมนต์ที่ระยะ $d = 0.65$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



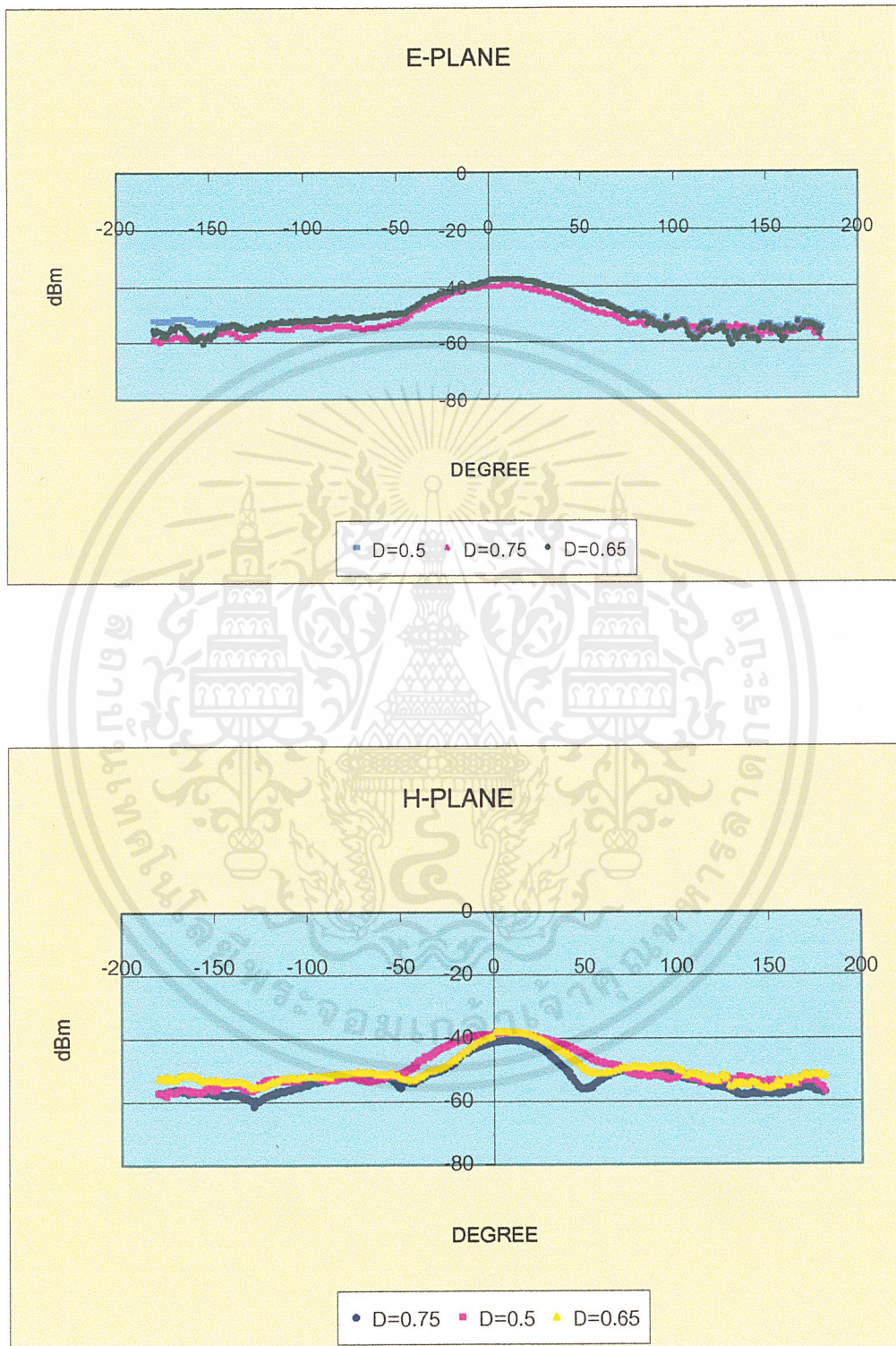
E-plane



H-plane

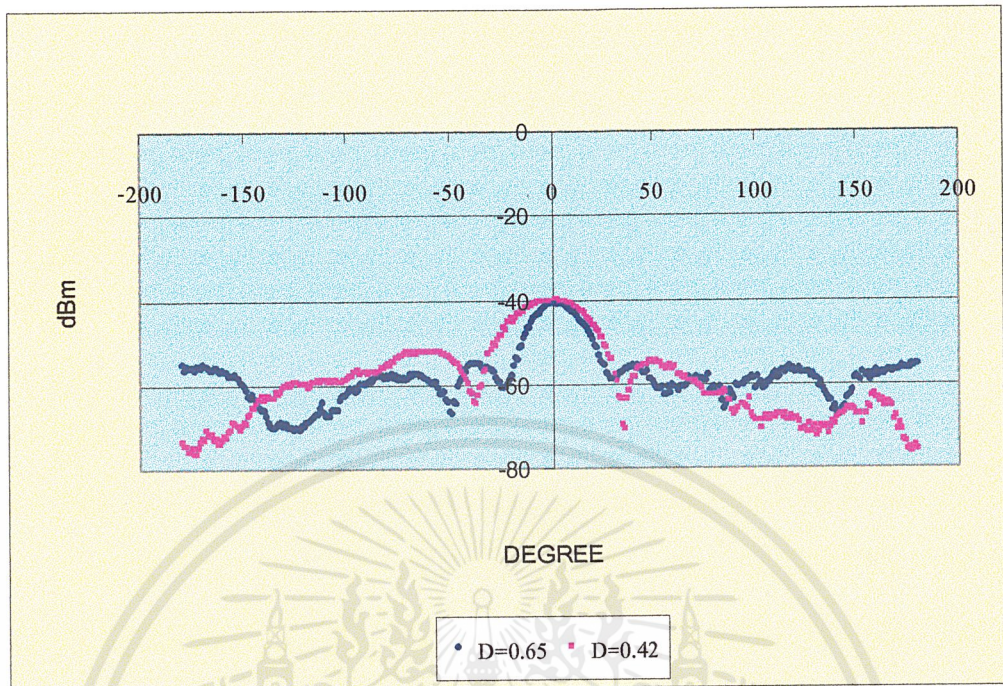
รูปที่ 4.37 สายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 4 เlemenต์ ที่ระยะ $d = 0.42$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

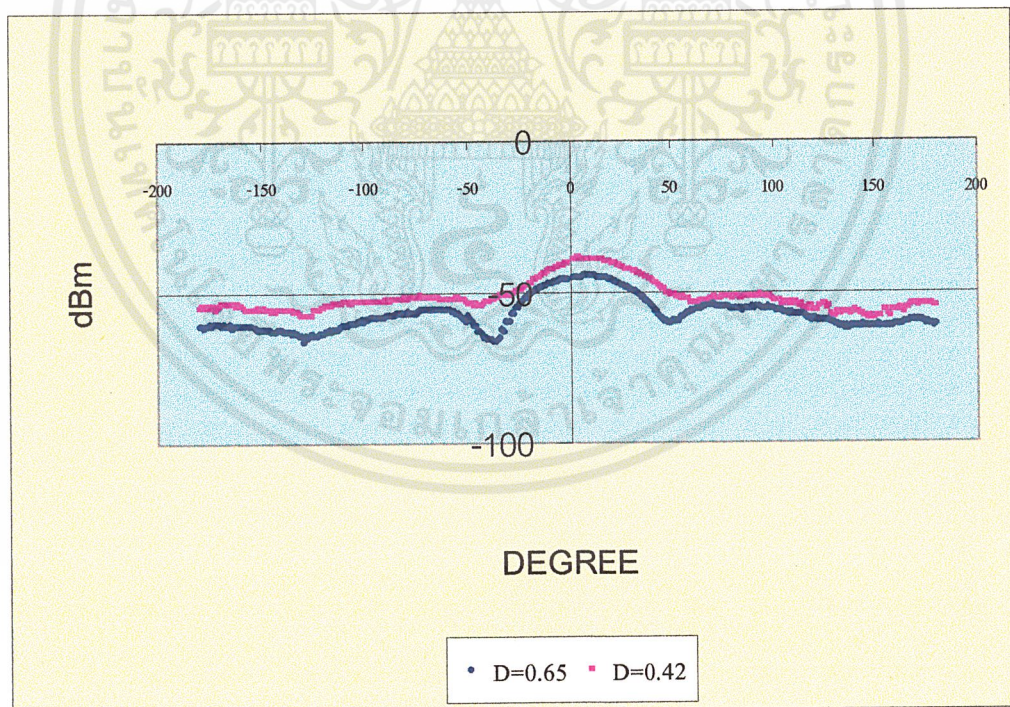


รูปที่ 4.38 ผลเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปอาร์เรย์ 2 เlemenนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



H-plane



E-plane

รูปที่ 4.39 ผลเปรียบเทียบสนามแม่ไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโรสตริป 4 เอลเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์การทดลอง

คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปที่ได้ศึกษาโดยทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติในเบื้องต้นในบางประการยังให้ผลที่ยังไม่ตรงกัน ซึ่งสามารถจำแนกได้โดยสังเขปต่อไปนี้

1. ในทางปฏิบัติ ไม่สามารถทำให้แผ่นตัวนำที่ใช้ทำเป็นกรวดแผ่นเป็นตัวนำที่สมบูรณ์ได้
2. ในทางปฏิบัติ ไม่สามารถทำให้แผ่นตัวนำที่ใช้ทำเป็นกรวดแผ่นมีขนาดที่ไม่จำกัดมิได้
3. ในแนวทางการออกแบบจริงไม่สามารถใช้ค่าต่างๆที่ทำการคำนวณอันเนื่องจากผลทางด้านเครื่องมือวัด ซึ่งผลดังกล่าวมีผลทำให้ค่าที่ได้จริงจากการทดลองจึงไม่ตรงกับแนวทางทฤษฎีเลยทีเดียว
4. ค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารที่ใช้ทำสายอากาศ ในการทดลองได้ใช้สารไดอิเล็กตริกที่เป็นอีพ็อกซี่ซึ่งประมาณค่าให้มีค่าคงที่สัมพัทธ์เท่ากับ 4.45 แต่ในการออกแบบจริงเราไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงของสารไดอิเล็กตริกที่เป็นอีพ็อกซี่
5. การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศที่ทำการออกแบบมักจะเกิดการคลาดเคลื่อนบ้าง โดยเฉพาะสายอากาศไมโครสตริป 1 เlemenต์เนื่องจากการคำนวณตำแหน่งของจุดป้อนมีค่าเท่ากับ 1.15 เซนติเมตร มีค่าอินพุตเท่ากับ 50.4 แต่ค่าที่เราทำการออกแบบมีค่าเพียง 50 โอห์ม ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าทำให้เกิดความไม่สมพงษ์(mismatch)ระหว่างแพทช์กับสายส่งไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีวัดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของชั้นเซตราช

ชั้นเซตราชที่จะใช้วัดในวิธีนี้จะถูกค้ำหุ้มด้วยโลหะทุกด้านดังนั้นจะเหมือนเรโซแนนท์ คาวิตี เล็กๆและความถี่เรโซแนนท์ จะหาจากการส่งผ่านหรือการสะท้อนกลับจากนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริก หรือค่าเพอร์มิตติวิตี สัมพัทธ์ (ϵ_r) จะถูกคำนวณออกมา ด้วยความแม่นยำกว่า 1%

ก่อนที่วงจรมไมโครสตริปจะถูกออกแบบเราจำเป็นต้องรู้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของชั้นเซตราชของ แผ่นพิมพ์สองหน้าที่จะนำมาใช้ก่อนซึ่งจะจำเป็นมากในกรณีของอลูมินา เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะมีค่าแตกต่างกันอย่างมากระหว่างอลูมินาจากผู้ผลิตแหล่งต่างๆ

เทคนิคนี้เริ่มด้วยการพิจารณาทดสอบหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของแผ่นปริ้นท์ ที่จะนำมาทำการออกแบบเป็นสายอากาศโดยได้ใช้สารสับเซตราชที่เป็นสารอีพ็อกซี่ (Epoxy) มีความหนา (h) เท่ากับ 1.59 mm. โดยตัดแผ่นปริ้นท์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 58 * 58 mm² และทำการเชื่อม (Shield) ขอบ 2 ด้านที่ขนานกันทำเป็นไมโครเวฟ Cavity ต่อจากนั้นจึงเชื่อมต่อ SMA-Connector เข้ากับแผ่นปริ้นท์แล้วทำการวัดค่า Return Loss(S₁₁) จาก Network Analyzer

จากสมการแสดงโหมดคลื่นของแผ่นไมโครสตริป

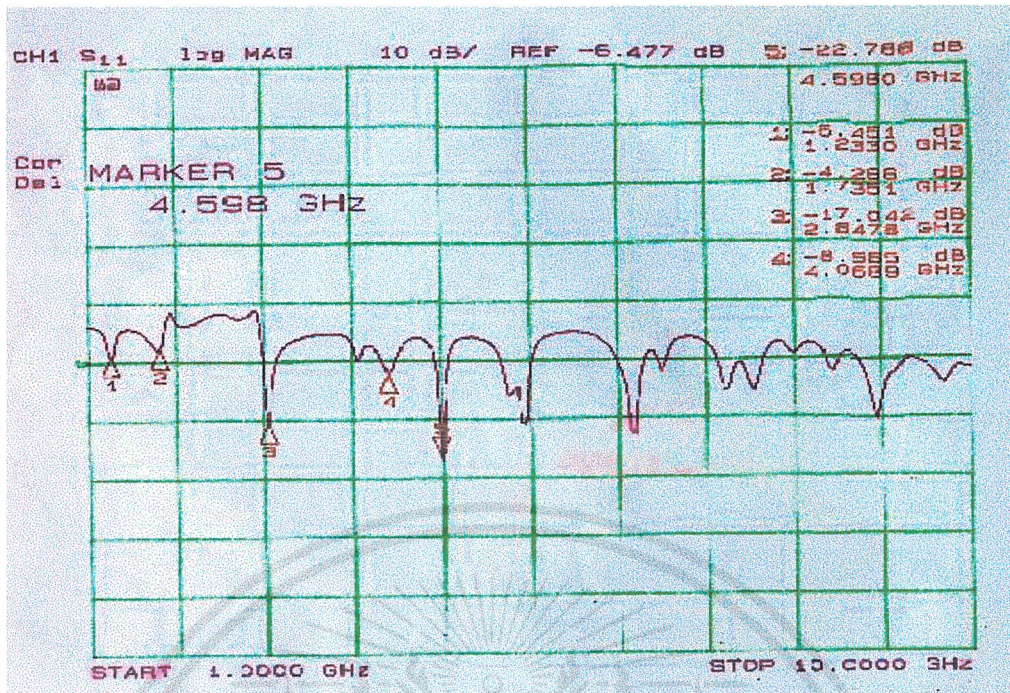
$$(f_r)_{mn} = \left[\frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\mu_0 \epsilon} \cdot \sqrt{(m\pi/l)^2 + (n\pi/w)^2} \right] \dots(1)$$

ลดรูปสมการเป็น

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

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

โดยเราจะอ่านค่าความถี่ (f_r)_{mn} จาก Network Analyzer เพื่อวัดพลังงานที่ส่งผ่านคาวิตีดังกล่าวที่แสดง ซึ่งเราจะแสดงเป็นรูปฟังก์ชันของความถี่ในตารางที่ 1 แล้วนำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่างๆแล้วนำผลที่ได้ในตารางที่ 1 มาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 1 กราฟแสดงค่า Return Loss

ตารางที่ 1 แสดงการหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ในคลื่นโหมดต่างๆ

POSITION	Frequency (GHz)	MODE (m,n)	ϵ_r
1	1.2330	1,0	4.555
2	1.7351	1,1	4.600
3	2.8478	1,2	4.270
4	4.0689	1,3	4.183
5	4.5980	2,3	4.258
6	5.2926	3,3	4.700
7	6.2234	5,0	4.470
8	6.6879	5,2	4.490
9	7.2415	5,3	4.490
10	8.7914	7,1	4.480

จากตารางที่ 1 จะได้ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 4.4496

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบคุณสมบัติของตัวแบ่งกำลังแบบ T-junction

จากทฤษฎีการออกแบบตัวแบ่งกำลังข้างต้นในบทที่ 2 ซึ่งจะนำมาทำการทดลอง ทดสอบคุณสมบัติว่าสามารถแบ่งกำลังได้ตามทฤษฎีหรือไม่โดยออกแบบตัวแบ่งกำลังเป็นแบบ T-junction และใช้ควอเตอร์เวฟทรานฟอร์มเมอร์ร่วมในการออกแบบดังรูปที่ 1

ขั้นตอนแรกจะทำการสังเคราะห์สายส่งสตริปไลน์โดยให้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์มต่อ จากนั้นคำนวณหาขนาดความกว้างของสายส่งได้เท่ากับ 3.0095 มิลลิเมตรซึ่งมีลักษณะในการคำนวณเช่นเดียวกันในหัวข้อที่ 3.4 การออกแบบสายส่งไมโครสตริป

$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$$

ในขั้นตอนต่อมาจะทำการสังเคราะห์ควอเตอร์เวฟทรานฟอร์มเมอร์โดยที่ โดยที่อิมพีแดนซ์รวมของสายส่งสตริปสองเส้นเท่ากับ 25 โอห์มซึ่งหาได้จากสมการการหาอิมพีแดนซ์รวม โดยที่สายส่งแต่ละเส้นมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ต่อจากนั้นก็คำนวณหาควอเตอร์เวฟ

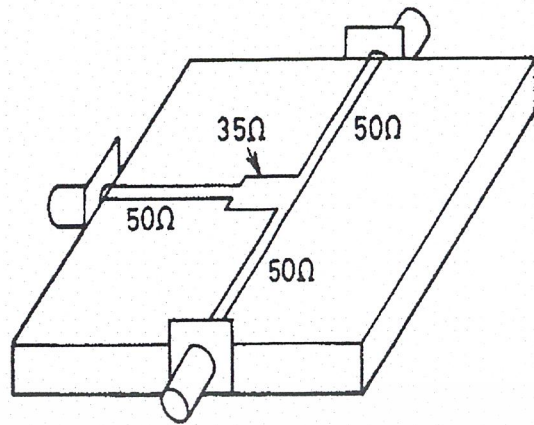
$$Z_T = \sqrt{Z_{in}Z_L}$$

- เมื่อ
- Z_T = อิมพีแดนซ์ของควอเตอร์เวฟทรานฟอร์มเมอร์
 - Z_{in} = อิมพีแดนซ์รวมของสายอากาศ
 - Z_L = อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศแต่ละเอเลเมนต์

นำค่าที่ได้แทนในสมการจะได้

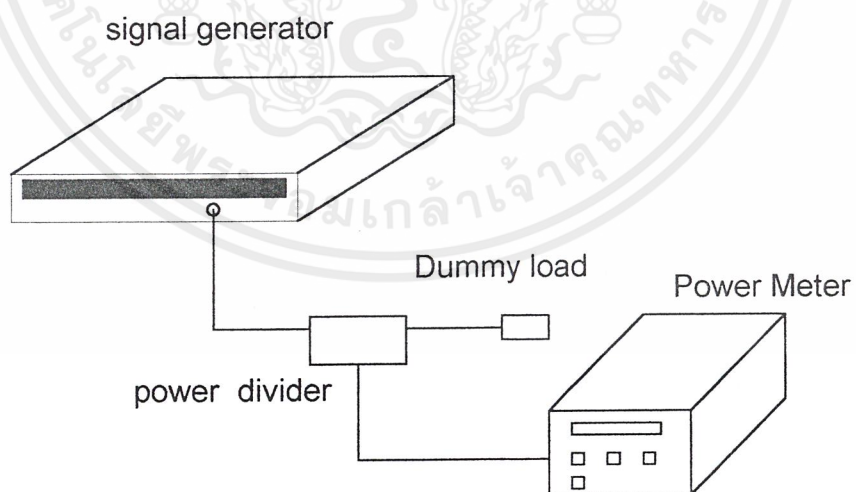
$$Z_T = \sqrt{25 \times 50}$$

ดังนั้นก็ได้ค่าอิมพีแดนซ์ของควอเตอร์เวฟทรานฟอร์มเมอร์เท่ากับ 35 โอห์ม ต่อจากนั้นก็คำนวณหาความกว้างของควอเตอร์เวฟทรานฟอร์มเมอร์เช่นเดียวกับความกว้างของสายส่งเช่นเดียวกับการคำนวณหาความกว้างของสายส่งแบบไมโครสตริป ส่วนความยาวของควอเตอร์เวฟจะใช้ที่ความยาวเท่ากับ $\lambda_g/4$ โดยการใช้โปรแกรม Mathcad ช่วยในการวิเคราะห์ซึ่งได้ความกว้างมีค่าเท่ากับ 5.145 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 ตัวแบ่งกำลังแบบ T-junction

การทดลองจะทำการต่อวงจรดังรูปที่ 2 ต่อจากนั้นก็ป้อนสัญญาณอินพุตที่มีค่า -10 dBm และนำ Dummy load ต่อเข้าพอร์ท 1 ของตัวแบ่งกำลัง (ในการต่อ Dummy load นี้กระทำเพื่อไม่ให้เกิดค่าเพาเวอร์รีเฟกชัน (power reflection) มายังพอร์ทที่ต้องการวัด) หลังจากนั้นก็นำ Power Meter มาต่อเข้าที่พอร์ท 2 ของตัวแบ่งกำลังจากนั้นก็บันทึกการทดลองต่อจากนั้นก็นำ Dummy load ของพอร์ท 1 มาต่อเข้าที่พอร์ท 2 และนำเพาเวอร์มิเตอร์ที่พอร์ท 2 มาต่อเข้าที่พอร์ท 1 จากนั้นก็ป้อนสัญญาณอินพุตที่มีค่า -10 dBm ซึ่งผลการทดลองดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 แสดงวงจรการทดลองคุณสมบัติของตัวแบ่งกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ผลการทดลองคุณสมบัติของตัวแบ่งกำลัง

INPUT SIGNALLING = -10dBm

Frequency(MHz)	output #1 dBm	output #2 dBm	Insertion loss #1 dBm	insertion loss #2 dBm
500	-13.95	-13.94	-3.95	-3.94
750	-14.28	-14.26	-4.28	-4.26
1000	-14.91	-14.85	-4.91	-4.85
1250	-15.27	-15.10	-5.27	-5.1
1500	-14.62	-14.46	-4.62	-4.46
1750	-13.91	-13.77	-3.91	-3.77
2000	-15.09	-15.08	-5.09	-5.08

รูปที่ 3 กราฟแสดงเอาต์พุตที่ส่งออกที่พอร์ทที่ 1 และ พอร์ทที่ 2



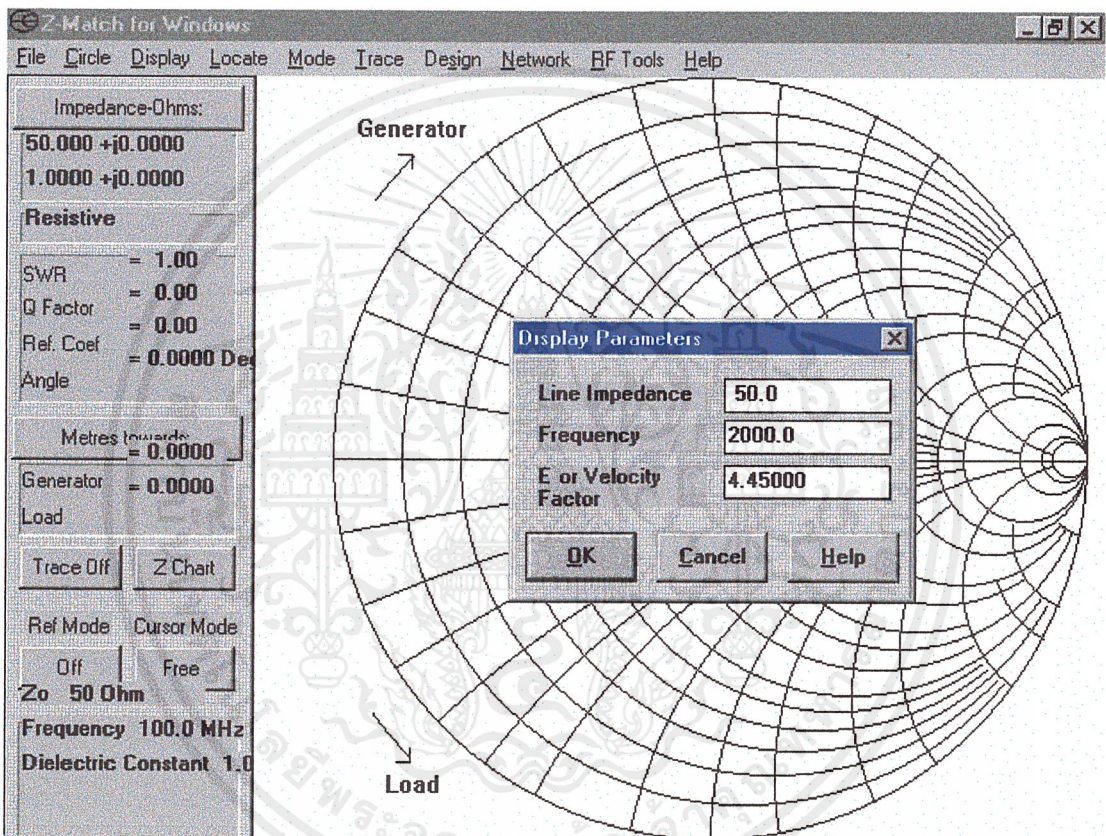
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การใช้โปรแกรม Z-match ในการปรับแมทซ์ซึ่งด้วยวิธี Single Parallel Stub

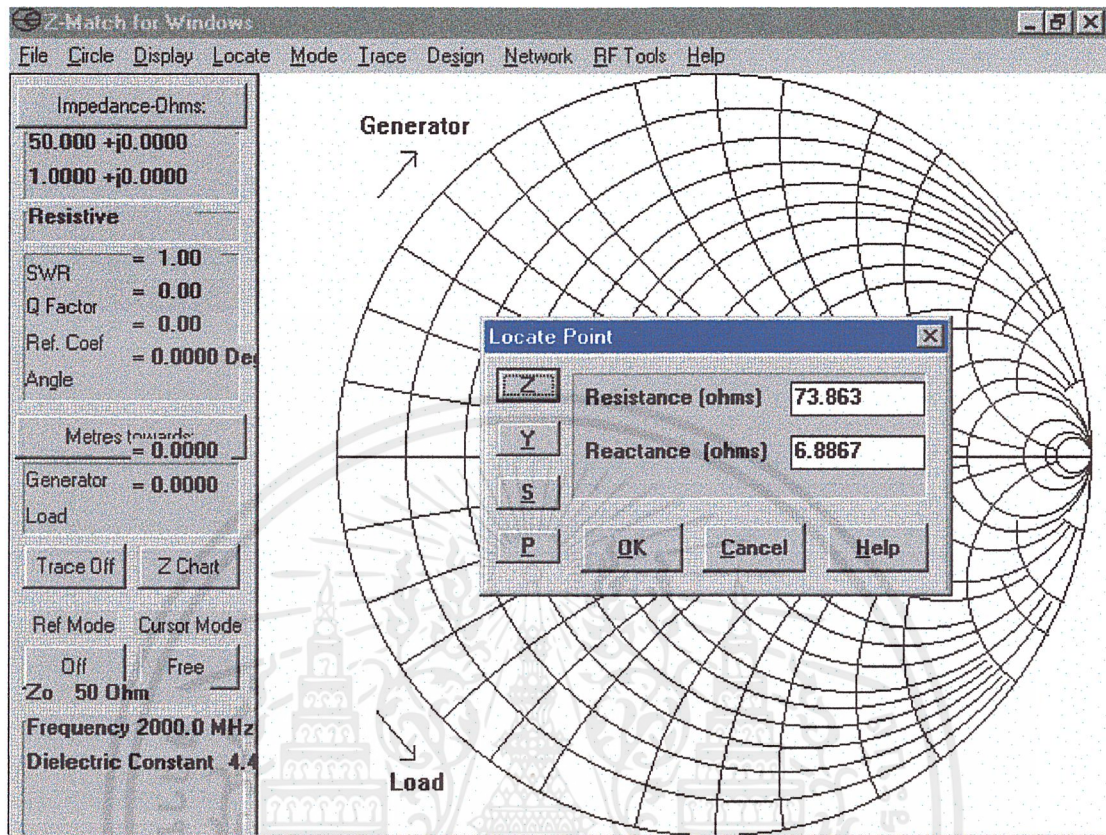
ต้องการแมทซ์ซึ่งระบบที่มีสายนำสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ต่ออยู่กับโหลด 73.836+j6.8867 โอห์มใช้งานที่ความถี่ 2 GHz:ซึ่งมีลำดับขั้นดังนี้

1. ไปที่เมนู Click Mouse ไปที่ **Display** แล้วเลือก **Parameter** จากนั้นใส่ค่าตามรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ไปที่เมนู Click Mouse ไปที่ **Locate** แล้วเลือก **Point** จากนั้นใส่ค่า ZI ตามรูป

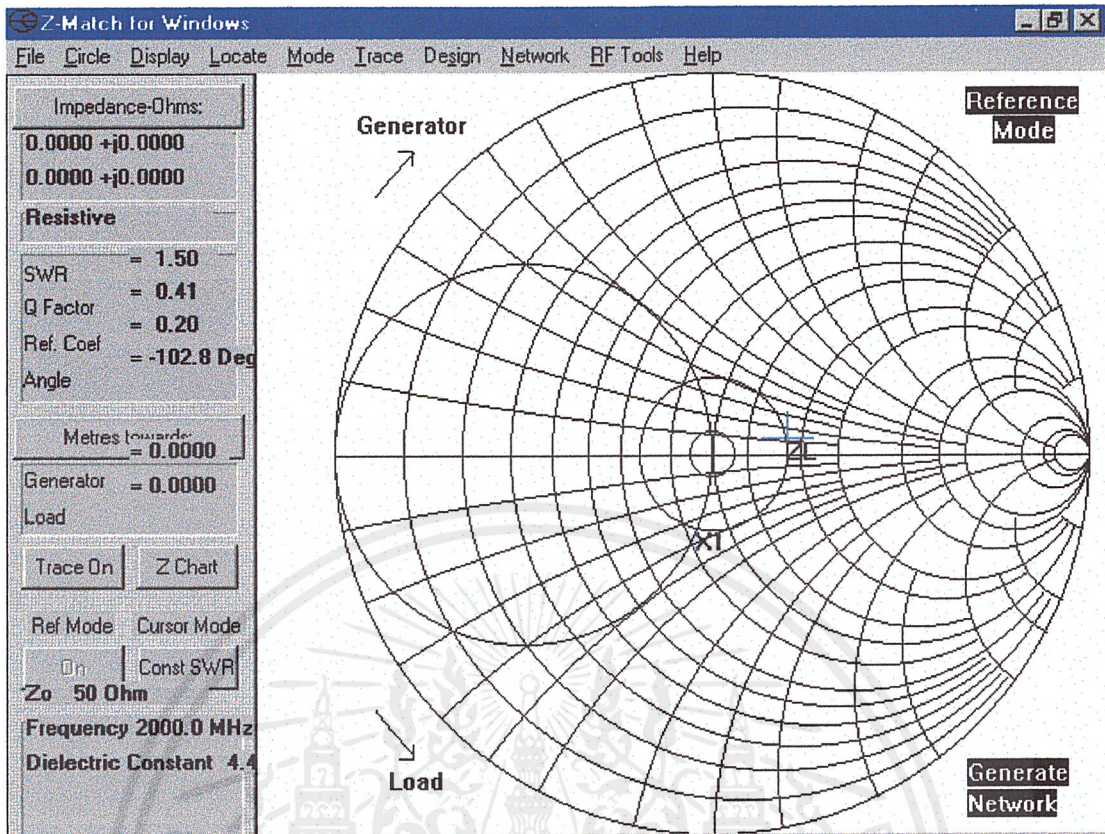


3. เลือกเมนู **Network** แล้วเลือก **SET ZI** จากนั้นเลือกเมนู **Circle** แล้วเลือก **SWR** และ **Unity**

4. เลือก **Trace On** และเปลี่ยน Cursor เป็น **Const SWR**

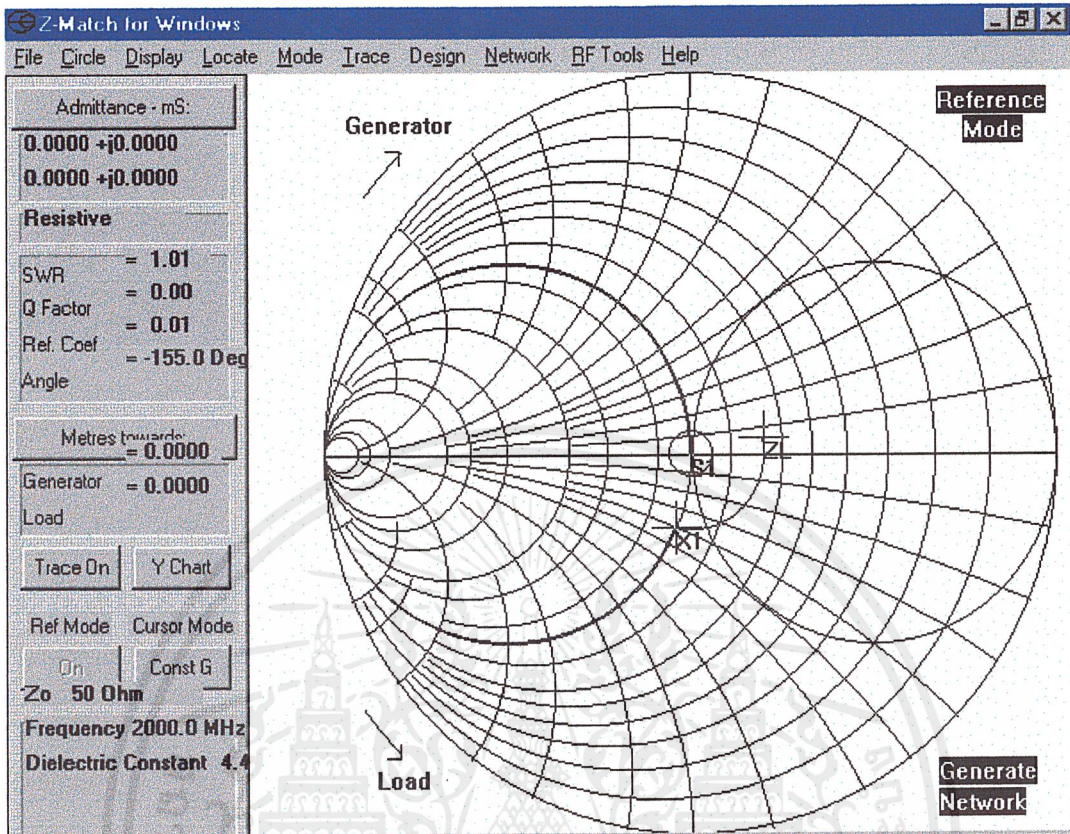
5. ลากเส้นไปตามเข็มนาฬิกาไปตัดวงกลม **Unity** แล้วไปที่เมนูเลือก **Network** เลือก **Component**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

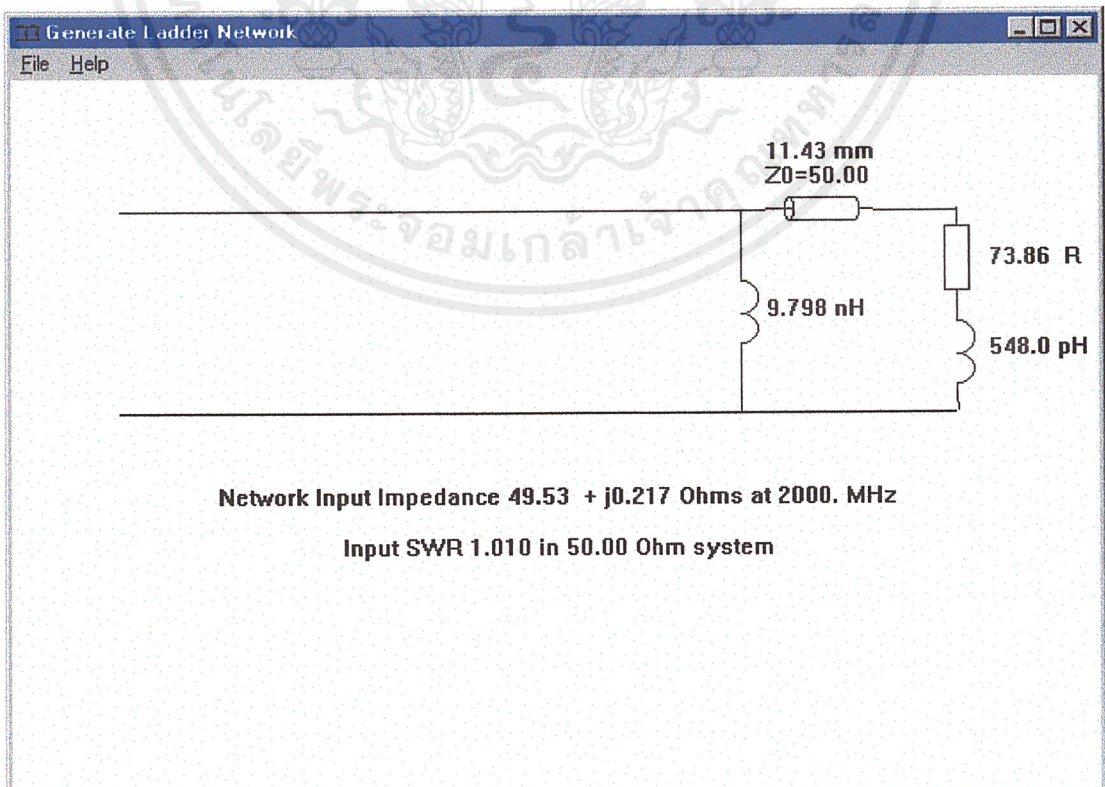


6. เปลี่ยน Z-chart เป็น Y-chart แล้วเปลี่ยน Cursor Mode เป็น Const G
7. ลากเส้นเข้าสู่จุดศูนย์กลางของ Smith Chart ตามเข็มนาฬิกา แล้วเลือกไปที่เมนูเลือก Network แล้วเลือก Component

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



8. ต่อจากนั้นไปที่เมนูเลือก **Network** แล้วเลือก **Display** เพื่อดูวงจร



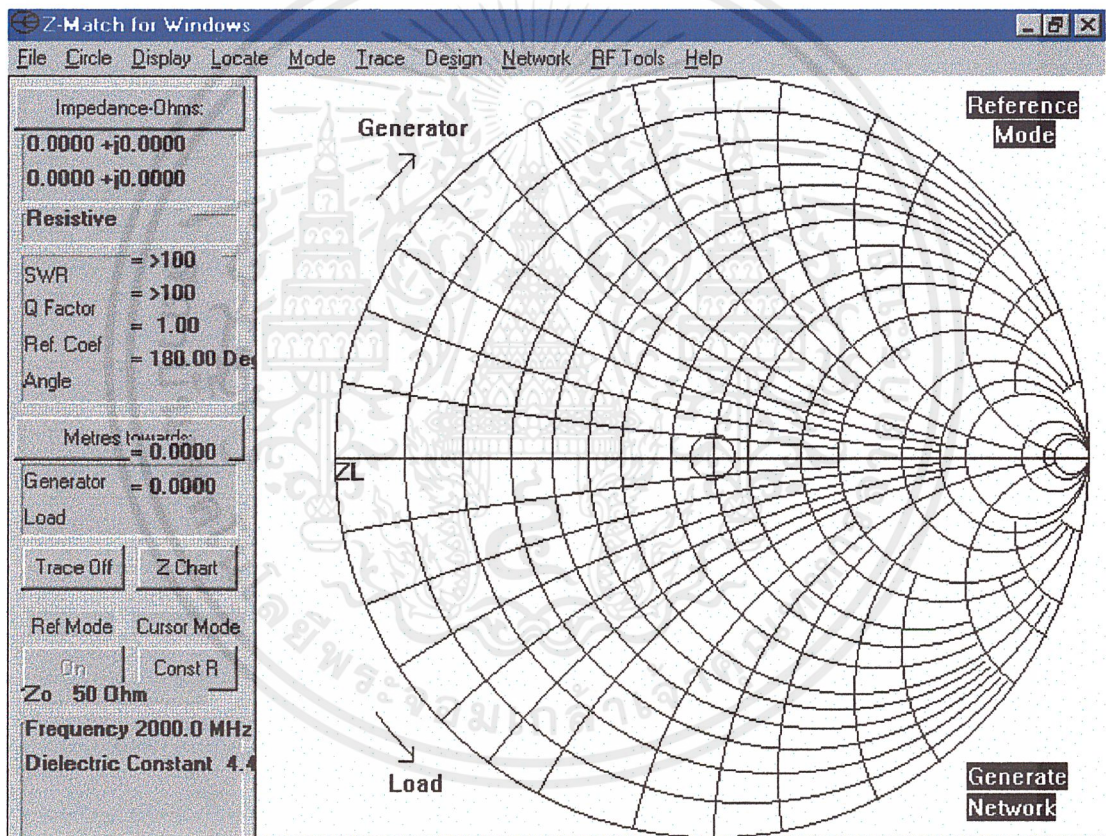
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรข้างบนดังรูปสามารถพิจารณาได้ว่าที่ระยะห่างจากโหลดตามสายนำสัญญาณ คือ ระยะ d_1 มีค่าเท่ากับ 11.28 mm นั้น ณ.ตำแหน่งนี้เองที่ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ขาเข้าเมื่อมองผ่านสายนำสัญญาณเข้าไปหาโหลด จะพบว่า มีค่าเท่ากับ $Y_{input}/Y_0 = 1 + jB$ ซึ่งเราจะต้องนำสลับเคียวหนึ่งตัวมาทำการแมทซ์ซึ่งให้มัน ณ ตำแหน่งนี้โดยการต่อขนานเข้าไปเป็นสตั๊บเปิด (Open stub) หรือสตั๊บปิด (Short Stub)

การออกแบบสายนำสัญญาณที่จะนำมาทำเป็นสตั๊บเปิดเพื่อที่จะนำมาใช้ในการแมทซ์ซึ่ง

9.ทำการ set ค่า **parameter** ในขั้นตอนข้างต้นที่ทำมา

10. เลือกไปที่เมนูไปที่ **Locate** ไปที่ **point** ทำการกำหนดค่า Z_L ของสตั๊บโดยพิจารณาว่าเป็น สตั๊บชนิดใด ในกรณีนี้จะใช้สตั๊บปิดฉะนั้น โหลดต้องมีค่า $Z_L = 0$ คือไม่มีค่าความต้านทานเลยเมื่อเสร็จแล้วจะได้ดังรูป



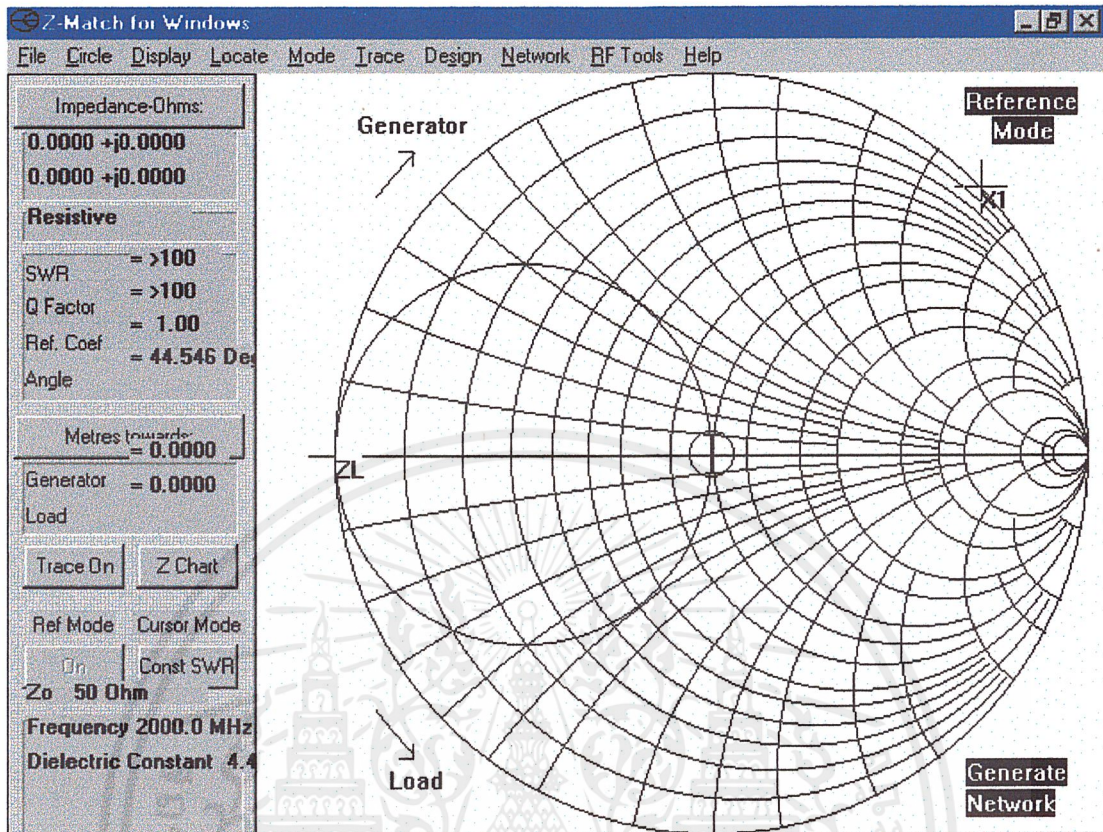
11. ไปที่เมนูเลือก **Circle** แล้วเลือก **SWR**

12. ไปที่ **Cursor Mode** เปลี่ยนเป็น **Const SWR** และที่ใกล้ๆ กันนั้นเปลี่ยนจาก **Trace off** เป็น **Trace on**

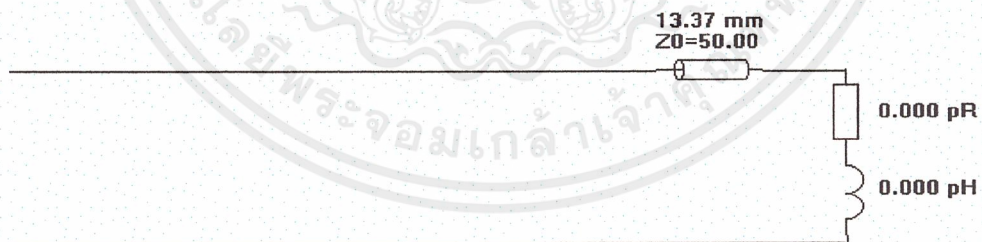
13. การเลื่อน **Cursor** จากตำแหน่ง Z_L หมุนไปทาง **Generator** คือตามเข็มนาฬิกา นั่นเองโดยสังเกตค่าจากตารางทางด้านซ้ายมือเมื่อเราเลื่อน **Cursor** ไปยังตำแหน่งต่างๆ บนวงกลม **SWR** จะพบว่าค่าจะเปลี่ยนไปโดยจะเป็น **L** หรือ **C** ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของ **Cursor** ที่อยู่บนวง **SWR** โดยให้เราเลื่อนไปจนกว่าจะได้ค่าที่เป็นค่า $L = 8.796$ nH หรือใกล้เคียงแล้วจึงหยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. จากนั้นไปที่เมนูเลือก **Network** แล้วเลือก **Component**



15. เลือก **Network** แล้วเลือก **Display** แต่ถ้าเป็นสลับเปิดระยะที่คำนวณเพิ่มอีก $0.25\lambda_g$



Network Input Impedance 0.000 - j122.0 Ohms at 2000. MHz

Input SWR 0.000 in 50.00 Ohm system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของความยาวสายนำสัญญาณไมโครสตริปต่อสายอากาศไมโครสตริปรูปลี่เหลี่ยมจัตุรัส

ความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเป็นสำคัญที่กำหนดระดับการแผ่พลังงานปลอมเทียมจากระบบป้อนกำลังและการสูญเสียในสายนำสัญญาณ จากการศึกษาผลกระทบของสายนำสัญญาณต่อสายอากาศไมโครสตริปรูปลี่เหลี่ยมจัตุรัส พบว่าความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่แตกต่างกันทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานและโพลาริเซชันของสายอากาศเปลี่ยนแปลงไปโดยที่มีสายนำสัญญาณช่วงที่ต่อกับแผ่นสายอากาศ L14 เป็นส่วนที่กำหนดความยาวของสายนำสัญญาณทั้งระบบ และผลกระทบจากระบบป้อนกำลังแบบสายนำสัญญาณไมโครสตริปจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ L14 มีค่าระหว่าง 0.1-0.2 เท่าของความยาวคลื่นไดอิเล็กตริก

ในระบบสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริประบบป้อนกำลังเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของสายอากาศ ระบบป้อนกำลังที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายแบบซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป ระบบป้อนกำลังแบบสายนำสัญญาณไมโครสตริปเป็นระบบที่สามารถผลิตเป็นวงจรมวลขนาดโมโนลิทิกได้ด้วยเทคนิคการทำแผ่นวงจรมัลติและการปรับแต่งภายหลังกระทำได้ง่าย รวมทั้งการวิเคราะห์ผลมีความซับซ้อนน้อยสามารถขยายเป็นสายอากาศแบบอาร์เรย์ขนาดใหญ่ได้ง่ายแต่การแผ่พลังงานปลอมเทียมจากระบบป้อนกำลังแบบนี้นี้อาจมีค่าสูงกว่าระบบป้อนกำลังแบบอื่นๆ ดังนั้นการศึกษาผลกระทบของสายนำสัญญาณไมโครสตริปของสายอากาศจึงมีความสำคัญต่อการลดผลกระทบดังกล่าวพารามิเตอร์สำคัญที่ควบคุมระดับการแผ่พลังงานปลอมเทียมและการสูญเสียในสายนำสัญญาณไมโครสตริปคือความยาวของสายนำสัญญาณ

กำลังงานสูญเสียในสายนำสัญญาณไมโครสตริป

1. การสูญเสียในไดอิเล็กตริกและการสูญเสียในโลหะ การสูญเสียที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่งซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของค่าคงตัวลดทอน $\alpha = \alpha_d + \alpha_c$ โดยที่ α_d, α_c คือค่าคงตัวลดทอนจากการสูญเสียในไดอิเล็กตริกและการสูญเสียในโลหะหาได้ตามสมการของ Wheeler ใน Liao[3] และ Gordo[4]

การคำนวณหาค่า **COPPER LOSS, DIELECTRIC LOSS**

$$t := 10 \cdot 10^{-6}$$

$$h := 1.58750 \cdot 10^{-3}$$

$$\epsilon := 4.45$$

$$\lambda_0 := \frac{v}{f}$$

$$k := \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

$$\Psi := \frac{300 \cdot 10^6}{(2 \cdot 2 \cdot 10^9)} \cdot \sqrt{\frac{2}{4.45 + 1}}$$

$$\Psi = 0.045433689961154$$

$$w := \left[\Psi + \frac{(t \cdot 1.25)}{\pi} \cdot \left[1 + \frac{\log\left(\frac{(2 \cdot h)}{t}\right)}{\log\left(\frac{1}{e}\right)} \right] \right]$$

$$w = 0.045460589047715$$

$$x := \left(\frac{w}{h} + 1.444 \right)$$

$$Z := \left[1.393 + \frac{w}{h} + 0.667 \cdot \frac{\log(x)}{\log\left(\frac{1}{e}\right)} \right]^{-1} \cdot \left[\frac{(120 \pi)}{\sqrt{4.173075230814373}} \right]$$

$$Z = 5.713480687241819$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f := 2.10^9 \quad \rho := 5.813 \cdot 10^7 \quad \text{at 20 องศาเซลเซียส} \quad B := h$$

$$R := \sqrt{\pi \cdot 4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot \rho \cdot f}$$

$$R = 426.9400102116351$$

$$A := 1 + \left(\frac{h}{w}\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{1.25}{\pi}\right) \cdot \frac{\log\left(\frac{2 \cdot B}{t}\right)}{\log(e)} \right]$$

$$A = 1.11495855906575$$

$$\epsilon\gamma := \frac{4.45 + 1}{2} + \frac{4.45 - 1}{2} \cdot \left[1 + \left(\frac{0.00158750}{w}\right) \cdot 12 \right]$$

$$\epsilon\gamma = 4.173075230814373$$

$$\alpha := 10 \log \left[\frac{(Z \cdot \epsilon\gamma \cdot R)}{h} \cdot \frac{w}{h} + \frac{0.667 \cdot \frac{w}{h}}{1.444 + \frac{w}{h}} \right]$$

$$\alpha = 41.06044716187149$$

dB / Metre

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

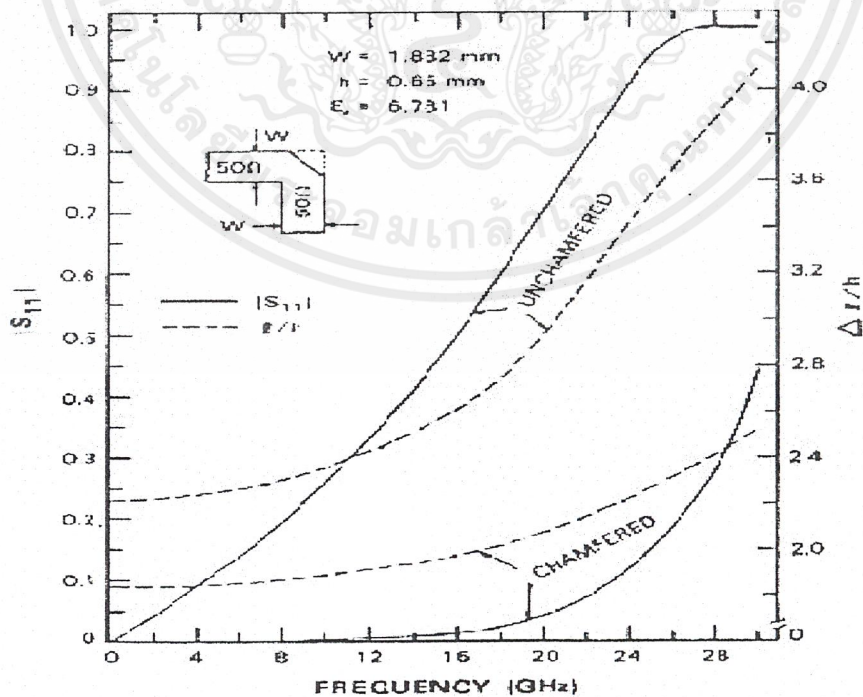
การคำนวณหาค่า DIELECTRIC LOSS

$$\alpha_d = 10 \log \left[\left[27.1 \left(\frac{4.45}{4.45 - 1} \right) \cdot \frac{\epsilon\gamma - 1}{\epsilon\gamma} \right] \frac{0.01}{0.15} \right]$$

$\alpha_d = 5.586712096383966$ dB / Metre

สายอากาศไมโครสตริปจะมีการสูญเสียที่สูงแต่จากการศึกษาทำให้ค่าการสูญเสียเกิดขึ้นในอัตราที่น้อยลงเช่น ใช้สารสับเสตที่มีค่าซิมซบสัมพัทธ์มีค่าใกล้เคียง 1 หรือเลือกใช้แผ่นโลหะที่มีค่าความนำสูงและขนาดหน้าของตัวนำที่นำมาออกแบบ จะต้องมีความเหมาะสมที่จะไม่ให้มีผลต่อ Skin Depth

2.การสูญเสียเนื่องจากการแผ่พลังงานของสายนำสัญญาณไมโครสตริปจากการศึกษา Lewin พบว่าสายนำไมโครสตริปจะมีการแผ่พลังงานออกมาภายนอก มีส่วนของความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้น แต่จะมีการแผ่พลังงานน้อยมากจนสามารถละเลยได้ในกรณีที่เป็นสายนำสัญญาณที่มีความยาวต่อเนื่อง และการแผ่พลังงานดังกล่าวสามารถแทนจุดความไม่ต่อเนื่อง และการแผ่พลังงานดังกล่าวสามารถแทนจุดความไม่ต่อเนื่องด้วยกระแสแม่เหล็กเหมือนดังรูปกำลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการแผ่พลังงานจากความไม่ต่อเนื่องของสายนำสัญญาณไมโครสตริป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิติกรรมประกาศ

โครงการสายอากาศไมโครสตริป สามารถดำเนินงานเป็นโครงการลุล่วงมาได้ต้องขอบคุณท่านอาจารย์โมไนย ไกรฤกษ์ ที่คอยประสิทธิ์ประสาทความรู้พื้นฐานในวิชาสายอากาศและต้องขอบคุณท่านอาจารย์ทองทศ วานิชศรี ที่คอยช่วยให้คำปรึกษาในการออกแบบแมทซ์ซิ่ง และขอขอบคุณผู้แต่งหนังสือที่ใช้อ้างอิงในโครงการนี้ด้วยโดยเฉพาะอย่างยิ่งท่านอาจารย์ณรงค์ เหมกรณ์ ซึ่งเป็นท่านอาจารย์ที่ปรึกษาและทุกท่านที่ให้คำปรึกษาแนะนำให้ความรู้จนโครงการนี้สำเร็จลุล่วง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] โมไนย ไกรฤกษ์ และ วิวัฒน์ กิรานนท์ “ทฤษฎีสายอากาศ” กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล., 2532
- [2] Ashok K Agrawal” A Printed-Circuit Hybirded-ring Directional Coupler for Arbitrary Power Division” IEEE Trans., MTT. 1989
- [3] Bahl, I.J. and P. Bhartia “Microstrip Antenna ” Artech House, 1980
- [4] Carver, K.R. J.W. Mink “Microstrip Antenna Technology ” IEEE Trans. Antenna and Propagation, Vol. 29, No. 1 Janury 1981
- [5] Constantine A. Balanis “Antenna Theory : analysis and design” John Wiley & Sons, 1982
- [6] J.R. James & P.S. Hall “Handbook of Microstrip Antenna Volume 2 ” Peter Peregrinus Ltd, 1989
- [9] Penard. “Mutual Coupling between Microstrip Antennas” IEEE Electronic Letter, Vol. 18 No. 14 8th July 1982.
- [10] S.W. Lee, Y.T. Lo “Antenna Handbook : Theory applications and design “ Van Nostrand Reinhold Compsny. Network 1988

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้