



สายอากาศสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Lan)
ย่านความถี่ 2.4 – 2.5 GHz บนฐานรอง PCB แบบแถวลำดับไดโพล
(Array dipole antenna on PCB for Wireless Lan network at 2.4 – 2.5 GHz)

โดย

นางสาวพฤทธิยาพร สิงห์โตทอง รหัสนักศึกษา B4505167
นายจานุวัฒน์ แก้วสิงห์ รหัสนักศึกษา B4505884

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษารายวิชา 427494 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม
และ 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม
ประจำภาคการศึกษาที่ 1 และ 3 ปีการศึกษา 2548
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ.2541
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หัวข้อโครงการ	ออกแบบสายอากาศสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless - LAN) ย่านความถี่ 2.4 – 2.5 GHz บนฐานรอง (PCB) แบบแถวลำดับไดโพล
ชื่อภาษาอังกฤษ	Array dipole antenna on PCB for Wireless Lan network at 2.4 – 2.5 GHz
นักศึกษา	นางสาวพฤทธิยาพร สิงห์โตทอง รหัส B4505167 นายจานุวัฒน์ แก้วสิงห์ รหัส B4505884
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
พ.ศ.	2548
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	อ.ดร.ชาญชัย ทองโสภณ

บทคัดย่อ

งานโครงการนี้เป็นนำเอาแนวความคิดที่นำหลักการสายอากาศทำจากเส้นลวดกลมตรงจัดเรียงลวดตามลักษณะในแนวความคิดของสายอากาศแบบไดโพล มาประยุกต์กับหลักการของสายอากาศชนิดแผ่นไดอิเล็กทริก เคลือบบางด้วยวัสดุสื่อไฟฟ้าที่ดีทั้งสองด้าน โดยด้านหนึ่งให้เป็นเสมือนพื้นผิวโลก (Ground) ส่วนอีกด้านหนึ่งกลัดให้เป็นเหมือนสายอากาศ โดยการออกแบบเพื่อทำเป็นสายอากาศนั้นจะออกแบบโดยใช้โปรแกรม IE3D ในการออกแบบและทำการสร้างสายอากาศจริงตามแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม IE3D และนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทำการวัดจริงมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม IE3D เพื่อเป็นการยืนยันการทำงานของตัวโปรแกรมว่าสามารถใช้ออกแบบสายอากาศได้จริง และหลังจากที่ได้สายอากาศต้นแบบที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรมแล้ว จะนำสายอากาศต้นแบบนี้ไปทำเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับ เพื่อให้คุณสมบัติของสายอากาศดีขึ้น โดยอาศัยหลักการของการออกแบบ Feed Network ในการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับ และเรียกสายอากาศชนิดนี้ว่าสายอากาศแบบไดโพลแบบแถวลำดับบนฐานรอง PCB

โดยสรุปสายอากาศที่ได้สร้างขึ้นและได้ทำการทดสอบมีแนวโน้มว่าเป็นสายอากาศที่ดีและสามารถจะใช้ประโยชน์ได้ในสภาวะการทำงานจริง

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการศึกษาออกแบบสายอากาศสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) ย่านความถี่ 2.4 GHz บนฐานรอง (PCB) แบบแถวลำดับไดโพล จะไม่สามารถสำเร็จลงได้ หากคณะผู้จัดทำไม่ได้รับความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแนวความคิดในการทำโครงการ ความรู้และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงใคร่ขอแสดงความขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านซึ่งบุคคลเหล่านั้นประกอบด้วย

- อาจารย์.ดร. ชาญชัย ทองโสภิต อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และนำเสนอโครงการชิ้นนี้ ให้แก่ผู้จัดทำ รวมทั้งให้ความรู้ และแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น จนทำให้โครงการนี้ สำเร็จ
- อ.ผศ.ดร. รังสรรค์ วงศ์สรรค์ อาจารย์ที่ให้ความรู้และหลักการต่างๆ เกี่ยวกับสายอากาศ ในการที่จะนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการทำโครงการ และเป็นผู้ที่ทำให้ความหมายของ คำว่า “สายอากาศ” (ไม่ใช่ “เสาอากาศ”)
- คณาจารย์ทุกท่านที่เกี่ยวข้องในการให้คำปรึกษาทางด้านต่างๆ แก่คณะผู้จัดทำ
- คุณประพล จาระตะกู วิศวกรประจำอาคารเครื่องมือ 3 ที่ช่วยเป็นธุระช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน คุณฉัตรชัย ถาจอหอ เจ้าหน้าที่ดูแลอุปกรณ์ห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการเบิกอุปกรณ์ และเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ในการทดสอบสายอากาศ ฟ้าๆ นักศึกษาปริญญาโท วิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่ให้การสนับสนุน
- เพื่อนๆ วิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนสำหรับความช่วยเหลือที่ดีทุกด้านตลอดจนกำลังใจที่ มอบให้แก่คณะผู้จัดทำตลอดมา

สุดท้ายผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ของผู้จัดทำที่ให้กำเนิดและให้โอกาสทางการศึกษาและคอยสนับสนุนรวมทั้งกำลังใจที่คอยมอบให้ตลอดมา

นางสาวพททิยาพร สิงห์โตทอง

นายจานุวัฒน์ แก้วสิงห์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญรูป.....	ง
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ.....	3
2.1 สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna).....	3
2.2 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna).....	8
2.3 สายอากาศแบบแถวลำดับ (Array Antenna).....	9
2.4 การออกแบบตัวป้อนสัญญาณ (Feed Network).....	11
2.5 พารามิเตอร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศ.....	15
2.5.1 แบบรูปการแผ่กำลังงาน (Radiation Pattern).....	15
2.5.2 อัตราขยาย (Gain).....	17
2.5.3 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance).....	18
2.5.4 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio:SWR).....	19
2.5.5 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss).....	20
บทที่ 3 การจำลองโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรม	22
บทที่ 4 การสร้างและทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ.....	28
การออกแบบตัวป้อนสัญญาณ (Feed Network).....	30
การทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ.....	34
อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ.....	35
การทดลองวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss : S_{11}) ของสายอากาศ.....	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ขั้นตอนการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ.....	35
วิเคราะห์กราฟค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ.....	37
การทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) ของสายอากาศ.....	38
ขั้นตอนการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า.....	38
วิเคราะห์กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ.....	40
การทดลองวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR) ของสายอากาศ.....	40
ขั้นตอนการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	40
วิเคราะห์กราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ.....	42
การทดลองวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของสายอากาศ.....	43
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ.....	43
ขั้นตอนการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน.....	43
ผลของการทดลองวัดการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ แบบองค์ประกอบเดี่ยว (1 – Element).....	44
วิเคราะห์แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ แบบองค์ประกอบเดี่ยว (1 – Element).....	46
ผลของการทดลองวัดการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ แบบ 2 องค์ประกอบ (2 – Elements).....	46
วิเคราะห์แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ แบบ 2 องค์ประกอบ (2- Elements).....	49
ผลของการทดลองวัดการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ แบบ 4 องค์ประกอบ (4 – Elements).....	49
วิเคราะห์แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ แบบ 4 องค์ประกอบ (4- Elements).....	52
การวัดค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ.....	53
วิเคราะห์ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณ.....	54
สรุปการสร้างและการวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ.....	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	55
บทสรุป.....	55
ข้อเสนอแนะ.....	56
บรรณานุกรม.....	57
ประวัติผู้เขียน.....	58
ภาคผนวก ก แสดงการใช้โปรแกรม IE3D ออกแบบสายอากาศ.....	59
ภาคผนวก ข แสดงการออกแบบ Feed Line โดยใช้โปรแกรม IE3D.....	76
ภาคผนวก ค แสดงตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียย้อนกลับกับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	78

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1.1 สายอากาศไดโพล.....	3
รูปที่ 2.1.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของไดโพลอุดมคติ ตามหลักทฤษฎีระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane).....	5
รูปที่ 2.1.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของไดโพลอุดมคติ ตามหลักทฤษฎีระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane).....	5
รูปที่ 2.1.4 การกระจายของกระแสในไดโพล $\lambda/2$	6
รูปที่ 2.1.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของ สายอากาศไดโพล $\lambda/2$ และไดโพลอุดมคติ.....	6
รูปที่ 2.1.6 การโพลารไรซ์ของสายอากาศไดโพล.....	7
รูปที่ 2.3.1 สายอากาศองค์ประกอบเดียวที่มีการส่งกำลังงาน P_1	10
รูปที่ 2.3.2 สายอากาศซึ่งมีสององค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1	10
รูปที่ 2.4.1 การแมตซ์โดยใช้การแปลงอิมพีแดนซ์ของสายส่งความยาว $\lambda/4$	12
รูปที่ 2.4.2 การแมตซ์สายส่งเข้าด้วยกัน.....	12
รูปที่ 2.4.3 ระบบการแมตซ์โดยใช้สายตัวแปลง $\lambda/4$ สองเส้นต่อพ่วงกัน.....	13
รูปที่ 2.4.4 แสดงลักษณะของตัวป้อนสัญญาณแบบ 2-way power divider.....	14
รูปที่ 2.4.5 แสดงลักษณะของตัวป้อนสัญญาณแบบ 4-way power divider.....	14
รูปที่ 2.4.6 ลักษณะของขนาดของลายทองแดงที่ใช้แทนสายส่ง.....	14
รูปที่ 2.5.1 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์ แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศ.....	15
รูปที่ 2.5.2 แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว.....	17
รูปที่ 2.5.3 สายอากาศในโหมดการส่ง.....	18
รูปที่ 2.5.4 การก่อรูปคลื่นนิ่ง.....	19
รูปที่ 2.5.5 แสดงการเกิดการย้อนกลับของกำลังงาน.....	21
รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D แบบ 2 มิติ.....	22
รูปที่ 3.2 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับจากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D.....	23
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งจากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D.....	24
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D.....	25

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในมุมเงย (Elevation) จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D.....	26
รูปที่ 3.6 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในมุมกวาด (Azimuth) จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D.....	26
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบไดโพลบนฐาน PCB แบบองค์ประกอบเดี่ยว (1-Element).....	29
รูปที่ 4.2 สายอากาศแบบไดโพลบนฐาน PCB แบบองค์ประกอบเดี่ยว (1-Element) ที่นำไปทดลอง.....	29
รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองลักษณะของ Feed Network แบบ 2-way power divider.....	31
รูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองลักษณะของตัวป้อนสัญญาณ แบบ 4-way power divider.	32
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของตัวป้อนสัญญาณแบบ 2-way power divider.....	32
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของตัวป้อนสัญญาณแบบ 4-way power divider.....	33
รูปที่ 4.7 สายอากาศแบบแถวลำดับแบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements).....	33
รูปที่ 4.8 สายอากาศแบบแถวลำดับแบบ 4 องค์ประกอบ (4-Elements).....	34
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ แบบองค์ประกอบเดี่ยว (1-Element).....	36
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ แบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements)	36
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ แบบ 4 องค์ประกอบ (4-Elements)	37
รูปที่ 4.12 แผนภูมิสมิท (Smith chart) ของสายอากาศ แบบองค์ประกอบเดี่ยว (1-Element).....	38
รูปที่ 4.13 แผนภูมิสมิท (Smith chart) ของสายอากาศ แบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements).....	39
รูปที่ 4.14 แผนภูมิสมิท (Smith chart) ของสายอากาศ แบบ 4 องค์ประกอบ (4-Elements).....	39

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ แบบองค์ประกอบเดี่ยว (1-Element).....	41
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ แบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements).....	41
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ แบบ 4 องค์ประกอบ (4-Elements).....	42
รูปที่ 4.18 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) โดยภาคส่งและภาครับ มีโพลาริซที่ตรงกัน (ส่ง E-รับ E).....	44
รูปที่ 4.19 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว ในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) โดยภาคส่งและภาครับ มีโพลาริซที่ตรงกัน (ส่ง H-รับ H).....	45
รูปที่ 4.20 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาริซไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง E-รับ H).....	45
รูปที่ 4.21 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาริซไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง H-รับ E).....	46
รูปที่ 4.22 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) โดยภาคส่งและภาครับ มีโพลาริซที่ตรงกัน (ส่ง E-รับ E).....	47
รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ ในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) โดยภาคส่งและภาครับ มีโพลาริซที่ตรงกัน (ส่ง H-รับ H).....	47
รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาริซไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง E-รับ H).....	48
รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาริซไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง H-รับ E).....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.26 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบใน
ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) โดยภาคส่งและภาครับ
มีโพลาริซที่ตรงกัน (ส่ง E-รับ E)..... 49

รูปที่ 4.27 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ
ในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) โดยภาคส่งและภาครับ
มีโพลาริซที่ตรงกัน (ส่ง H-รับ H)..... 50

รูปที่ 4.28 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ
โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาริซไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง E-รับ H)
ที่กำลังส่ง 2.5 dBm..... 50

รูปที่ 4.29 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ
โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาริซไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง E-รับ H)
ที่กำลังส่ง 10 dBm..... 51

รูปที่ 4.30 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ
โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาริซไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง H-รับ E)
ที่กำลังส่ง 2.5 dBm..... 51

รูปที่ 4.31 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ
โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาริซไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง H-รับ E)
ที่กำลังส่ง 10 dBm..... 52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันสำนักงานรวมถึงบ้านพักอาศัยได้มีการนำเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย (Wireless LAN) มาสร้างเป็นเครือข่ายเชื่อมโยงเครื่องคอมพิวเตอร์แทนการใช้ระบบแลนแบบเดิมมากขึ้น เนื่องจากจุดเด่นของเทคโนโลยีที่อุปกรณ์บนเครือข่ายไร้สาย สื่อสารข้อมูลถึงกันโดยไม่ต้องใช้สายนำสัญญาณ ทำให้ผู้ใช้สามารถเชื่อมโยงเครื่องคอมพิวเตอร์เข้าสู่ระบบจากพื้นที่ใดก็ได้ ในรัศมีให้บริการ อีกทั้งการติดตั้งใช้งานยังทำได้ง่าย สะดวก และรวดเร็ว และสิ่งที่จำเป็นสำหรับการติดตั้งเครือข่ายแบบไร้สายคืออุปกรณ์พื้นฐาน แอ็กเซสพอยต์ (Access Point) เป็นอุปกรณ์ที่เปรียบเสมือนฮับ (Hub) โดยจะทำหน้าที่ควบคุมการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องลูกข่ายที่ใช้ไวร์เลสแลนการ์ดเข้าด้วยกัน ส่วนไวร์เลสแลนการ์ด (Wireless LAN Card) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เสียบเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ติดต่อกับแอ็กเซสพอยต์ และภายในอุปกรณ์ทั้งสองจะมีภาครับ-ส่งสัญญาณวิทยุ และสายอากาศเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ

ดังนั้นโครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาออกแบบสายอากาศที่ใช้สำหรับติดต่อสื่อสารของระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งจะเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับ (Array antenna) และทำการออกแบบให้มีการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง โดยสายอากาศใช้งานที่ย่านความถี่ 2.4 GHz - 2.5 GHz

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาจากภาคทฤษฎีมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นชิ้นงานที่สามารถใช้งานได้
- 2) ศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศสำหรับใช้งานในเครือข่ายไร้สาย (Wireless LAN) ได้แก่ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern) อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing-Wave Ratio; SWR) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss; S_{11}) และค่าอัตราขยาย (Gain)
- 3) ศึกษาการทำงานและการใช้งานของโปรแกรมคำนวณ IE3D เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศที่ใช้งานในเครือข่ายไร้สาย
- 4) สร้างสายอากาศที่ได้ศึกษาโดยใช้โปรแกรม IE3D ทำการวัดทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการฉบับนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศที่มี เป้าหมายการประยุกต์ใช้งานเพื่อเป็นสายอากาศ สำหรับเครือข่ายไร้สาย (Wireless LAN)

การวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศ

1.3.1 เนื่องจากความถี่สำหรับเครือข่ายไร้สายอยู่ในช่วง 2.4 – 2.5 GHz จึงเลือกวิเคราะห์ที่ ความถี่ 2.45GHz ซึ่งความถี่ดังกล่าวเป็นความถี่กลางที่ใช้งานสำหรับเครือข่ายไร้สาย

1.3.2 ศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบไดโพล ที่ความถี่ 2.4 – 2.5 GHz ได้แก่ ค่าการ สูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: S_{11}) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR) ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) และค่า อัตราขยาย(Gain) ของ สายอากาศ

1.3.4 สร้างสายอากาศต้นแบบและทดสอบคุณลักษณะตามค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ของ สายอากาศเพื่อเปรียบเทียบ วิเคราะห์ สรุป และยืนยันผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม IE3D

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

- 1.4.1 ศึกษาพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่างๆ ของสายอากาศ
- 1.4.2 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม IE3D เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศ
- 1.4.3 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม IE3D
- 1.4.4 สร้างสายอากาศต้นแบบและทำการวัดทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม IE3D
- 1.4.5 สรุปผลการทำงาน

บทที่ 2

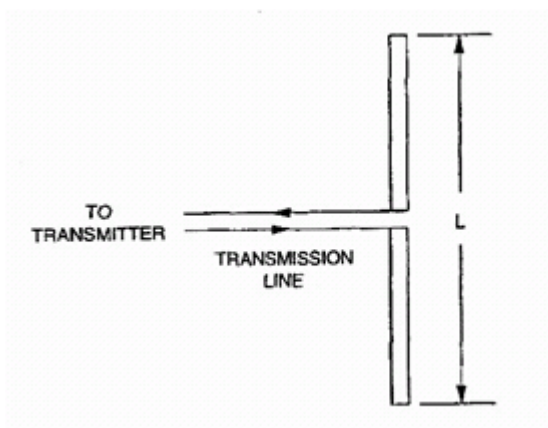
ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ

2.1 สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna)

สายอากาศไดโพลและไดโพลอุดมคติ

สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) เป็นสายอากาศอย่างง่าย ที่มีองค์ประกอบเป็นแท่งโลหะ 2 แท่งวางเป็นแนวเส้นตรงที่มีความยาว L ดังรูปที่ 2.1.1 โดยจุดกึ่งกลางของตัวไดโพลจะต่อเข้ากับเครื่องส่งโดยใช้สายส่งเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อเครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสลับไปยังสายอากาศ กระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังขั้วหนึ่งของไดโพล และไหลกลับมายังอีกขั้วหนึ่งของไดโพล ดังแสดงในรูปที่ 2.1.1 ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังขั้วแรกของไดโพล

การกระจายของกระแส (Current Distribution) จะแสดงให้เห็นขนาด (Magnitude) ของสัญญาณกระแสลับที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของสายอากาศไดโพลจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยจะเป็นศูนย์ที่ปลายทั้งสอง แต่จะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดอื่น ๆ บนตัวไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากเครื่องส่ง



รูปที่ 2.1.1 สายอากาศไดโพล

ไดโพลอุดมคติ (Ideal Dipole) เป็นสายอากาศสมมติซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาสายอากาศชนิดอื่น ๆ สามารถพิจารณาให้เป็นองค์ประกอบเล็ก ๆ ของความยาวไดโพล (Infinitesimal Dipole) ที่มีการแจกแจงกระแสที่มีลักษณะที่เท่ากันตลอด คุณสมบัติทางทฤษฎีของไดโพลอุดมคติจะประมาณให้มีค่าทางไฟฟ้าเท่ากับสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็ก ๆ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

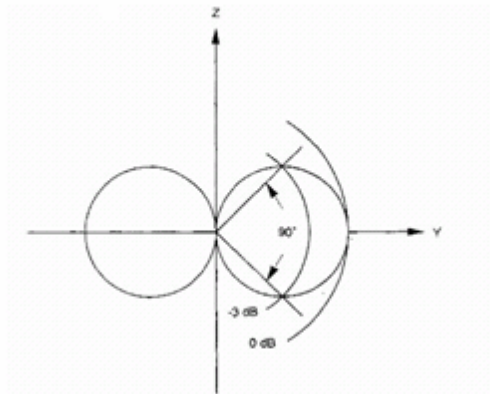
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นการแสดงทางกราฟ 3 มิติของสนามระยะไกล คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นฟังก์ชันของพิกัดว่าง (Space Coordinates) บริเวณของสนามระยะไกล คือ บริเวณที่ไกลเพียงพอสำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับระยะที่อยู่ห่างจากสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศใดๆ สามารถที่จะทราบได้ด้วยการวัดทดลองและจากการคำนวณ ถ้าเราทราบลักษณะการกระจายของกระแสบนตัวสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายพลังงานออกไปตามฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับความสัมพันธ์ของกำลังงานที่ส่งออกไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทางถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การแพร่กระจายคลื่น” กับแบบรูปที่ใช้กับสายอากาศสายส่ง แต่ความจริงมันเป็นแบบรูปเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็นสายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีบทภาวะย้อนกลับ (Reciprocity theorem)

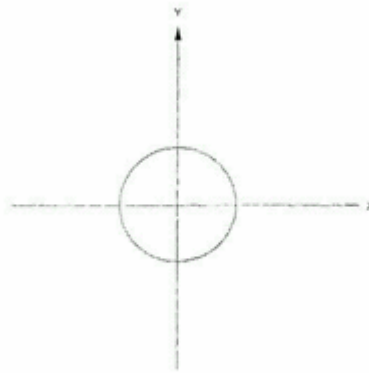
ถึงแม้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานกันเพียง 2 มิติก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้ การวัดในแต่ละมิติจะวัดในแต่ละระนาบที่ตั้งฉากกัน คือ ระนาบที่ขนานกับสนามไฟฟ้าและระนาบที่ขนานกับสนามแม่เหล็ก

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบหนึ่ง ๆ สามารถวัดได้โดยการหมุนสายอากาศในระนาบนั้น ๆ ขณะที่ระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศ และเพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ถูกต้อง จึงต้องจัดสภาพแวดล้อมโดยรอบสายอากาศที่จะทำการวัดไม่ให้มีวัตถุใด ๆ ที่จะทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

รูปที่ 2.1.2 ได้แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของไดโพลอุดมคติ ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าไดโพลอุดมคตินั้นมีทิศทางด้วยเหมือนกัน เพราะว่า การแพร่กระจายคลื่นจะมีความแรงของสัญญาณ สูงในบางทิศทางเมื่อเทียบกับทิศทางอื่น ๆ



รูปที่ 2.1.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของไดโพลอุดมคติ
ตามหลักทฤษฎีระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane)



รูปที่ 2.1.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของไดโพลอุดมคติ
ตามหลักทฤษฎีระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane)

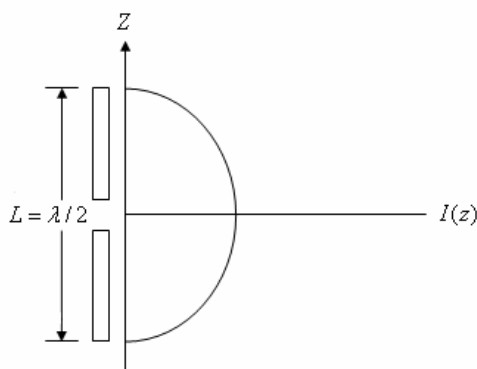
ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (Half-Power Beamwidth: HPBW) ของสายอากาศคือการแยกมุมต่างๆ ในลำคลื่นหลัก โดยคิดที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB) ของกำลังงานที่แพร่ออกในทิศทางของกำลังงานสูงสุด

$$\text{HPBW} = | \theta_{\text{HPBW, left}} - \theta_{\text{HPBW, right}} |$$

ค่า HPBW ของไดโพลอุดมคติในระนาบสนามไฟฟ้า E-Plane จะเท่ากับ 90° ซึ่งดูได้จากรูปที่ 2.1.2

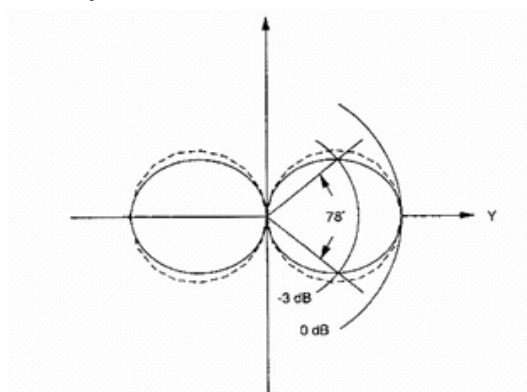
สำหรับสายอากาศไดโพลในทางปฏิบัติที่มีความยาว L ซึ่งได้ใช้กันทั่วไปจะมีขนาดความยาว $\lambda/2$, λ และ $3\lambda/2$ ค่า λ เป็นค่าความยาวคลื่นของสัญญาณ กระแสที่กระจายบนไดโพล

$\lambda/2$ จะมีรูปร่างของสัญญาณเป็นรูปไซน์ครึ่งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.1.4 โดยกระแสนี้จะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางและมีค่าศูนย์ที่จุดปลายสุด



รูปที่ 2.1.4 การกระจายของกระแสในไดโพล $\lambda/2$

รูปที่ 2.1.5 ได้แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งจากสายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และในไดโพลอุดมคติ โดยสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ มี HPBW 78 องศา ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และให้ผลที่แคบและบางกว่าลักษณะของสายอากาศไดโพลอุดมคติ ส่วนการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ จะมีลักษณะเป็นวงกลมดังรูปที่ 2.1.5

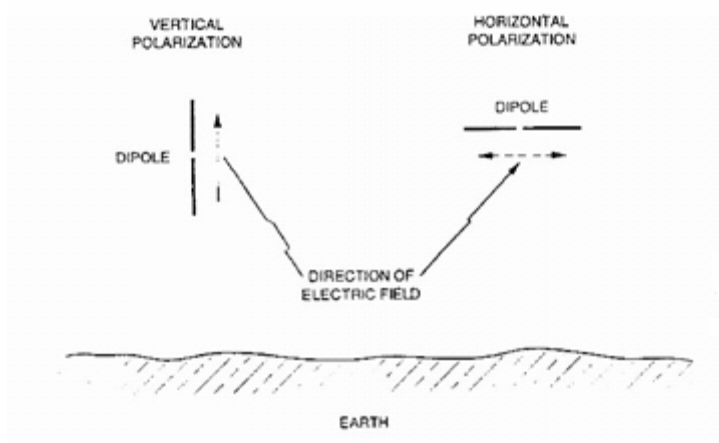


รูปที่ 2.1.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ (เส้นทึบ)และไดโพลอุดมคติ (เส้นประ)

การโพลาไรซ์ของสายอากาศ (Antenna Polarization)

การโพลาไรซ์ของสายอากาศจะอธิบายทิศทางของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศซึ่งถูกส่งออกไปโดยตัวสายอากาศในสนามระยะไกลจริงๆ แล้วก็คือ ใช้ในการอธิบายทิศทางซึ่งมีความเข้มของสนามสูงสุด สายอากาศส่วนใหญ่จะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) นั่นคือในหนึ่งรอบ (Cycle) การขจัดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ในอากาศว่าง สายอากาศดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็นโพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical Polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (Horizontal Polarization) นอกจากนี้ยังมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular) และแบบรูปวงรี (Elliptical)

บ่อยครั้งที่การโพลาไรซ์ของสายอากาศ จะอ้างอิงจากรูปทรงของตัวมันเอง เช่น ในกรณีของสายอากาศแบบเส้นลวด ซึ่งอาจจะประกอบด้วยองค์ประกอบเพียงตัวเดียว หรือหลายตัววางขนานกัน (เช่นสายอากาศไดโพลและยาคิ) เราสามารถที่จะสมมติให้สนามไฟฟ้าซึ่งเป็นโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นให้ขนานไปกับองค์ประกอบของตัวสายอากาศ ซึ่งสายอากาศบางชนิดมีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเหมือนกัน แต่ไม่สามารถจะใช้รูปทรงของมันมาทำการทำนายถึงการโพลาไรซ์ของมันได้ ได้แก่ สายอากาศปากแตร (Horn) แบบบ่วง (Loop) และแบบร่อง (Slit) เป็นต้น



รูปที่ 2.1.6 การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล

เพื่อให้การรับสัญญาณทำได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ สิ่งสำคัญก็คือสายอากาศที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะต้องมีการโพลาไรซ์แบบเดียวกันกับสัญญาณที่ส่งมา และเมื่อเกิดการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากการจัดวางการโพลาไรซ์ไม่ถูกต้อง (เช่น สัญญาณที่รับได้เป็นของการ

โพลาริซั้ทางแนวตั้ง แต่สายอากาศที่ใช้มีการจัดการโพลาริซั้ทางแนวนอน) เราจะเรียกว่า การแยกการโพลาริซั้ไขว้ (Cross – Polarization Isolation)

2.2 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna)

Microstrip Antenna คือ สายอากาศแบบไมโครสตริป เป็น Antenna ที่มีวิธีการและทฤษฎีที่ดีกว่า Antenna ชนิดอื่นๆ โดยใช้แผ่น copper หรือแผ่น Dielectric substrates ที่มีขนาดกว้างยาวคงที่ และได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในปัจจุบัน

คุณสมบัติที่พิเศษกว่า Antenna ชนิดอื่นๆ มีดังนี้

- น้ำหนักเบา
- ขนาดเล็ก
- สามารถนำมาดัดแปลงรูปร่างให้สมดุลยได้
- ราคาถูก
- การผลิตง่าย
- สามารถทำให้บางได้
- ไม่มีเสียงรบกวนจากเครื่องบินหรือยานต่าง ๆ
- สามารถดัดแปลงใช้ในการนำวิถีจรวดหรือดาวเทียมได้
- มีค่า scattering cross section ต่ำ
- แพร่กระจายคลื่นได้ทั้งแบบเส้นตรงและวงกลม
- สามารถรวมกับความถี่อื่นๆได้
- ไม่ต้องมี cavity backing

ข้อเสียของ Microstrip antenna

- แบนด์วิธแคบ (Narrow bandwidth)
- มีการสูญเสียมากซึ่งส่งผลให้ได้อัตราขยาย (Gain) ต่ำ
- สายอากาศไมโครสตริปส่วนใหญ่จะมีการแผ่กระจายคลื่นเพียงครึ่งระนาบ
- มีอัตราขยายสูงสุด (maximum gain) ไม่เกิน 20 dB

ซึ่งคาดว่าต่อไปในอนาคตจะมีการนำ Microstrip Antenna มาใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้น

เนื่องจากความหนาของ Microstrip บางมาก คลื่นที่เกิดขึ้นภายในสาร Dielectric (คือสารที่อยู่ระหว่าง Patched Antenna และ Ground Plane) สามารถพิจารณาได้จากการสะท้อนกลับของคลื่น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงขอบของ Strip ซึ่งเป็นเพียงกลุ่มเล็กๆที่แสดงถึง พลังงานที่ถูกแผ่กระจาย (Fringing Field) ดังนั้น Antenna ที่พิจารณาจึงมีประสิทธิภาพต่ำ

2.3 สายอากาศแบบแถวลำดับ (Array Antenna)

แถวลำดับของสายอากาศ (Antenna Array) หมายถึง การนำเอาสายอากาศหลายๆ ตัวมาจัดวางเรียงกัน โดยมีระยะห่างที่แน่นอน โดยสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น จะเรียกว่า องค์ประกอบ (Element) ซึ่งการนำเอาองค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ จะให้สมรรถนะคล้ายคลึงกับสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่มาก แต่การจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้นจะสามารถขจัดปัญหาในเรื่องของกลไกต่างๆ อันเนื่องมาจากขนาดที่ใหญ่เกินไปของสายอากาศได้

ข้อดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับจะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้นอกจากนี้สายอากาศแบบแถวลำดับยังสามารถปรับขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบได้อีกด้วย ซึ่งทำให้สามารถปรับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นไปตามที่เราต้องการในการใช้งานแต่ละประเภทได้

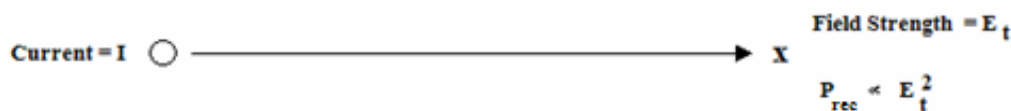
เราสามารถแบ่งการจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับตามรูปร่าง ได้หลายประเภท เช่น แถวลำดับแบบเชิงเส้น (Linear Array) จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบจำนวนมากที่จัดเรียงกันอย่างสมมาตรเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของแถวลำดับในแนวเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะระหว่างองค์ประกอบห่างเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ประเภทต่อไปก็คือ แถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array) จะเป็นการจัดเรียงองค์ประกอบในลักษณะสองมิติบนแผ่นระนาบ ซึ่งการจัดเรียงแถวลำดับในลักษณะนี้ อาจจัดเรียงในลักษณะของสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือรูปร่างกลมก็ได้โดยขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่มีอยู่

ค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ (Gain of Array Antennas)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางรวมทั้งค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับ มักจะมีค่ามากกว่ากรณีของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งคุณสมบัตินี้มีประโยชน์อย่างมากทั้งในการส่งและรับสัญญาณ ในการส่งสัญญาณนั้น สายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีจะสามารถรวบรวมกำลังงานให้อยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ ได้ ซึ่งให้ผลเสมือนว่าเกิดการเพิ่มกำลังงานให้กับจุดนั้นๆ ของเครื่องส่ง ส่วนทางด้านรับ สายอากาศจะทำหน้าที่เสมือนว่าเลือกรับคลื่นที่เข้ามาในทิศทางที่เจาะจง โดยจะไม่เลือกรับสัญญาณที่เราไม่ต้องการรวมทั้งการแทรกสอดจากทิศทางอื่นๆ

เพื่อความเข้าใจเกี่ยวกับการเพิ่มค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ ในเบื้องต้นจะพิจารณาองค์ประกอบเดี่ยวของสายอากาศไอโซทรอปิกซึ่งมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงาน P_1 ดังแสดงในรูปที่ 2.3.1 โดยกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศนี้มีค่า I_1 ณ จุดที่ไกลออกไป

กำหนดให้เป็นจุด X ค่ากระแสนี้จะสร้างความเข้มของสนาม (ศักดาไฟฟ้า) เป็น E_1 ซึ่งค่านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศ

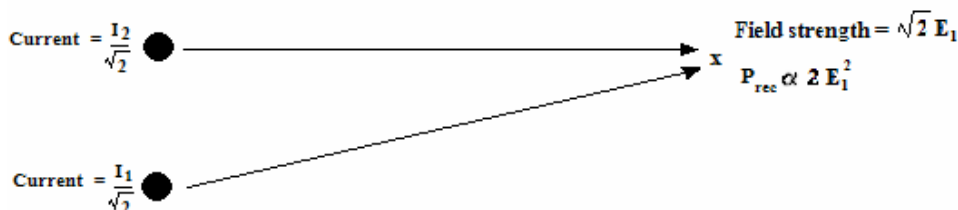


รูปที่ 2.3.1 สายอากาศองค์ประกอบเดียวที่มีการส่งกำลังงาน P_1

ค่ากำลังงานที่รับได้โดยสายอากาศที่จุด X จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของความเข้มสนาม ทั้งหมด E_T ที่จุดนั้น กล่าวคือ

$$P_{rec} \propto E_t^2 = E_1^2 \quad \text{-----} \quad (2.3-1)$$

ต่อไปจะแทนองค์ประกอบเดี่ยวด้วยสายอากาศชนิดแถวลำดับ ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบไอโซทรอปิกที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 องค์ประกอบ และมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงานที่เท่ากันทั้งหมด คือ P_1 ดังแสดงในรูปที่ 2.3.2



รูปที่ 2.3.2 สายอากาศซึ่งมีสององค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1

ค่ากำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแต่ละองค์ประกอบจะเท่ากับ $P_1/2$ แต่เนื่องจากค่าของกระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของกำลังงาน ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบจึงเท่ากับ $I_1/\sqrt{2}$

ความเข้มของสนามที่จุด X ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาจากแต่ละองค์ประกอบจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบนั้น ดังนั้นความเข้มของสนามที่จุด X จากแต่ละองค์ประกอบจะเท่ากับ $E_1/\sqrt{2}$ และถ้าคลื่นจากทั้งสององค์ประกอบมาถึงที่จุด X โดยมีเฟสตรงกันอย่างสมบูรณ์ ความเข้มของสนามทั้งหมด E_T ที่จุด X จะเป็นผลรวมของความเข้มของสนามดังนี้

$$E_T = 2E_1 / \sqrt{2} = \sqrt{2} E_1 \quad \text{-----} \quad (2.3-3)$$

กำลังงานทั้งหมดที่รับได้จะเท่ากับ

$$P_{rec} \propto E_1^2 = (\sqrt{2} E_1)^2 = 2E_1^2 \quad \text{-----} \quad (2.3-3)$$

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสมการ (2.3-1) และสมการ (2.3-3) จะเห็นว่ากำลังสองของค่าความเข้มของสนามทั้งหมด ที่จุด X จะมีค่าเป็นสองเท่า ด้วยเหตุผลนี้สามารถแสดงได้ว่าค่ากำลังงานที่รับได้ที่จุด X ก็จะมีค่าเป็นสองเท่า ดังนั้นเมื่อใช้แอมพลิจูดที่มีองค์ประกอบสององค์ประกอบแทนองค์ประกอบเดียวจะทำให้ได้ค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานมีค่าเป็นสองเท่า

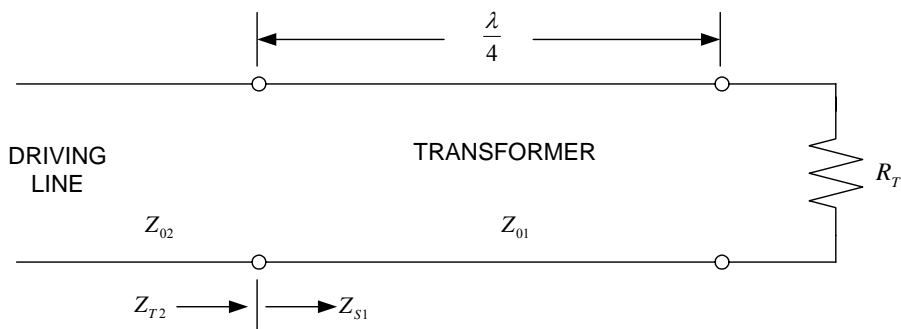
ความสัมพันธ์ที่กล่าวมาทั้งหมดในตัวอย่างจะถูกพิจารณาภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. องค์ประกอบของสายอากาศทุกตัวจะต้องมีลักษณะเหมือนกันและมีกระแสเท่ากัน
2. สนามที่แผ่กระจายออกจากองค์ประกอบของสายอากาศทั้งหมดจะต้องมีเฟสตรงกันที่จุดรับ
3. กระแสที่เหนี่ยวนำในแต่ละองค์ประกอบจะไม่ถูกนำมาพิจารณา

สำหรับสายอากาศแอมพลิจูดในทางปฏิบัติ เงื่อนไขเหล่านี้จะเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น แม้ว่าการสูญเสียซึ่งเกิดจากการป้อนสัญญาณและจากตัวประกอบอื่นๆ จะมีส่วนในการจำกัดการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราขยาย แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเหล่านี้จะดีขึ้นเมื่อจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปพบว่าค่าอัตราขยายของแอมพลิจูดจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า (เพิ่มขึ้นประมาณ 3 dB) ทุกๆ ครั้งที่จำนวนองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเช่นกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบถูกกำหนดไว้ให้คงที่

2.4 การออกแบบตัวป้อนสัญญาณ (Feed Network)

การออกแบบตัวป้อนสัญญาณ Feed Network เราจะประยุกต์ทฤษฎีการแปลงอิมพีแดนซ์ของสายส่งความยาว $\lambda/4$ ($\lambda/4$ impedance transformer) ซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) สมมุติว่าเรามีความประสงค์จะแมตซ์โหลดที่มีความต้านทานเข้ากับสายส่งเส้นหนึ่งเราจะใช้ตัวแปลงซึ่งเป็นสายที่มีความยาว $\lambda/4$ ต่อเข้าระหว่างโหลดกับสายส่งเพื่อทำให้เกิดการแมตซ์ ดังรูปที่ 2.4.1



รูปที่ 2.4.1 การแมตช์โดยใช้การแปลงอิมพีแดนซ์ของสายส่งความยาว $\lambda/4$

ในการแปลงค่าอิมพีแดนซ์โดยกำหนดหาอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายขนาด $\lambda/4$ เป็นสมการได้ดังนี้

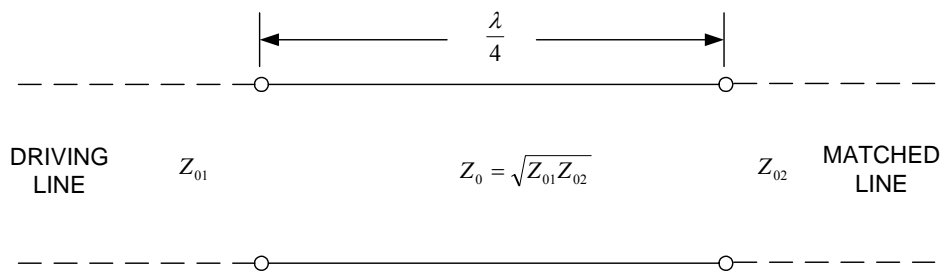
$$Z_{s1} = \frac{Z_{01}^2}{R_T} \quad \text{————— (2.4-1)}$$

และสายตัวแปลงจะต้องมีอิมพีแดนซ์ลักษณะเป็น

$$Z_{01} = \sqrt{Z_{02} R_T} \quad \text{————— (2.4-2)}$$

ในทางปฏิบัติส่วนมาก R_T ก็คืออิมพีแดนซ์ที่ต้นสายของสายที่แมตช์แล้วอีกเส้นหนึ่งดังรูปที่ 2.4.2 และสมการที่ (2.4-2) จะเปลี่ยนเป็นดังนี้

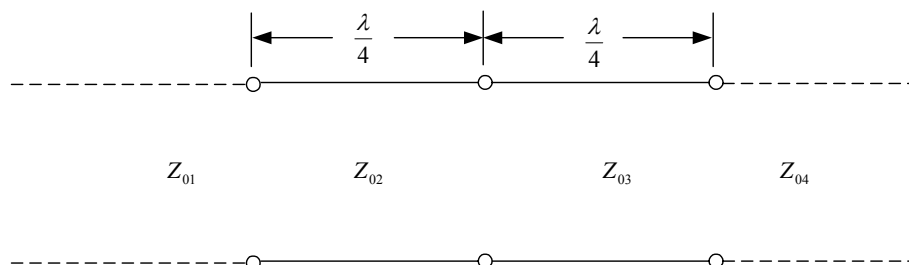
$$Z_0 = \sqrt{Z_{01} Z_{02}} \quad \text{————— (2.4-3)}$$



รูปที่ 2.4.2 การแมตช์สายส่งเข้าด้วยกัน

ในกรณีที่โหลดอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อน เราจะต้องเลือกตำแหน่งที่ต่อสายตัวแปลงแทรกกลงไปในลักษณะอิมพีแดนซ์ที่แปลงมาจากโหลดเป็นค่าจริง คือมีแต่ความต้านทานอย่างเดียว สายตัวแปลง $\lambda/4$ เป็นองค์ประกอบที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ถ้าความถี่เปลี่ยนไปจากความถี่เรโซแนนต์ (Resonant Frequency) หรือค่า $\lambda/4$ แล้วอิมพีแดนซ์ที่ต้นสายของสายตัวแปลงจะเปลี่ยนจากค่าที่แมตช์ เมื่อเป็นเช่นนี้สายหลักจะไม่แมตช์ (Mismatch) ขนาดของความไม่แมตช์ซึ่ง

เราขอให้มีได้เป็นตัวบอกความกว้างแถบคลื่นที่ได้โดยใช้วิธีต่อสายตัวแปลงหลายๆ เส้นเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2.4.3



รูปที่ 2.4.3 ระบบการแมตช์โดยใช้สายตัวแปลง $\lambda/4$ สองเส้นต่อพ่วงกัน

เมื่อต้องการแก้ปัญหาเกี่ยวกับสายส่ง ซึ่งประกอบด้วยสายหลายเส้นต่อเรียงกันโดยใช้แผนภูมิสมิท (Smith chart) เข้าช่วยนั้น เราจะต้องทำอิมพีแดนซ์ให้เป็นบรรทัดฐานด้วยอิมพีแดนซ์ลักษณะ อิมพีแดนซ์ที่ต้นสายเส้นหนึ่งก็คือโหนดอิมพีแดนซ์ของสายที่อยู่ถัดไปทางตัวกำเนิดสัญญาณ

การประยุกต์ทฤษฎีการแปลงอิมพีแดนซ์ของสายส่งความยาว $\lambda/4$ ($\lambda/4$ impedance transformer) ในการทำโครงงานนี้จะเป็นการออกแบบ Feed Network บนแผ่น PCB ซึ่งจะใช้ทองแดงเป็นตัวนำสัญญาณแทนสายส่ง โดยการออกแบบในโครงงานนี้จะออกแบบเป็นแบบ 2-way power divider และ 4-way power divider ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.4.4 และ 2.4.5 ตามลำดับ

ซึ่งต้องทำการออกแบบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ และขนาดของสายทองแดงที่จะนำไปทำหน้าที่เป็นสายส่ง โดยจะทำการแมตช์กับสายอากาศที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม การออกแบบค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณเราจะใช้ทฤษฎีการแปลงอิมพีแดนซ์ของสายส่งความยาว $\lambda/4$ นั่นคือการออกแบบโดยใช้สมการที่ (2.4-3) โดยมีการออกแบบดังนี้

จากสมการ (2.4-3)

$$Z_0 = \sqrt{Z_{01}Z_{02}}$$

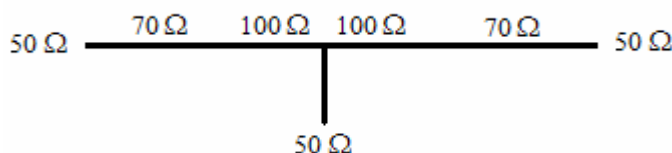
กำหนดค่า Z_{01} = อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (input impedance)

Z_{02} = อิมพีแดนซ์ด้านออก (output impedance)

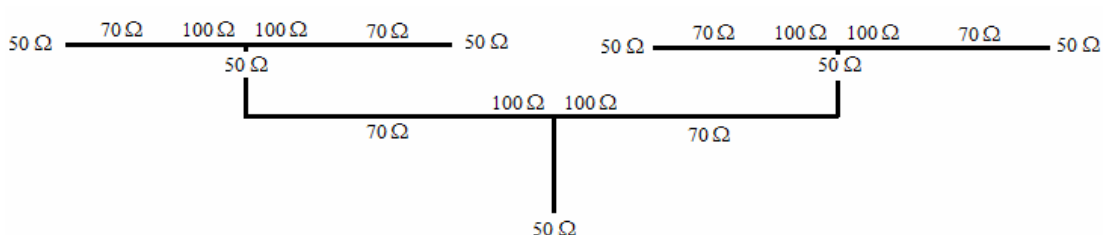
Z_0 = อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteris impedance)

ในการออกแบบเราต้องการให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) มีค่า 50 โอห์ม เพื่อให้แมตช์กับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และให้อิมพีแดนซ์ด้านออก (output impedance) มีค่า 100 โอห์ม เพราะฉะนั้น จะได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteris impedance) ประมาณ 70 โอห์ม

โดยการออกแบบในโครงงานนี้จะออกแบบเป็นแบบ 2-way power divider และ 4-way power divider ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.4.4 และ 2.4.5 ตามลำดับ

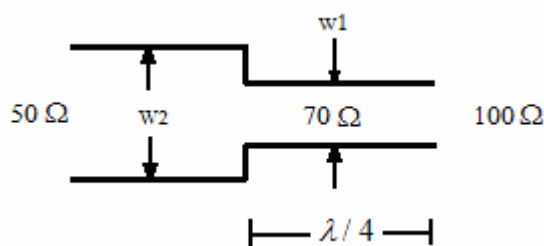


รูปที่ 2.4.4 แสดงลักษณะของ ตัวป้อนสัญญาณ แบบ 2-way power divider



รูปที่ 2.4.5 แสดงลักษณะของตัวป้อนสัญญาณ แบบ 4-way power divider

ในการออกแบบขั้นต่อไปจะเป็นการออกแบบขนาดของลายทองแดงของแผ่นปรินต์ที่จะทำหน้าที่แทนสายส่ง โดยที่ขนาดของลายทองแดงที่ค่าอิมพีแดนซ์ต่างกันขนาดของลายทองแดงก็จะต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.4.6 โดยใช้หลักการ Wave Guide Microstrip เพื่อคำนวณขนาดของลายทองแดงโดยจะแสดงในสมการที่ (2.4-4) และ (2.4-5)



รูปที่ 2.4.6 ลักษณะของขนาดของลายทองแดงที่ใช้แทนสายส่ง

$$H' = \frac{Z_0 \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right) \quad \text{----- (2.4-4)}$$

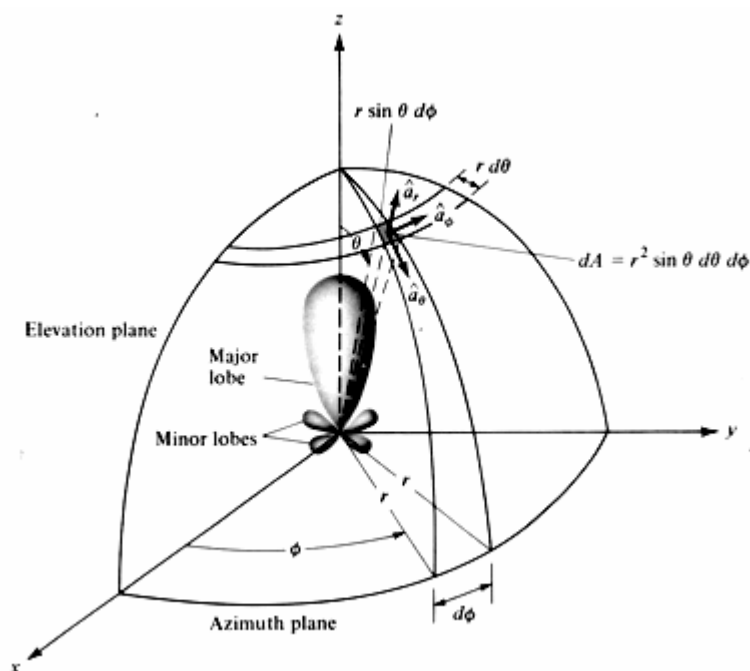
$$\frac{W_1}{h} = \left(\frac{(\exp H')}{8} - \frac{1}{4 \exp H'} \right)^{-1} \quad \text{----- (2.4-5)}$$

จากสมการที่ (2.4-4) และ (2.4-5) จะพบว่ามีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 ตัว คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (character impedance) ของสายส่ง (Z_0), ค่า (Relative dielectric: ϵ_r) ของ Substrate และค่าความสูงของ Substrate (h) ซึ่งในที่นี้เป็นการออกแบบบนแผ่นปรินต์ ซึ่งมี Substrate เป็นแผ่น FR4 ซึ่งจะมีค่า Relative dielectric ประมาณ 4.4 และมีความสูงประมาณ 1.6 มิลลิเมตร

2.5 พารามิเตอร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศ

2.5.1 แบบรูปการแผ่กำลังงาน (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่กำลังงานหรือแบบรูปกระจายคลื่นของสายอากาศ ได้ถูกนิยามว่า “เป็นการนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานของสายอากาศในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นในรูปพิกัดตำแหน่ง (Space coordinate) ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่กำลังงานจะต้องกระทำในบริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) เท่านั้น และจะนำเสนอในรูปฟังก์ชันของพิกัดทิศทาง (Directional coordinate) เสมอ” คุณสมบัติของการแผ่กำลังงาน สามารถที่จะแสดงในรูปของการกระจายพลังงานในแต่ละตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติและสามมิติซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของผู้สังเกตตลอดเส้นทางหรือผิวของทรงกลมที่มีรัศมีคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5.1

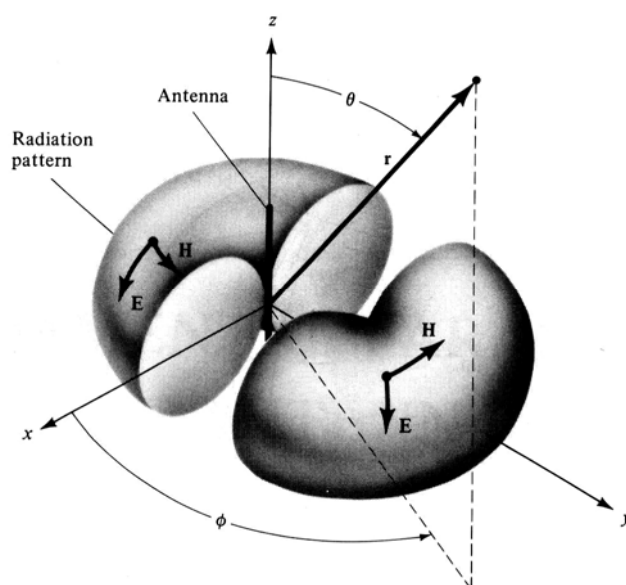


รูปที่ 2.5.1 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศ

เส้นการกวาดของกำลังงานที่รับได้ที่ตำแหน่งรัศมีคงที่จะถูกเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Field Pattern) และอีกวิธีหนึ่ง ถ้าเป็นแบบรูปที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กตามฟังก์ชันของตำแหน่ง เราจะเรียกว่า แบบรูปแอมพลิจูดของสนาม (Amplitude

Field Pattern) ในทางปฏิบัตินั้น แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบสามมิติ จะถูกวัดและบันทึกในรูปของแบบรูปสองมิติโดยการพล็อตแบบรูปตามฟังก์ชันของมุม θ และ ϕ ให้สัมพันธ์และต่อเนื่องกัน แบบรูปแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) แบบมีทิศทาง (Direction) และแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirection)

ตัวแผ่กำลังงานแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) คือ “สายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นมาว่าไม่มีการสูญเสียภายในตัวเองและมีการแผ่กำลังออกมาเท่ากันทุกทิศทาง” ถึงแม้ว่าตัวแผ่กำลังงานแบบนี้จะไม่มีจริงในทางปฏิบัติ แต่ก็มีประโยชน์ในการนำมาใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อหาคุณสมบัติของสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่มีอยู่จริง สำหรับสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) คือ “สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานหรือรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ” ซึ่งคำนี้มักจะนำมาใช้กับสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (Maximum Directivity) มากกว่าจะใช้กับสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศใดโพลความยาวครึ่งคลื่น (Half-wave Dipole) ซึ่งตัวอย่างของสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กำลังงานแบบมีทิศทาง ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.5.2 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ในระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) นั้นแบบรูปการแผ่กำลังงานจะไม่มีทิศทาง แต่ส่วนที่มีทิศทางจะอยู่ในระนาบมุมยก (Elevation Plane) ซึ่งเราเรียกแบบรูปการแผ่กำลังงานชนิดนี้ว่าเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Pattern) โดยมีนิยามว่า “เป็นแบบรูปการแผ่กำลังงานที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้ ในที่นี้คือมุมกวาด (Azimuth) และระนาบที่อยู่ตั้งฉากกันจะมีแบบรูปการแผ่กำลังงานเป็นแบบมีทิศทาง ในกรณีนี้คือมุมยก (Elevation)”



รูปที่ 2.5.2 แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายกำลังงานออกไปตามฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับสัมพัทธ์ของกำลังงานที่ส่งออกไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การแผ่กระจายกำลังงาน” กับแบบรูปที่ใช้กับสายอากาศส่ง แต่ความจริงจะเป็นแบบรูปอันเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็นสายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) ถึงแม้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานกันเพียง 2 มิติ ก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้

ในทางปฏิบัติแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบหนึ่งๆ สามารถวัดได้โดยการหมุนสายอากาศในระนาบนั้นๆ ขณะที่ระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศ เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ถูกต้องควรที่จะจัดสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบสายอากาศที่จะทำการวัดให้ปราศจากวัตถุใดๆ ที่อาจจะทำให้เกิดการสะท้อนสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

2.5.2 อัตราขยาย (Gain)

ค่าอัตราขยายของสายอากาศ สามารถพิจารณาได้ 2 กรณีคือ

1. อัตราขยายจริง (Absolute Gain) ของสายอากาศ (ในทิศทางที่กำหนดให้) หมายถึงอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้รับเข้ามา

2. อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative Gain) หมายถึง อัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ก็คือ สายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Isotropic Source) และสายอากาศแบบไดโพล

2.5.3 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance)

ค่าอิมพีแดนซ์อินพุต (Input Impedance) ของสายอากาศคือเป็นค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วด้านเข้าของสายอากาศ หรือเป็นอัตราส่วนของแรงดันกับกระแสที่ขั้วของสายอากาศ หรือเป็นอัตราส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จุดหนึ่งๆ “ซึ่งใน

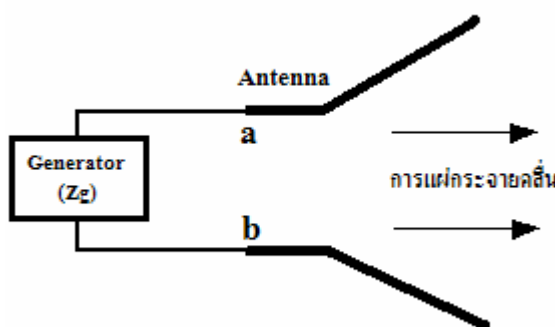
หน่วยนี้เราจะสนใจค่าอิมพีแดนซ์อินพุตที่ขั้วด้านเข้าของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.5.3” ในที่นี้คือ a-b อัตราส่วนของแรงดันกับกระแสที่ขั้วนี้ขณะไม่มีโหลดใดๆ ต่ออยู่ จะทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ

$$Z_A = R_A + jX_A$$

โดยที่ Z_A = ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a-b (โอห์ม)

R_A = ค่าความต้านทานของสายอากาศที่ขั้ว a-b (โอห์ม)

X_A = ค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a-b (โอห์ม)



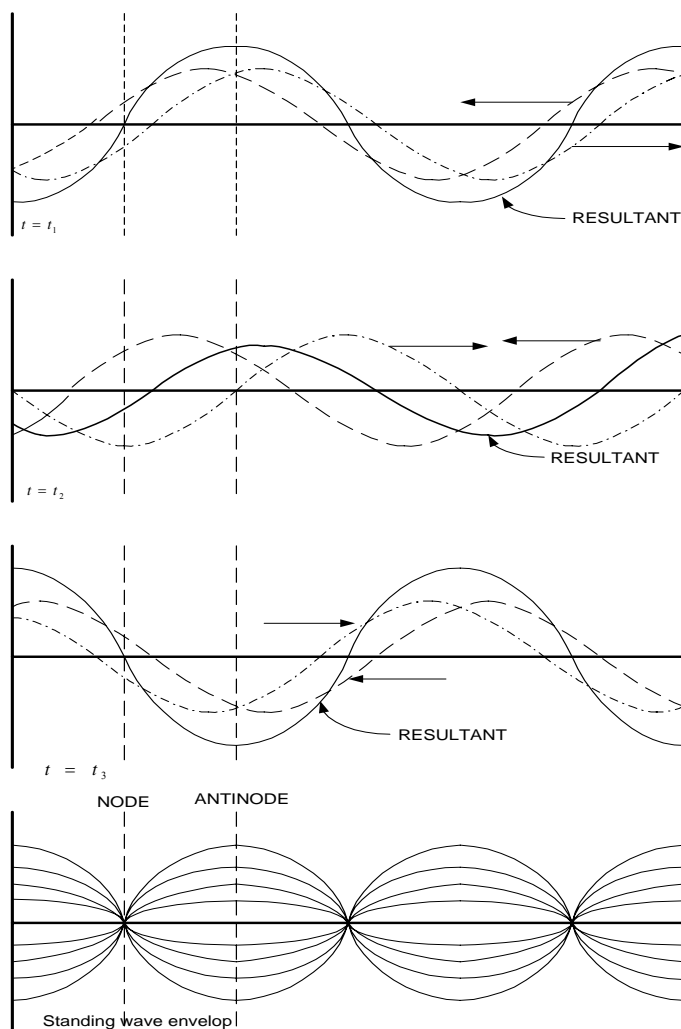
รูปที่ 2.5.3 สายอากาศในโหมดการส่ง

ปกติอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และจะแปรผันกับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่ช่วงหนึ่งๆเท่านั้น นอกจากนี้อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับแฟลคเตอร์ต่างๆอีก ได้แก่ รูปทรง วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะพบว่า ส่วนใหญ่จะหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลอง

ในการออกแบบสายอากาศนั้นต้องคำนึงถึงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ด้วย เนื่องจากสายส่งและตัว SMA Connector ที่ใช้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นเราควรออกแบบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้มีค่าเท่ากับ 50 โอห์มด้วย

2.5.4 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR)

ถ้าคลื่นที่มีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากันสองคลื่นเคลื่อนที่ในสายส่งในทิศทางตรงกันข้าม คลื่นทั้งสองจะรวมตัวและหักล้างซึ่งกันและกันสลับกันไป ผลที่ได้จะเป็นคลื่นนิ่ง (Standing Wave) รูปที่ 2.5.4 แสดงให้เห็นว่าคลื่นทั้งสองคลื่นรวมตัวเป็นคลื่นนิ่งได้อย่างไร สังเกตว่าจุดที่เกิดแรงดันสูงสุด และแรงดันต่ำสุดอยู่ที่เดิมเมื่อเทียบกับเวลา จุดที่คลื่นผ่านศูนย์ (Zero crossing) เรียกว่าปม (Node) และตำแหน่งที่เกิดแอมพลิจูดสูงสุดเรียกว่า ยอดโง่ง (Antinode)



รูปที่ 2.5.4 การก่อรูปคลื่นนิ่ง

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage standing wave ratio เขียนย่อว่า VSWR) ในสายส่งที่มีการสูญเสียพลังงานน้อยมีค่าจำกัดความเป็นอัตราส่วนของแรงดันที่มากที่สุดต่อแรงดันที่น้อยที่สุด เมื่อเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์

$$VSWR = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} \quad \text{-----} \quad (2.5-1)$$

เราสามารถให้ค่าจำกัดความ VSWR ให้เป็นค่าที่จุดๆ หนึ่ง ในสายโดยใช้ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนดังนี้

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad \text{_____ (2.5-2)}$$

$$|\Gamma| = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad \text{_____ (2.5-3)}$$

โดยที่ $|\Gamma|$ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด

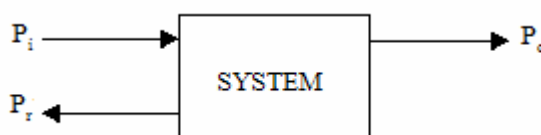
จากสมการ (2.5-3) จะพบว่า ถ้า $Z_1 = Z_0$ จะทำให้ $\Gamma = 0$ นั่นคือจะไม่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งจะส่งผลให้ค่า $VSWR = 1$ ซึ่งก็คือการแมตซ์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศนั่นเอง แต่ถ้า $Z_1 \neq Z_0$ จะทำให้ $\Gamma \neq 0$ ก็จะส่งผลทำให้ค่า $VSWR \neq 1$ นั่นคือจะเกิดการไม่แมตซ์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ ซึ่งถ้าค่า $VSWR$ มีค่ามากๆ ก็อาจส่งผลกระทบต่อเครื่องส่งทำให้เครื่องส่งเกิดความเสียหายได้ สำหรับค่า $VSWR$ ที่สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัตินั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 1.5

2.5.5 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss)

การสูญเสียหรือ Loss นั้นจะเกิดขึ้นทุกครั้งเมื่อระบบการสื่อสารของเราเริ่มทำงาน ซึ่งผลของมันอาจจะไม่เป็นที่ต้องการของเรา เพราะมันจะทำให้ระบบของเรามีประสิทธิภาพต่ำลงนั่นเอง โดยการสูญเสียในทางโทรคมนาคมที่เราจะกล่าวถึงในหัวข้อนี้คือ

- ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss)

ซึ่งการสูญเสียประเภทนี้มักจะเกิดขึ้นเมื่อมีการส่งสัญญาณข้อมูลเข้าไปในระบบดังรูปที่ 2.5.5



รูปที่ 2.5.5 แสดงการเกิดการย้อนกลับของกำลังงาน

จากรูป P_i คือ กำลังงานของสัญญาณอินพุต

P_r คือ กำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนกลับ

P_o คือ กำลังงานของสัญญาณเอาต์พุต

ซึ่งค่าของ และ Return loss สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Return loss} = -10 \log (P_r/P_i) \quad \text{—————} \quad (2.5-4)$$

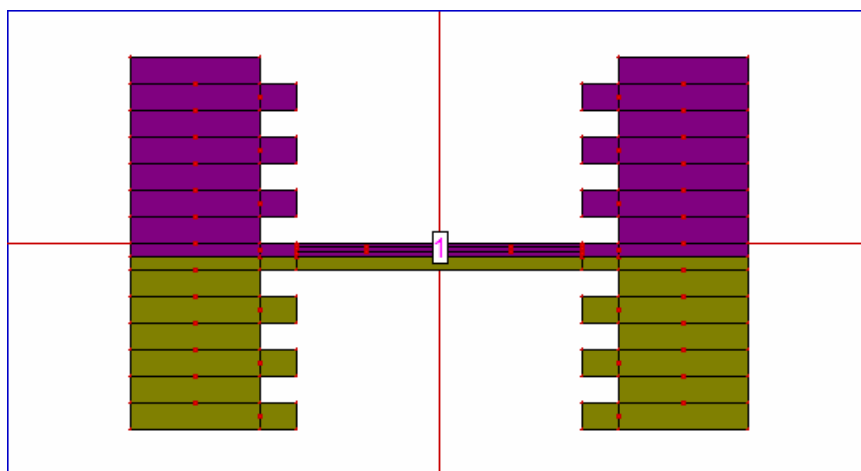
จากสมการจะเห็นว่าค่า Return loss คืออัตราส่วนของ P_r กับ P_i ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการส่งผ่าน ซึ่งแสดงได้ว่าถ้าค่า Return loss มาก ๆ จะยิ่งดีเนื่องจากจะมีประสิทธิภาพการส่งผ่านที่ดีนั่นเอง

บทที่ 3

การจำลองโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D

เนื้อหาในบทนี้ จะแสดงถึงการจำลองโครงสร้างของสายอากาศ และการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D สำหรับการจำลองโครงสร้างขนาดของส่วนต่างๆ ของสายอากาศอย่างละเอียดนั้นสามารถดูได้จากภาคผนวก ก. ซึ่งผลที่จะนำมาแสดงในบทนี้จะเป็น โครงสร้างของสายอากาศที่ใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz และกราฟที่แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: S_{11}) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR) ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) และค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ พร้อมทั้งการวิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากกราฟ

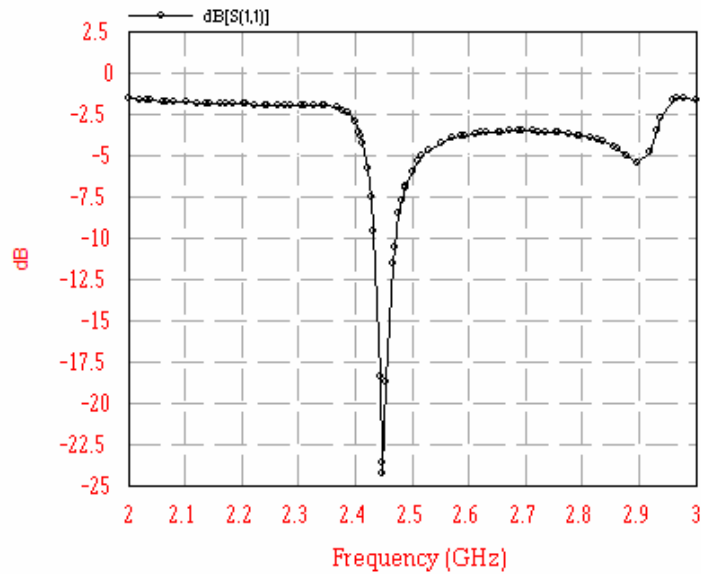
โครงสร้างสายอากาศแบบไดโพลบนฐานรอง PCB ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D แบบ 2 มิติ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D แบบ 2 มิติ

กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D

1. การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: S_{11})

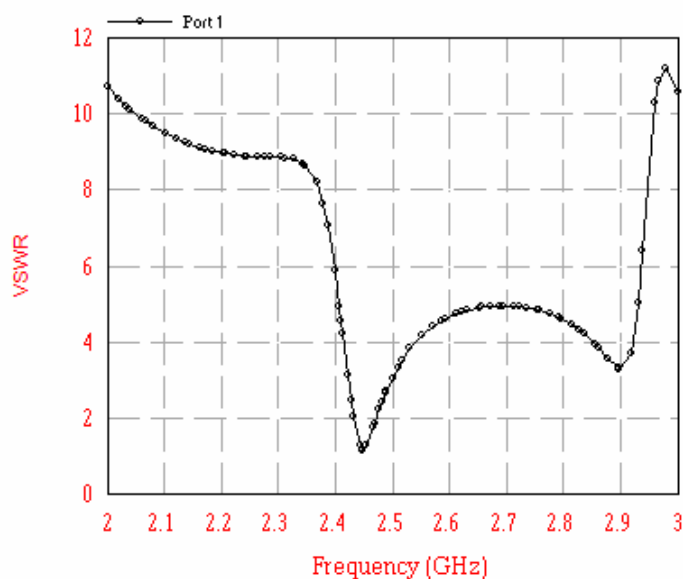


รูปที่ 3.2 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับ

วิเคราะห์กราฟ

ในทางทฤษฎี การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: S_{11}) ของสายอากาศที่จะสามารถนำไปใช้งานจริงได้นั้นจะต้องมีค่าต่ำกว่า -10 dB ซึ่งจากการที่ใช้โปรแกรม IE3D ในการออกแบบและวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นว่า ที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศนั้นมีค่าการสูญเสียย้อนกลับประมาณ -24 dB

2. ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR)

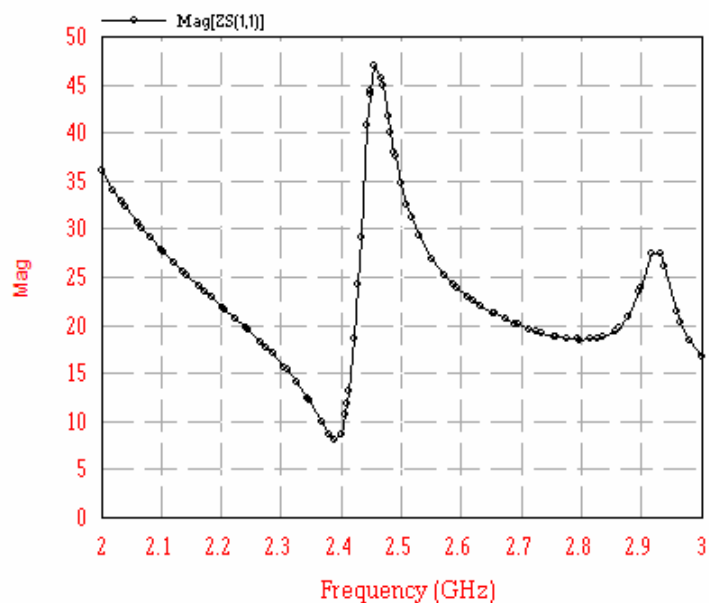


รูปที่ 3.3 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

วิเคราะห์กราฟ

ในทางทฤษฎี ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR) ของสายอากาศที่สามารถนำไปใช้งานจริงได้นั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 1.5 เพราะจะทำให้แรงดันของคลื่นสะท้อนนั้นมีค่าน้อยมากที่จะสะท้อนกลับเข้าไปในเครื่องส่ง ทำให้เครื่องส่งไม่เกิดการเสียหาย และจากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D นั้นจะเห็นว่าที่ความถี่ 2.45 GHz นั้นสายอากาศที่ออกแบบนั้นมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งน้อยกว่า 2 ซึ่งถ้าจะประมาณค่าโดยการอ่านค่าจากกราฟจะอ่านค่าได้ประมาณ 1.2

3. ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance)



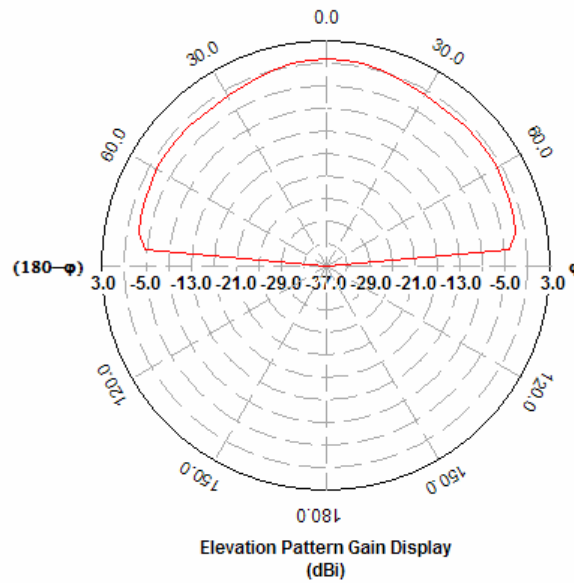
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า

วิเคราะห์กราฟ

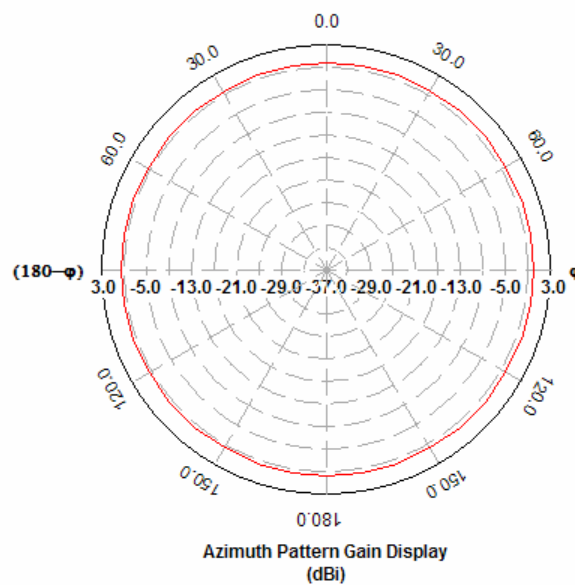
ในทางทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศนั้น ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) ของสายอากาศนั้นต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ประมาณ 50 โอห์ม (ในเครือข่าย Wireless LAN) หรือที่เรียกว่า เกิดการ matching ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งถ้าสายอากาศที่จะนำไปใช้งานมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าไม่ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง หรือที่เรียกว่าเกิดการ mismatch ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง ก็จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งอาจจะทำให้เครื่องส่งเกิดความเสียหายได้

จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D นั้นจะเห็นว่าที่ความถี่ 2.45 GHz นั้นสายอากาศที่ออกแบบนั้นมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) ประมาณ 48 โอห์ม

4. แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)



รูปที่ 3.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในมุมเงย (Elevation)



รูปที่ 3.6 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในมุมกวาด (Azimuth)

วิเคราะห์กราฟ

จากแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศจะพบว่าในระนาบมุมเงย (Elevation) นั้นแบบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเป็นแบบมีทิศทาง (Directivity) ส่วนในระนาบมุมกวาดนั้นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเป็นแบบไม่มีทิศทาง

สรุป

จากการวิเคราะห์กราฟของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศแบบไดโพลบนฐานรอง PCB แบบองค์ประกอบเดี่ยว (1-Element) ที่ใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz ที่ได้ทำการออกแบบโครงสร้างทางกายภาพประกอบกับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม IE3D นั้น ค่าที่ได้จากการอ่านกราฟนั้นมีค่าที่สอดคล้องและเป็นไปตามทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ ซึ่งหมายความว่าเราสามารถใช้อุปกรณ์ IE3D ในการออกแบบโครงสร้างและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่จะนำไปใช้งานจริงได้ โดยที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่เครื่องส่งแต่อย่างใด

ส่วนในกรณีการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับนั้นไม่สามารถที่จะทำการออกแบบด้วยโปรแกรมได้ เนื่องจากเหตุผลบางประการ เช่น ข้อจำกัดของโปรแกรม เป็นต้น

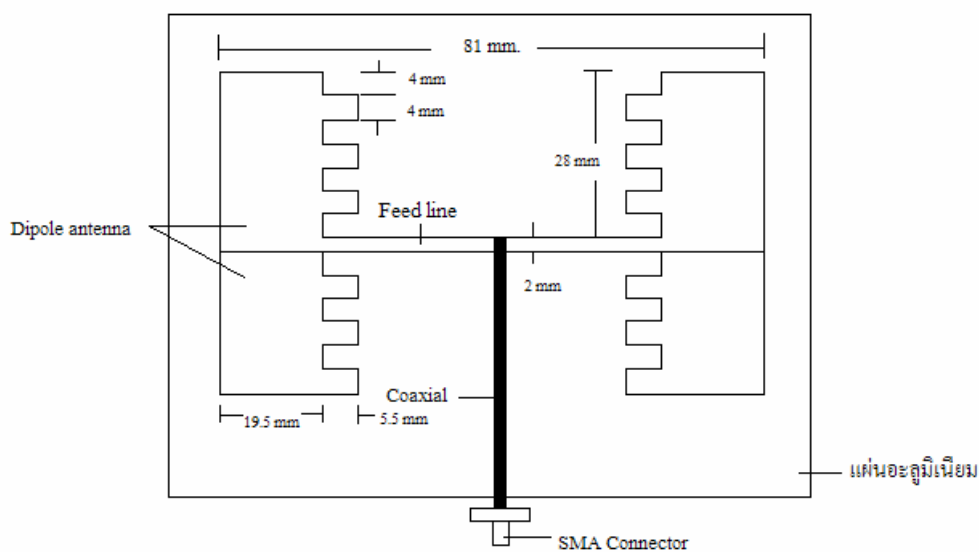
บทที่ 4

การสร้างและทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างสายอากาศต้นแบบที่เป็นแบบองค์ประกอบเดี่ยว (1-Element) ขึ้นมาโดยจะออกแบบตามลักษณะและโครงสร้างตามที่ได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม IE3D ในการวิเคราะห์สายอากาศ และการออกแบบ Feed Network เพื่อจุดประสงค์ในการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับทั้งที่เป็นแบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements) และแบบ 4 องค์ประกอบ (4-Elements) และทำการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศทั้งสามแบบ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบนั้นสามารถที่จะนำไปใช้งานจริงในย่านความถี่ 2.4-2.5 GHz ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เนื่องจากหลักการของสายอากาศแบบไดโพลบนฐาน PCB ที่ได้คิดไว้ เป็นการล่องนำหลักการของสายอากาศไดโพล (Dipole antenna) มาประสานสัมพันธ์กับหลักการของ สายอากาศ ไมโครสตริป (Microstrip Patched Antenna) ดังนั้นการดำเนินการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศตามเป้าหมาย จึงจะให้ความกว้างของ Strip แทนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ของ Dipole และให้ความยาวของ Strip แทนความยาวของ Dipole เป็นต้น

จากข้อมูลที่ใช้ในการจำลองของสายอากาศแบบไดโพลบนฐาน PCB ที่ทำการออกแบบโดยโปรแกรม IE3D นำมาสร้างเป็นสายอากาศโดยใช้แผ่นปริ้นต์ 2 หน้า ที่มีทองแดงเป็นตัวนำและกั้นกลางด้วยสารไดอิเล็กตริกที่เรียกว่า FR4 ($\epsilon_r = 4.4$) มีความหนา 1.6 มิลลิเมตร ให้ด้านหนึ่งมีรูปร่างของสายอากาศไดโพล (Dipole antenna) ตามรูปแบบที่ออกแบบไว้ โดยอีกด้านเป็นกราวด์ และจะอยู่สูงจากแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งจะเป็นตัวที่ใช้ในการสะท้อนคลื่นเพื่อป้องกันการเกิดโหลบหลัง (Back Lobe) 4.8 มิลลิเมตร จากนั้นก็ต่อสาย Coaxial เข้าที่ Feed line ของด้านแรกทางด้านที่กั้นแผ่นปริ้นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในการต่อสาย Coaxial เข้ากับสายอากาศ จำเป็นต้องทำการ Matching เพื่อให้อิมพีแดนซ์รวมของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม มากที่สุด (เพราะสาย Coaxial มี Impedance เป็น 50 โอห์ม) เพื่อให้เมื่อเวลาที่ป้อนสัญญาณให้สายอากาศจะไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นกลับมายังแหล่งจ่ายสัญญาณ และเพื่อให้สัญญาณที่ปลายสาย Coaxial ที่ป้อนสายอากาศที่สร้างขึ้นเป็นสัญญาณเดียวกับที่ส่งเข้าที่ต้นสาย และความยาวของสาย Coaxial จะมีขนาดเป็น $\lambda/2$ หรือประมาณ 61 มิลลิเมตร และถูกต่อกับ SMA Connector ตัวเมีย (Female SMA connector) ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งหลังจากการสร้างสายอากาศตามที่ได้ออกแบบโดยโปรแกรม IE3D ก็จะได้สายอากาศต้นแบบซึ่งเป็นสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบไดโพลบนฐาน PCB



รูปที่ 4.2 สายอากาศแบบไดโพลบนฐาน PCB แบบองค์ประกอบเดียว (1-Element) ที่นำไปทดลอง

การออกแบบ Feed Line

การออกแบบ Feed line จะใช้หลักการของ Wave Guide Microstrip ซึ่งสามารถใช้โปรแกรม IE3D ในการออกแบบได้ การออกแบบโดยใช้โปรแกรม IE3D สามารถดูวิธีการออกแบบได้ในภาคผนวก ข.

การออกแบบตัวป้อนสัญญาณ (Feed Network)

จากทฤษฎีการออกแบบตัวป้อนสัญญาณ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ทำให้ได้ตัวป้อนสัญญาณ Feed Network หรือ Power Divider เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับ (Array antenna) ซึ่งเป็นแบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements) และแบบ 4 องค์ประกอบ (4- Elements) จากสมการที่ (2.4-4) และ (2.4-5) จะได้วิธีการคำนวณหาค่าความกว้างของสายทองแดงดังนี้

วิธีการคำนวณหาค่าความกว้างของสายทองแดงที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ(characteris impedance) ของสายส่ง (Z_0)

- ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม และ $\epsilon_r = 4.4$

จะได้

$$\begin{aligned} H' &= \frac{(50)\sqrt{2(4.4+1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{4.4-1}{4.4+1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.4} \ln \frac{4}{\pi} \right) \\ &= 1.3704 + 0.3148(0.5723+0.1) \\ H' &= 1.582 \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่า $H' = 1.567$ และค่าความสูงของ Substrate (h) เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ลงในสมการที่ (2.4-5) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{W_1}{(1.6 \text{ mm})} &= \left(\frac{(\exp 1.582)}{8} - \frac{1}{4 \exp 1.582} \right)^{-1} \\ &= (0.6080 - 0.0514)^{-1} (1.6 \times 10^{-3}) \end{aligned}$$

$$W_1 = 2.8745 \text{ มิลลิเมตร หรือประมาณ } 2.9 \text{ มิลลิเมตร}$$

- ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 70 โอห์ม และ $\epsilon_r = 4.4$

จะได้

$$\begin{aligned} H' &= \frac{(70)\sqrt{2(4.4+1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{4.4-1}{4.4+1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.4} \ln \frac{4}{\pi} \right) \\ &= 1.9186 + 0.3148(0.5723+0.1) \\ H' &= 2.130 \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่า $H' = 2.130$ และค่าความสูงของ Substrate (h) เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ลงในสมการที่ (2.4-5) จะได้

$$\frac{W_1}{(1.6 \text{ mm})} = \left(\frac{(\exp 2.130)}{8} - \frac{1}{4 \exp 2.130} \right)^{-1}$$

$$= (1.0518 - 0.029)^{-1} (1.6 \times 10^{-3})$$

$$W_1 = 1.56 \text{ มิลลิเมตร หรือประมาณ } 1.6 \text{ มิลลิเมตร}$$

- ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 100 โอห์ม และ $\epsilon_r = 4.4$

จะได้

$$H' = \frac{(100)\sqrt{2(4.4+1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{4.4-1}{4.4+1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.4} \ln \frac{4}{\pi} \right)$$

$$= 2.7409 + 0.3148(0.5723 + 0.1)$$

$$H' = 2.953$$

เมื่อได้ค่า $H' = 2.130$ และค่าความสูงของ Substrate (h) เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ลงในสมการที่ (2.4-5) จะได้

$$\frac{W_1}{(1.6 \text{ mm})} = \left(\frac{(\exp 2.953)}{8} - \frac{1}{4 \exp 2.953} \right)^{-1}$$

$$= (2.3954 - 0.0130)^{-1} (1.6 \times 10^{-3})$$

$$W_1 = 0.67 \text{ มิลลิเมตร หรือประมาณ } 0.7 \text{ มิลลิเมตร}$$

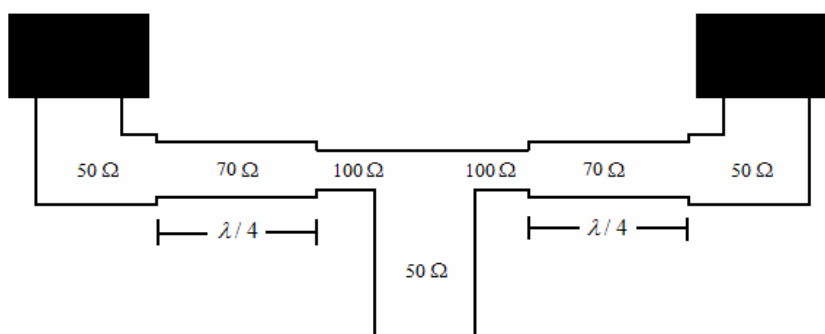
สรุป ขนาดของสายทองแดงที่ใช้ในการออกแบบตัวป้อนสัญญาณ

ที่ $Z_0 = 50$ โอห์ม ขนาดของสายทองแดง (W_2) จะมีค่าประมาณ 2.9 มิลลิเมตร

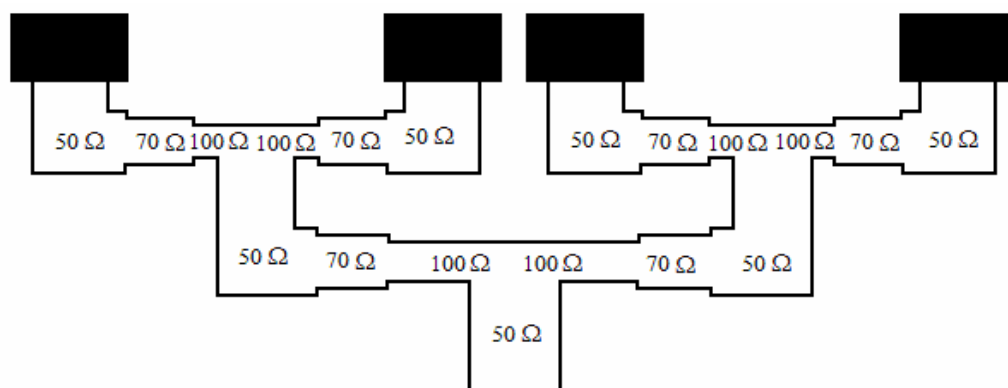
ที่ $Z_0 = 70$ โอห์ม ขนาดของสายทองแดง (W_1) จะมีค่าประมาณ 1.6 มิลลิเมตร

ที่ $Z_0 = 100$ โอห์ม ขนาดของสายทองแดง จะมีค่าประมาณ 0.7 มิลลิเมตร

หลังจากที่ได้คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งและขนาดของสายทองแดงเรียบร้อยแล้ว นำค่าที่ได้มาทำการออกแบบเป็นแบบจำลองของตัวป้อนสัญญาณ แบบ 2-way power divider และ 4-way power divider ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองลักษณะของตัวป้อนสัญญาณ แบบ 2-way power divider



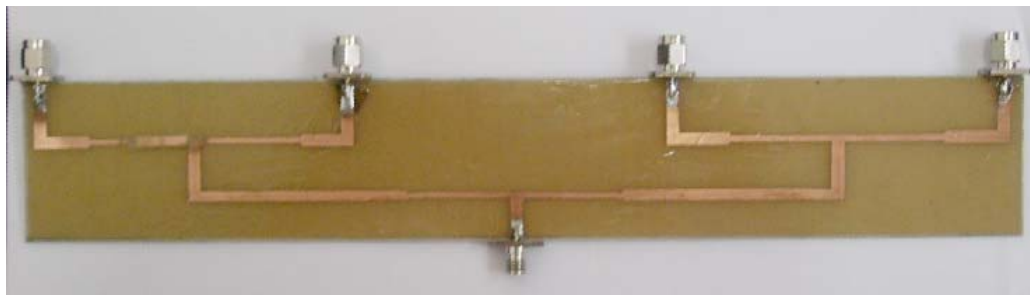
รูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองลักษณะของตัวป้อนสัญญาณ แบบ 4-way power divider

การออกแบบหรือการคำนวณเพื่อหาขนาดของลายทองแดงเพื่อทำหน้าที่เป็นสายส่งนั้นสามารถที่จะใช้โปรแกรม IE3D ออกแบบได้เช่นกันซึ่งได้ทำการแสดงการออกแบบด้วยโปรแกรม IE3D ไว้ในภาคผนวก ข.

หลังจากที่ได้แบบจำลองของตัวป้อนสัญญาณแบบ 2-way power divider และ 4-way power divider สามารถที่จะสร้างตัวป้อนสัญญาณเพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับ (Array antenna) โดยการกัดแผ่นปริ้นต์ตามขนาดและรูปแบบของแบบจำลองจะได้ตัวป้อนสัญญาณดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



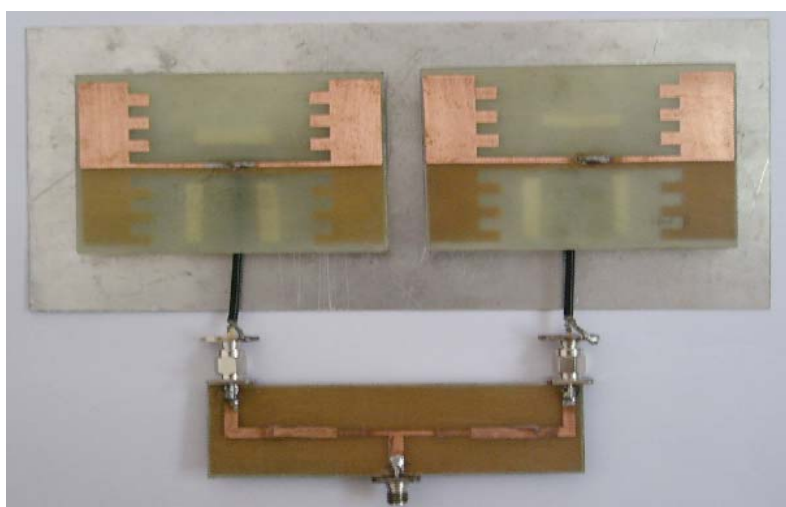
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของตัวป้อนสัญญาณแบบ 2-way power divider



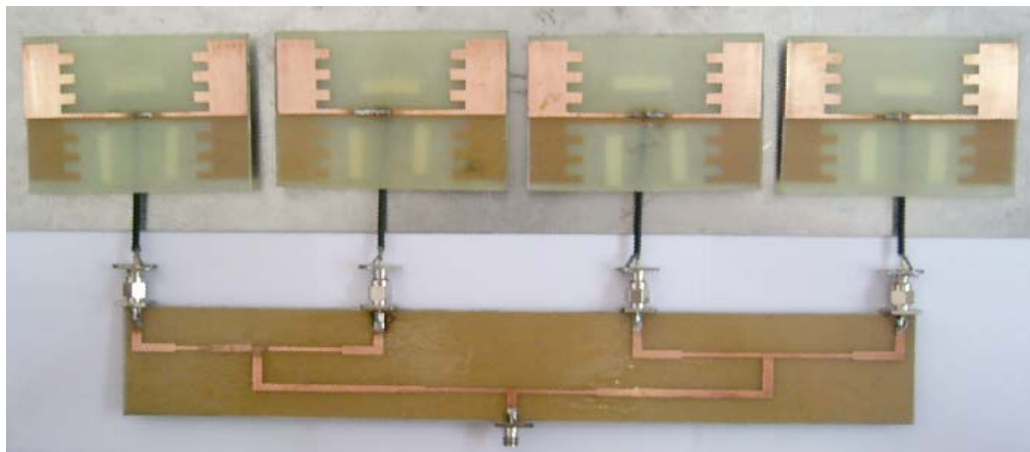
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของตัวป้อนสัญญาณแบบ 4-way power divider

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบตัวป้อนสัญญาณเสร็จเรียบร้อยแล้ว ต่อไปเป็นการสร้างสายอากาศแบบแถวลำดับ (Array antenna) โดยการนำสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว

(1-Element) ที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม IE3D มาต่อเข้ากับตัวป้อนสัญญาณ ซึ่งจะได้สายอากาศสายอากาศแบบแถวลำดับ (Array antenna) ซึ่งเป็นแบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements) และแบบ 4 องค์ประกอบ (4- Elements) ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 สายอากาศแบบแถวลำดับแบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements)



รูปที่ 4.8 สายอากาศแบบแถวลำดับแบบ 4 องค์ประกอบ (4-Elements)

การทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

การวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศนั้น จะทำการวัดค่าต่างๆ ด้วยเครื่อง Network Analyzer และจะนำผลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม IE3D ว่ามีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด เพื่อเป็นการยืนยันว่าโปรแกรม IE3D ในสามารถนำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศเพื่อนำไปใช้งานจริงได้ในกรณีที่เป็นแบบองค์ประกอบเดี่ยว (1- Element) ส่วนในกรณีที่เป็นแบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements) และแบบ 4 องค์ประกอบ (4- Elements) นั้นเราจะนำค่าพารามิเตอร์บางอย่าง เช่น ค่าอัตราขยาย (Gain) และแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของสายอากาศ เป็นต้น มาเปรียบเทียบกับกับแบบองค์ประกอบเดี่ยว เพื่อให้เห็นถึงข้อดีของการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับ และเพื่อแสดงว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นสามารถไปใช้งานจริงได้ในย่านความถี่ 2.4 -2.5 GHz

ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่จำเป็นต้องทำการวัด คือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: S_{11}) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR) ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) ซึ่งจะดูจากแผนภูมิสมิท (Smith chart) อัตราขยาย (Gain) และแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของสายอากาศนั้นจะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region)

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

1. สายอากาศแบบไดโพลบนฐานรอง PCB (สายอากาศต้นแบบ)
2. เครื่อง Network Analyzer
3. เครื่อง Spectrum Analyzer
4. เครื่อง Power Generator

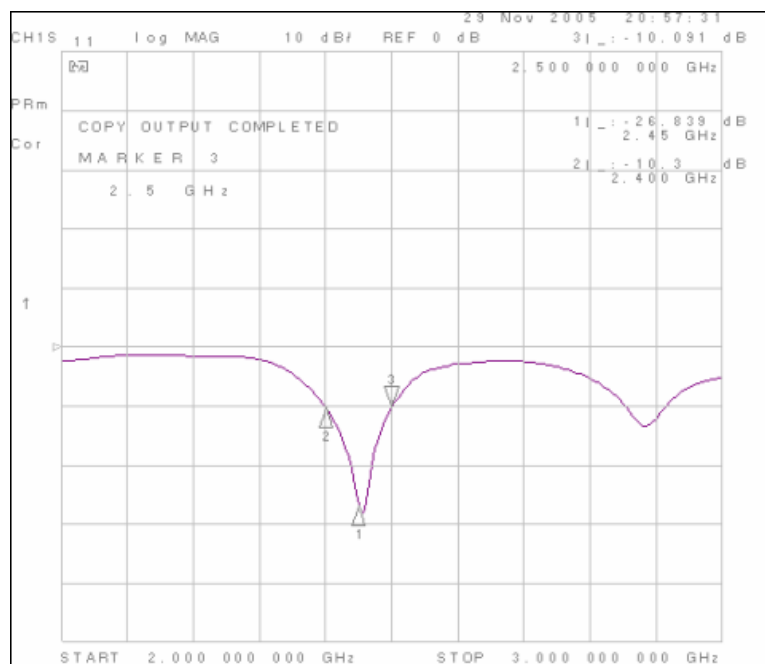
การทดลองวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss : S_{11}) ของสายอากาศ

ค่าการสูญเสียย้อนกลับเป็นค่าพารามิเตอร์ที่จะเป็นตัวบ่งบอกว่าสายอากาศที่นำมาทดลองวัดนั้นสามารถที่จะนำไปใช้งานจริงได้หรือไม่ การพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับนั้นเราจะดูว่าที่ความถี่ที่จะนำไปใช้งานนั้นสายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับจะต้องมีค่าต่ำกว่า -10 dB ลงไปสายอากาศนั้นจึงสามารถนำไปใช้งานจริงได้ ซึ่งค่าการสูญเสียย้อนกลับจะมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศได้ดังตารางในภาคผนวก ก.

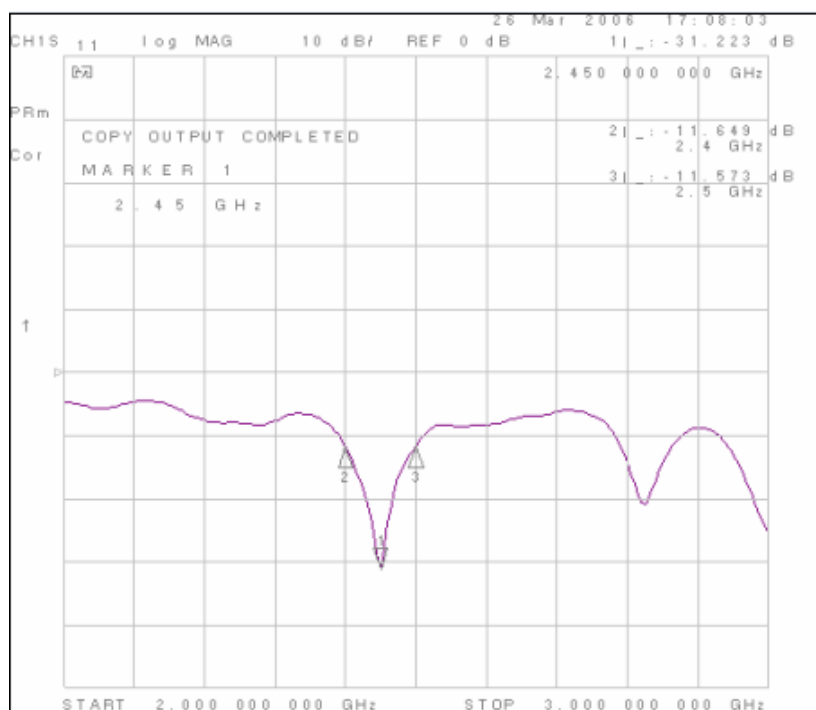
ขั้นตอนการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ

1. ทำการ Calibrate เครื่อง Network Analyzer ที่ความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 3 GHz
2. เลือกคำสั่ง Save เพื่อจะได้ไม่ต้องทำการเซตเครื่องใหม่ เมื่อมาใช้งานในภายหลัง
3. ต่อสายอากาศต้นแบบเข้าที่ Port 1 ของเครื่อง Network Analyzer
4. ทำการวัด S_{11} โดยเลือก Format และกดเลือก Log mag
5. ทำการเลือก Marker 1 ที่ความถี่ 2.45 GHz

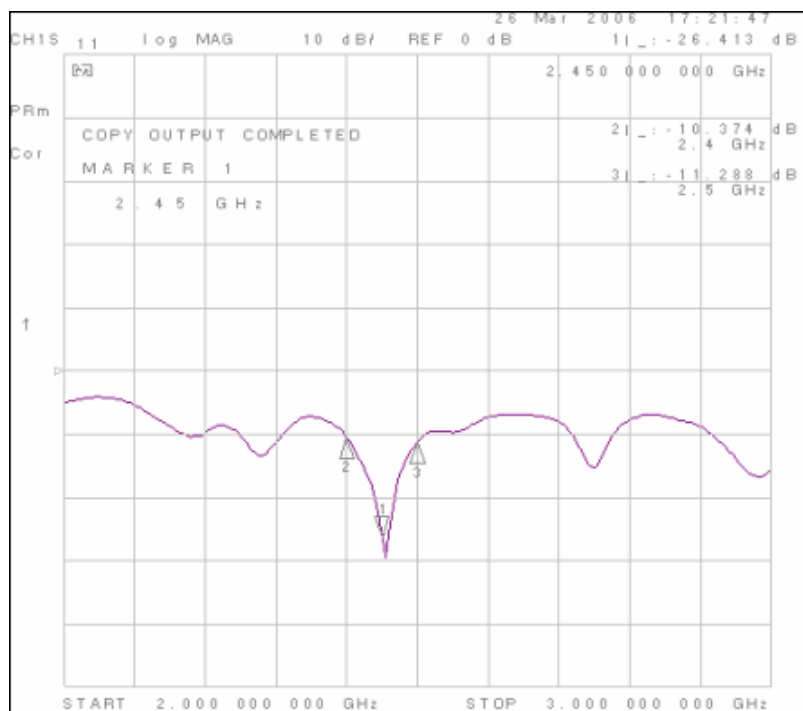
จากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศทั้งสามแบบ จะได้กราฟที่ได้จากการวัดดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว (1-Element)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements)



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ (4-Elements)

วิเคราะห์กราฟค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ

จากกราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว จะเห็นว่าที่ Marker 1 คือที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้ในการออกแบบด้วยโปรแกรมนี้ สายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -26.839 dB ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม IE3D ในรูปที่ 3.2 จะพบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และที่ Marker 2 ความถี่ 2.4 GHz สายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -10.3 dB และ Marker 3 ความถี่ 2.5 GHz สายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -10.091 dB ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว จะสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 2.4 – 2.5 GHz และจะสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่เราใช้เป็นค่าความถี่ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว

ในกรณีที่เป็นสายอากาศแบบแถวลำดับนั้นก็จะทำการพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศเช่นเดียวกับในกรณีที่เป็นแบบองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งจากกราฟจะพบว่าที่ความถี่ 2.4- 2.5 GHz นั้นค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบแถวลำดับทั้งแบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements) และแบบ 4 องค์ประกอบ (4- Elements) นั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ทั้งสิ้น และจะมีค่าต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.45 GHz

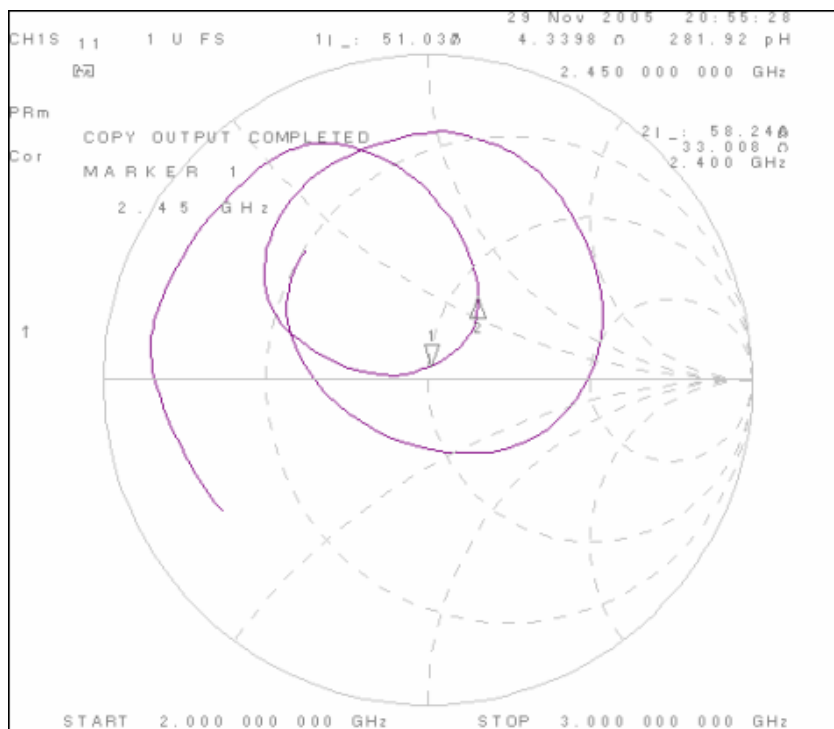
การทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) ของสายอากาศ

อิมพีแดนซ์ด้านเข้าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ เพราะว่าหากสายอากาศที่ทำการทดลองมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าไม่แมตซ์กับค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณแล้ว สายอากาศก็ไม่สามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงๆได้ เพราะจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นขึ้นภายในสายนำสัญญาณและจะส่งผลทำให้เครื่องส่งเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น สายอากาศต้นแบบที่นำมาทำการทดลองวัดจะต้องมีอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเท่ากับ หรือใกล้เคียง 50 โอห์ม มากที่สุด โดยสามารถดูจากแผนภูมิสมิท (Smith chart)

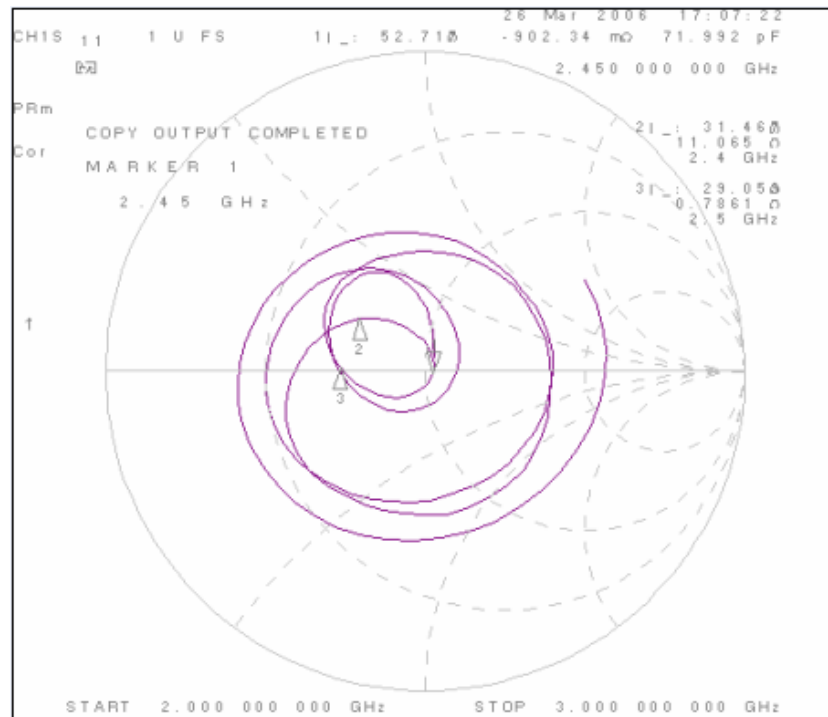
ขั้นตอนการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า

- 1) ทำตามขั้นตอนการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ
- 2) เปลี่ยน Format และกดเลือก Smith chart

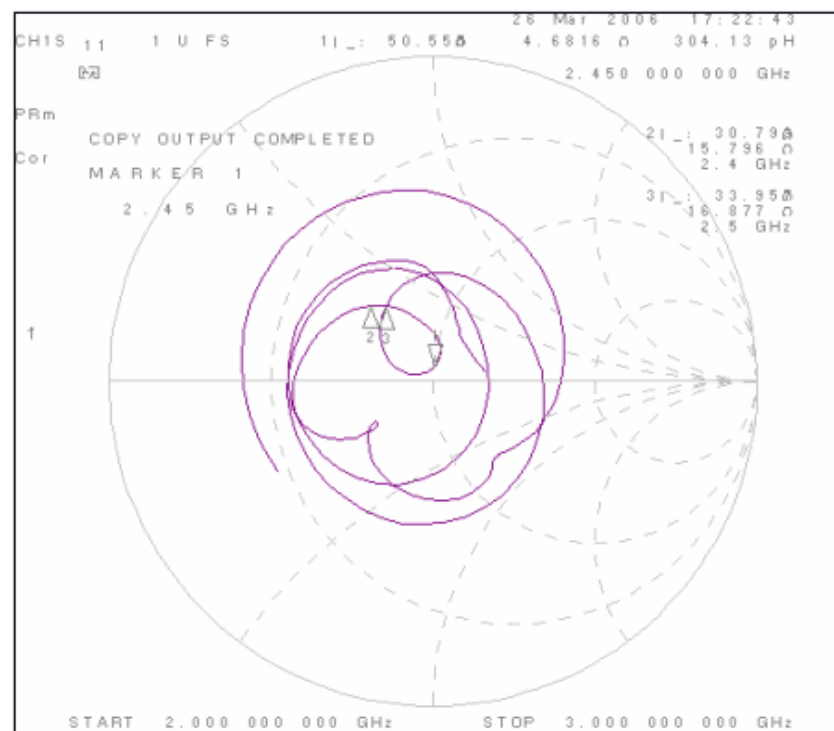
จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศทั้งสามแบบ จะได้แผนภูมิสมิท (Smith chart) ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.12 แผนภูมิสมิท (Smith chart) ของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว (1-Element)



รูปที่ 4.13 แผนภูมิสมิท (Smith chart) ของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements)



รูปที่ 4.14 แผนภูมิสมิท (Smith chart) ของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ (4-Elements)

วิเคราะห์กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ

จากแผนภูมิแผนภูมิสมิทริกของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว จะเห็นว่าที่ Marker 1 คือที่ความถี่ 2.45 GHz ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศมีค่าเท่ากับ $51.03 + j4.3398 \Omega$ และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรม IE3D ดังรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรมจะมีค่าประมาณ 48Ω ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงและทั้ง 2 ค่านั้นเป็นค่าที่ยอมรับได้ เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับ 50Ω แสดงให้เห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว ที่นำมาทำการทดลองวัดมีความใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ

ในกรณีที่เป็นสายอากาศแบบแถวลำดับนั้นจะเห็นว่าในกรณีที่เป็นสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ จะมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศเท่ากับ $52.21 - j0.902 \Omega$ และค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบจะมีค่าเท่ากับ $50.55 + j4.6816 \Omega$ ซึ่งจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศทั้งแบบ 2 องค์ประกอบ และแบบ 4 องค์ประกอบมีค่าใกล้เคียง 50Ω

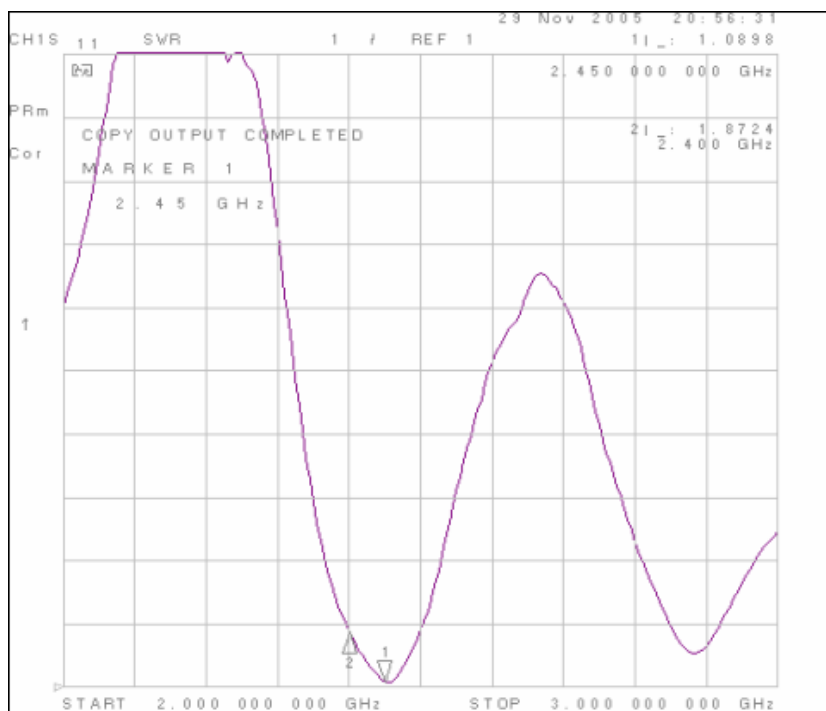
การทดลองวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR) ของสายอากาศ

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง หมายถึง ค่าอัตราส่วนของแรงดันของคลื่นที่ส่งไปและคลื่นที่สะท้อนกลับมายังเครื่องส่ง คุณสมบัติที่จำเป็นต้องพิจารณา คือ สายอากาศที่ดีและสามารถนำไปใช้งานได้จริงจะต้องมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 1.5

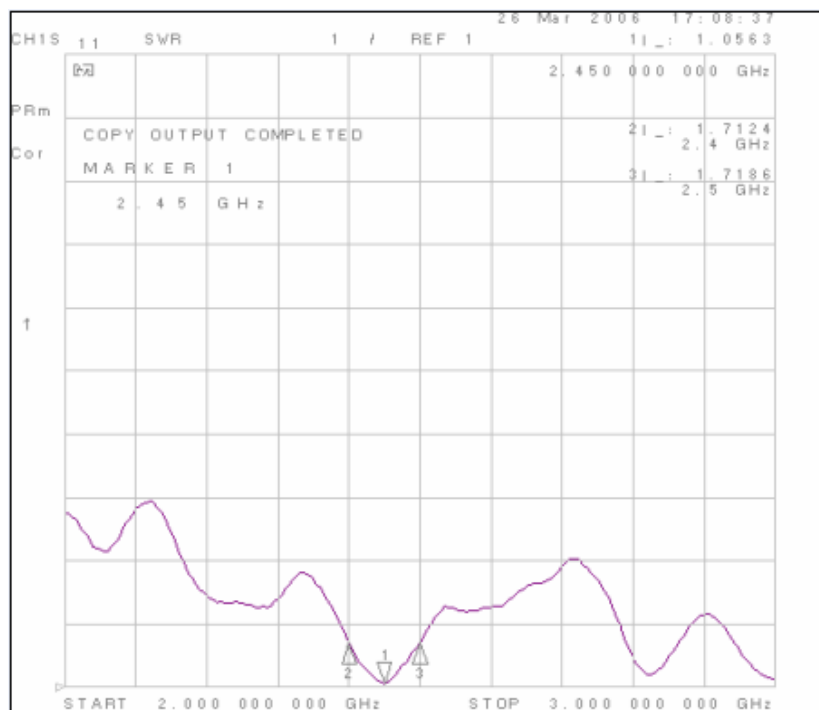
ขั้นตอนการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

- 1) ทำตามขั้นตอนการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ
- 2) เปลี่ยน Format และกดเลือก SWR

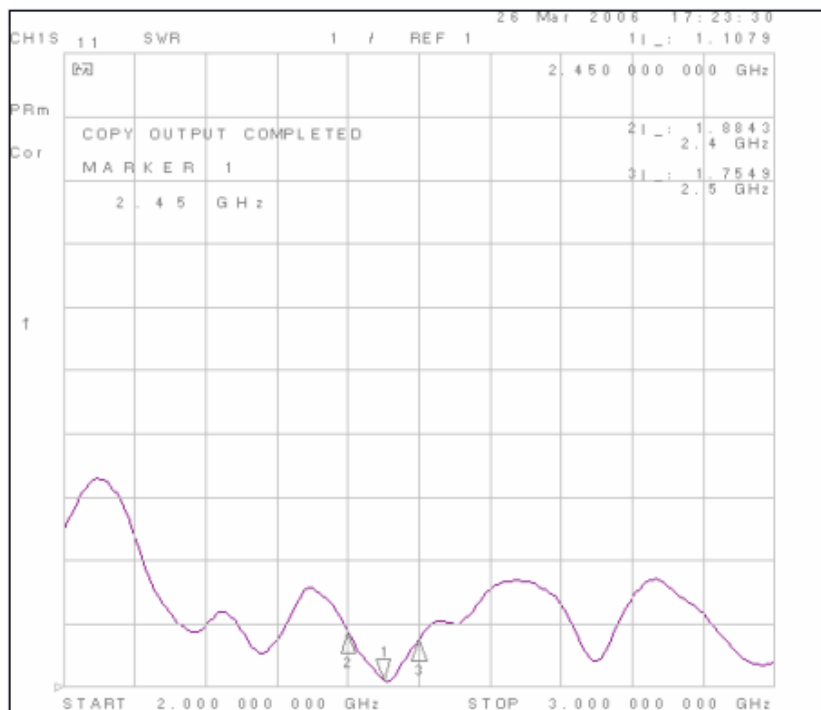
จากการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ของสายอากาศทั้งสามแบบ จะได้กราฟของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว (1-Element)



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ (2-Elements)



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ (4-Elements)

วิเคราะห์กราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

จากกราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง จะเห็นว่าที่ Marker 1 คือที่ความถี่ 2.45 GHz นั้นค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดียวที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 1.0898 ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรมดังรูปที่ 3.3 จะพบว่าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งในกรณีที่ได้จากการวัดจริงนั้นต่ำกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม แต่ค่าที่ได้จากโปรแกรมนั้นก็ยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าสายอากาศแบบองค์ประกอบเดียวที่นำมาวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง นั้นเมื่อนำไปใช้งานจริงจะไม่ส่งผลทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่น เพราะค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า 1.5

กรณีที่เป็นสายอากาศแบบแถวลำดับนั้นจะพบว่าในกรณีที่เป็นสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ จะมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศเท่ากับ 1.0562 และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบจะมีค่าเท่ากับ 1.1079 ซึ่งจะเห็นว่าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศทั้งแบบ 2 องค์ประกอบ และแบบ 4 องค์ประกอบ มีค่าต่ำกว่า 1.5

การทดลองวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของสายอากาศ

การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ จะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) โดยสามารถคำนวณจากสมการ

$$R > \frac{2D^2}{\lambda}$$

เมื่อ R คือ ระยะของสนามระยะไกล

D คือ ความยาวสูงสุดของสายอากาศ

λ คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ

ซึ่งในโครงการนี้จะทำการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศในห้องปฏิบัติการโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยการใช้โปรแกรม Lab Volt ในการวัด โดยมีอุปกรณ์และขั้นตอนในการวัดดังนี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ

1. เครื่อง Power Generator
2. สายอากาศยาคิ ใช้งานที่ความถี่ 2.4 GHz และมีอัตราขยาย 15 dBi ซึ่งจะใช้เป็นสายอากาศทางภาคส่ง
3. คอมพิวเตอร์ ใช้งานรัน โปรแกรม Lab Volt
4. ตัวขับเคลื่อนสายอากาศ ใช้งานหมุนสายอากาศ
5. สายอากาศไดโพลบนฐานรอง PCB แบบองค์ประกอบเดี่ยว , 2 องค์ประกอบ และ 4 องค์ประกอบ ใช้เป็นสายอากาศทางภาครับ

ขั้นตอนการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน

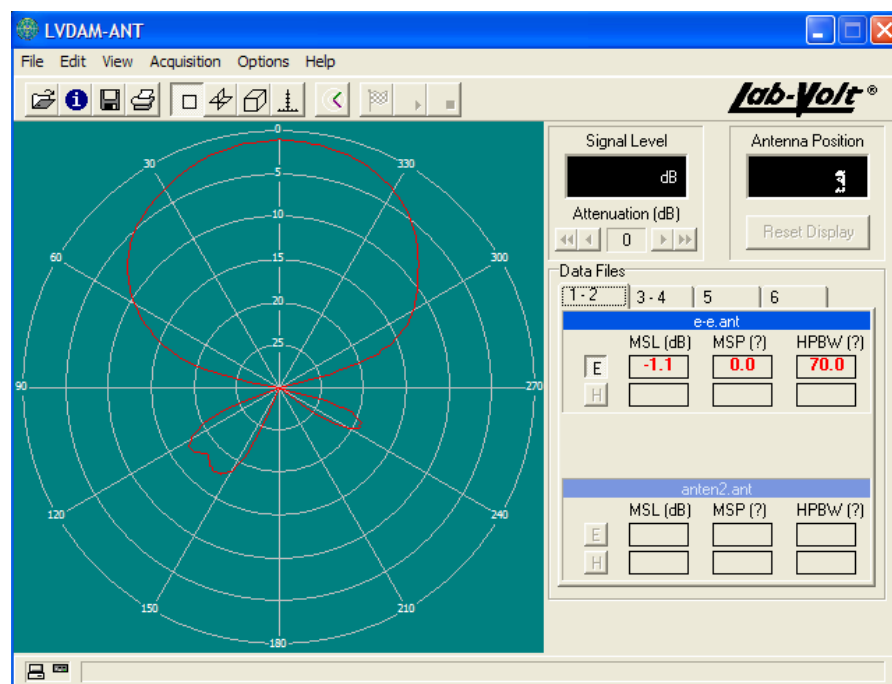
1. ทำการเซตเครื่อง Power Generator
2. ตั้งค่าระดับของสัญญาณที่ต้องการส่ง
2. ตั้งความถี่การวัดที่ 2.45 GHz
3. สายอากาศยาคิเป็นสายอากาศภาคส่ง ต่อเข้ากับ Power Generator
4. สายอากาศที่ทำกรทดสอบในภาครับ ต่อเข้ากับตัวขับเคลื่อนสายอากาศ
5. ทำการวัดค่าความแรงของสัญญาณจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Lab Volt โดยตัวขับเคลื่อนสายอากาศจะหมุนจนกระทั่งครบ 1 รอบ หรือ 360 องศา

ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ ในทางทฤษฎีนั้น สายอากาศที่เป็นแบบแถวลำดับนั้นจะต้องมี ลำคลื่นของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่แคบกว่า ในกรณีที่เป็นแบบองค์ประกอบเดี่ยว และจะส่งผลถึงค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศอีกด้วย

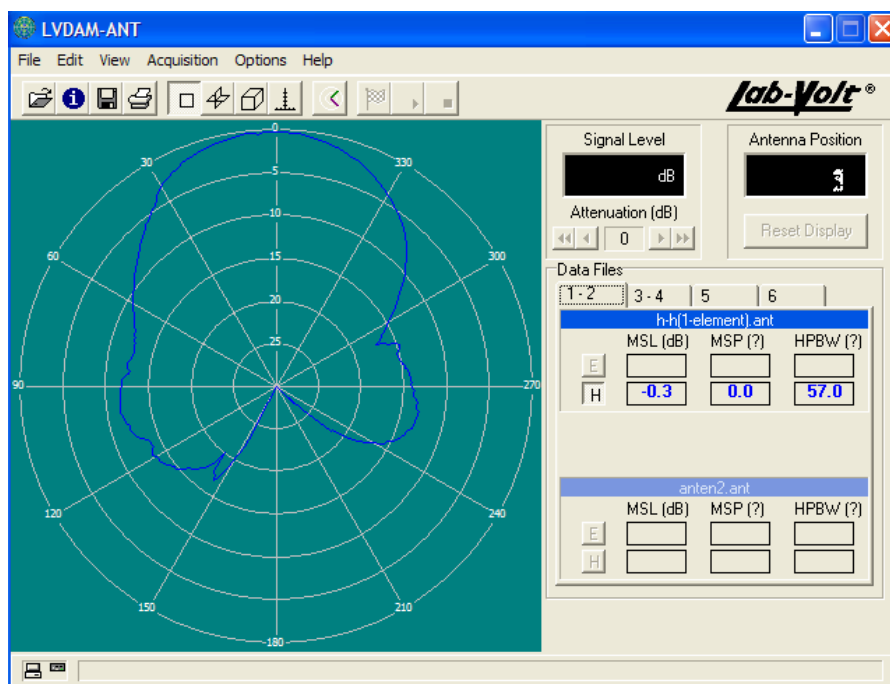
ซึ่งในการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศนั้น เราจะทำการเปลี่ยนการวางสายอากาศทั้งภาคส่งและภาครับ เพื่อเป็นการทำการทดสอบการโพลาไรซ์ของคลื่น ซึ่งในทางทฤษฎีนั้นกล่าวไว้ว่า การเดินทางของคลื่นทางภาคส่งและภาครับนั้นจะต้องมีการโพลาไรซ์ของคลื่นที่ตรงกัน ถึงจะทำให้สายอากาศทางภาคส่งและภาครับสามารถที่จะทำการรับส่งคลื่นถึงกันได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลของการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศจะมีแบบรูปดังรูปต่อไปนี้ ผลของการทดลองวัดการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว (1 – Element)

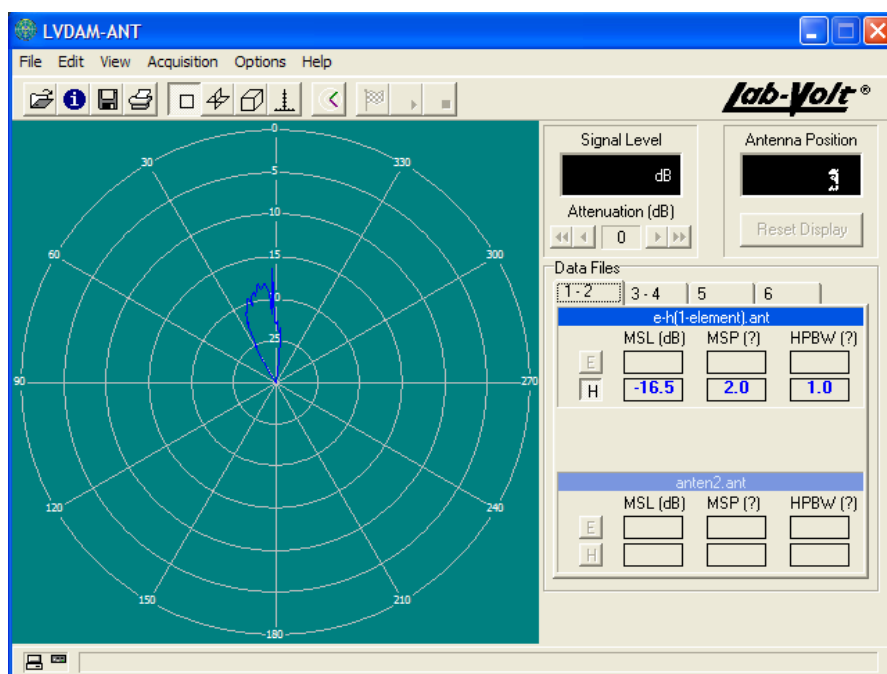
- ตั้งค่า กำลังงานในการส่งที่ 9 dBm
- ระยะระหว่างสายอากาศภาครับ กับภาคส่งเท่ากับ 4.5 เมตร
- ความถี่ 2.45 GHz



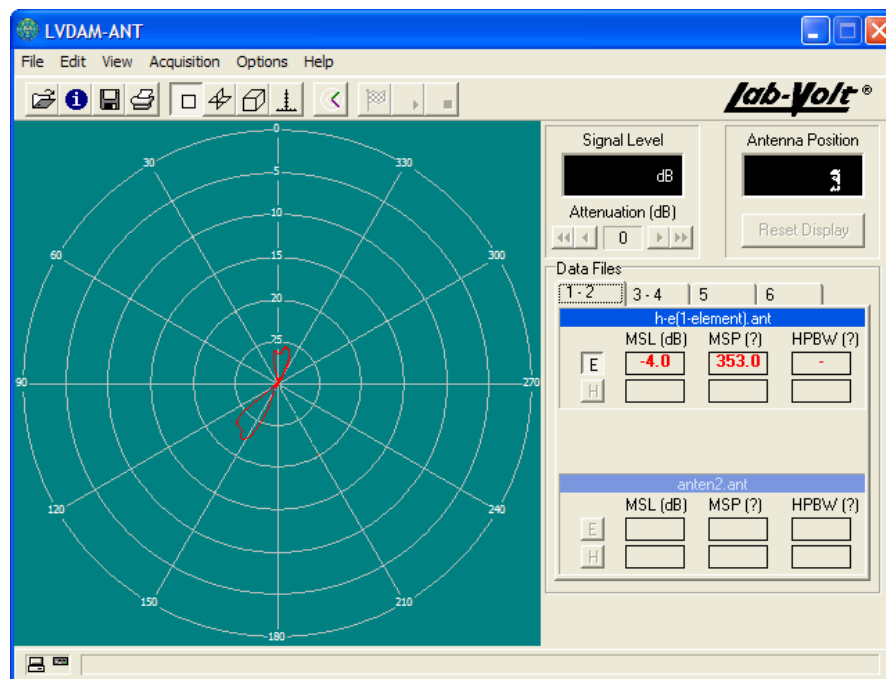
รูปที่ 4.18 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยวในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาไรซ์ที่ตรงกัน (ส่ง E-รับ E)



รูปที่ 4.19 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยวในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาไรซ์ที่ตรงกัน (ส่ง H-รับ H)



รูปที่ 4.20 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาไรซ์ไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง E-รับ H)



รูปที่ 4.21 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาไรซ์ไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง H-รับ E)

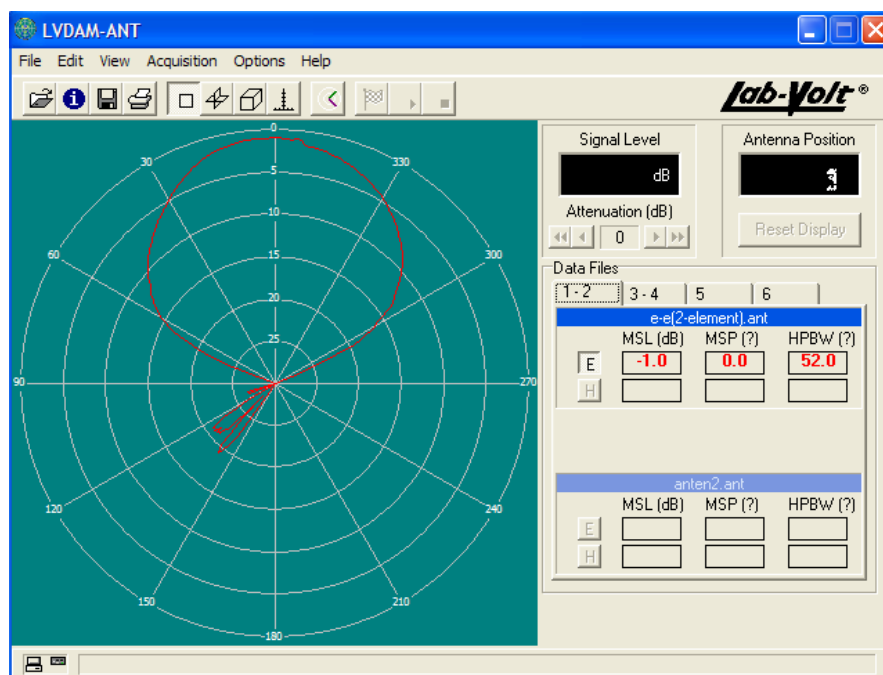
วิเคราะห์แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว (1- Element)

จากแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว จะพบว่าเป็นการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทางทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E- plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) และแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานมีลำคลื่นค่อนข้างกว้าง และมีโหลบหลัง (Back Lobe) เกิดขึ้น

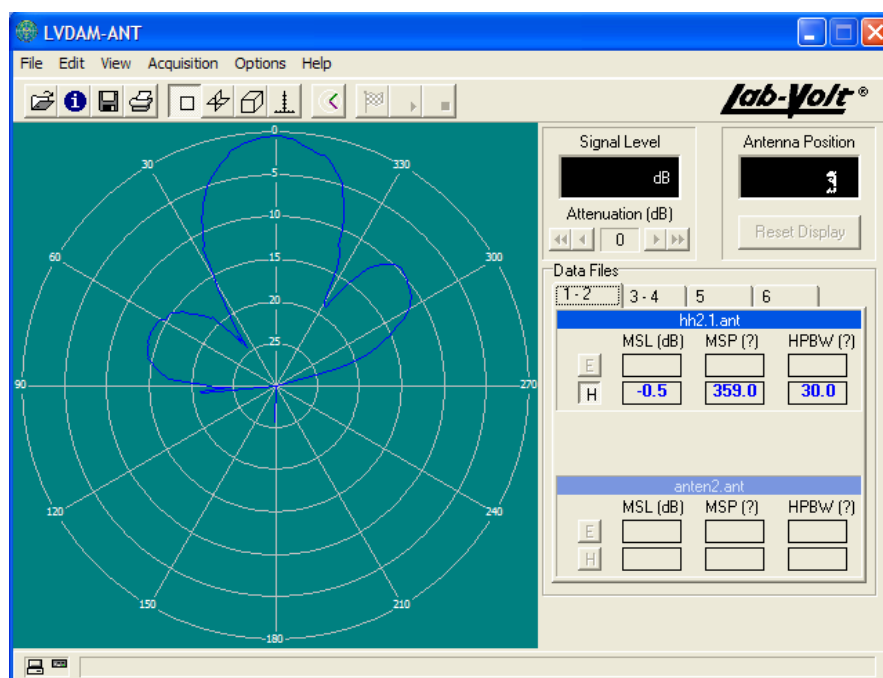
ในกรณีที่มีการโพลาไรซ์ของสายอากาศภาคส่ง กับภาครับตรงกันนั้นจะทำให้การรับคลื่นของสายอากาศภาครับมีประสิทธิภาพมากกว่าในกรณีที่การโพลาไรซ์ของสายอากาศภาคส่ง กับภาครับไม่ตรงกันอย่างชัดเจน โดย สังเกตได้จากระดับกำลังงานที่รับได้

ผลของการทดลองวัดการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ (2 – Elements)

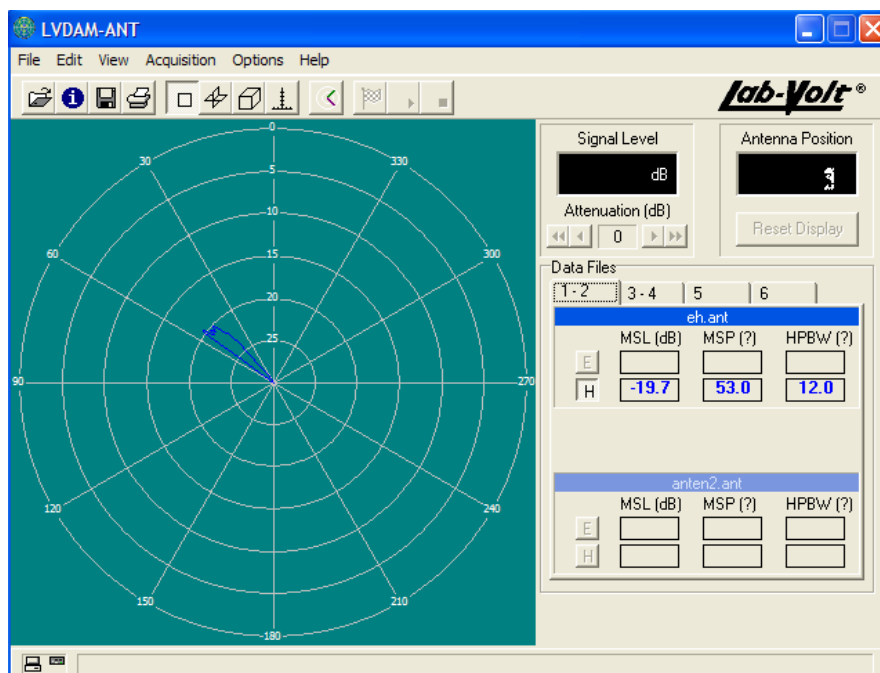
- ตั้งค่า กำลังงานในการส่งที่ 6 dBm
- ระยะระหว่างสายอากาศภาครับ กับภาคส่งเท่ากับ 4.5 เมตร
- ความถี่ 2.45 GHz



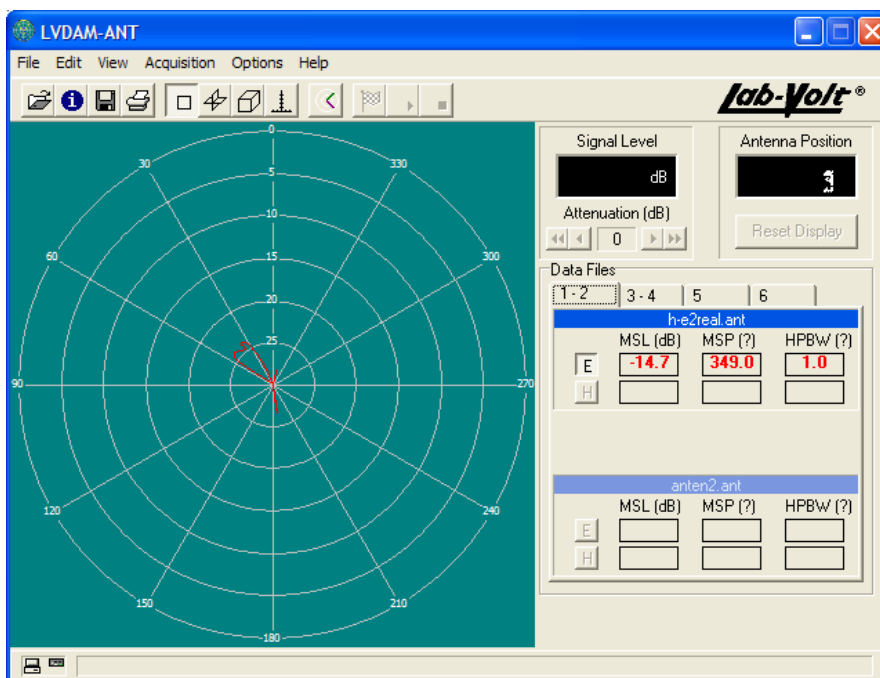
รูปที่ 4.22 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาไรซ์ที่ตรงกัน (ส่ง E-รับ E)



รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาไรซ์ที่ตรงกัน (ส่ง H-รับ H)



รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาไรซ์ไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง E-รับ H)



รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาไรซ์ไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง H-รับ E)

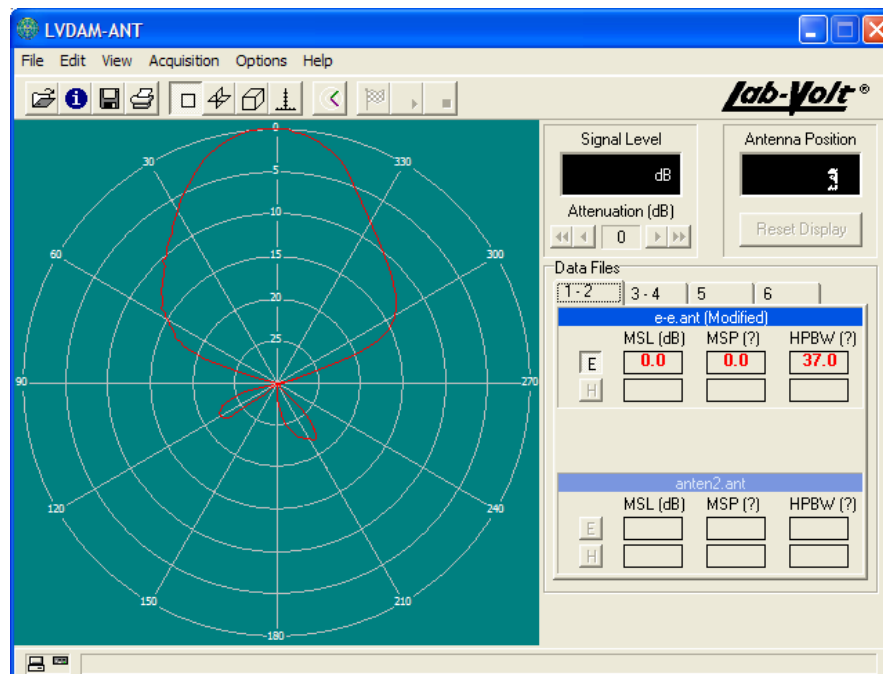
วิเคราะห์แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ (2- Elements)

จากแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ จะพบว่าเป็นการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทางทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E- plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) เช่นเดียวกับแบบองค์ประกอบเดี่ยว และในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) จะมีโหลบข้าง (Side Lobe) เกิดขึ้นทั้ง 2 ข้างของโหลบหลัก (Main Lobe) แต่แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะมีลักษณะแคบกว่าแบบองค์ประกอบเดี่ยว

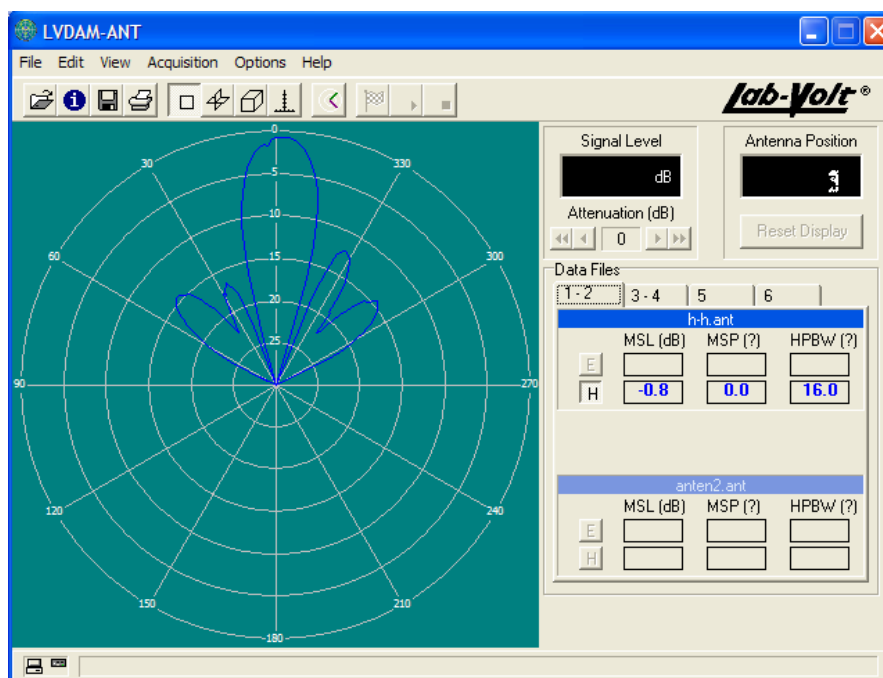
ในกรณีที่มีการโพลาไรซ์ของสายอากาศส่ง กับภาครับตรงกันนั้นจะทำให้การรับคลื่นของสายอากาศภาครับมีประสิทธิภาพมากกว่าในกรณีที่การโพลาไรซ์ของสายอากาศส่ง กับภาครับไม่ตรงกันอย่างชัดเจน โดย สังเกตได้จากระดับกำลังงานที่รับได้

ผลของการทดลองวัดการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ (4 – Elements)

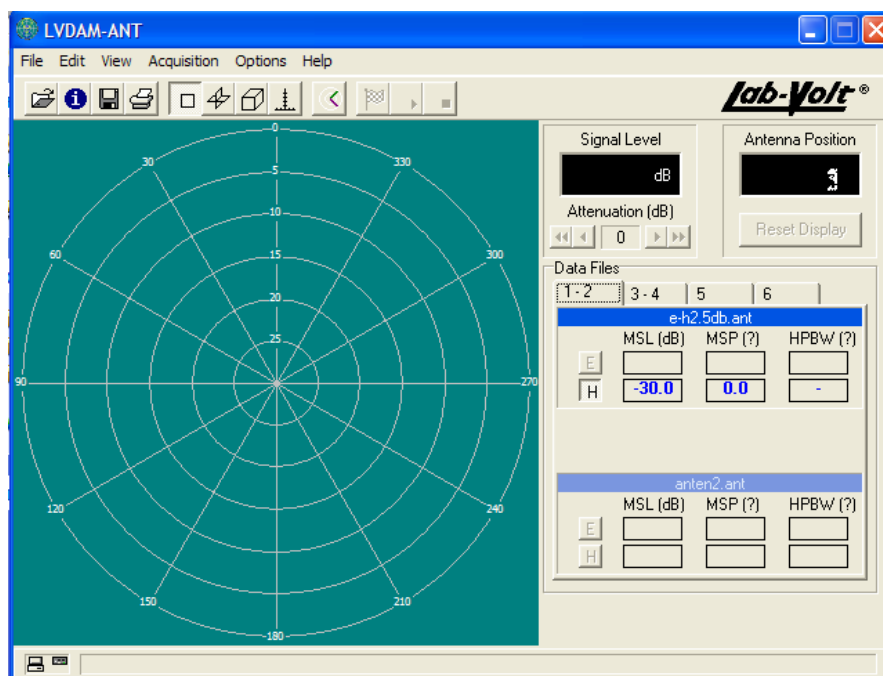
- ตั้งค่า กำลังงาน ในการส่งที่ 2.5 dBm
- ระยะระหว่างสายอากาศภาครับ กับภาคส่งเท่ากับ 4.5 เมตร
- ความถี่ 2.45 GHz



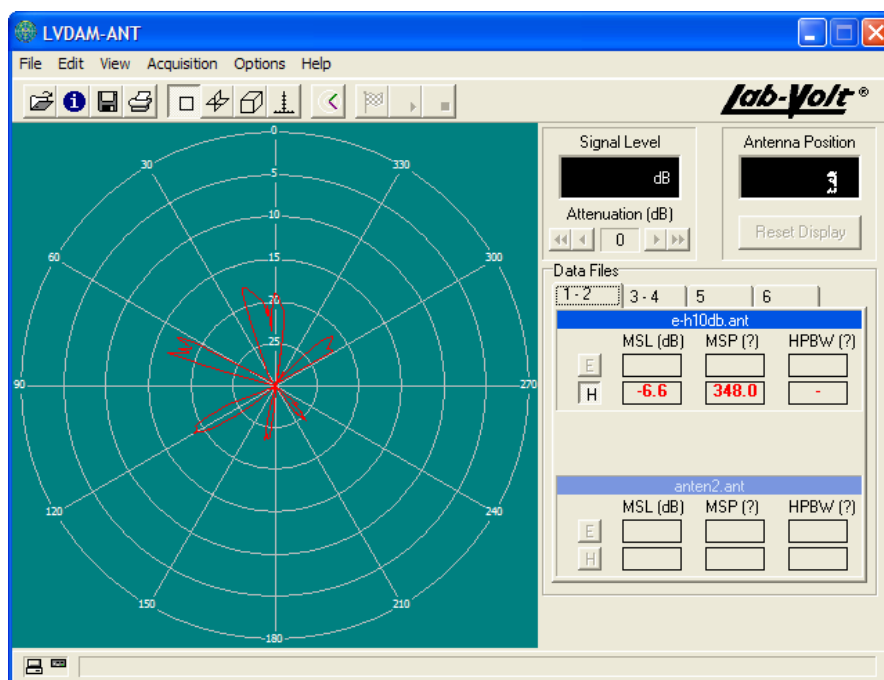
รูปที่ 4.26 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาไรซ์ที่ตรงกัน (ส่ง E-รับ E)



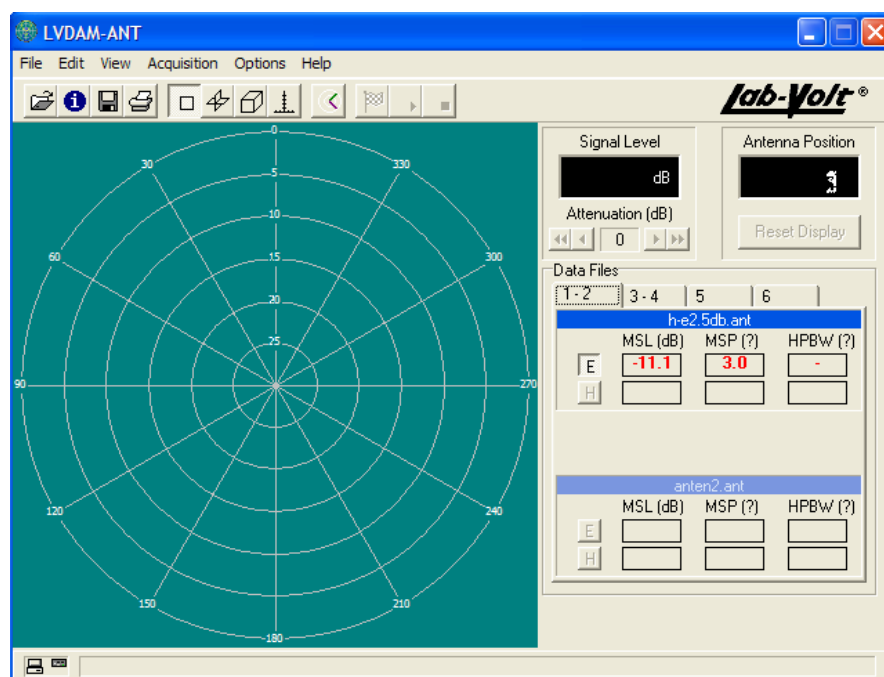
รูปที่ 4.27 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาริซที่ตรงกัน (ส่ง H-รับ H)



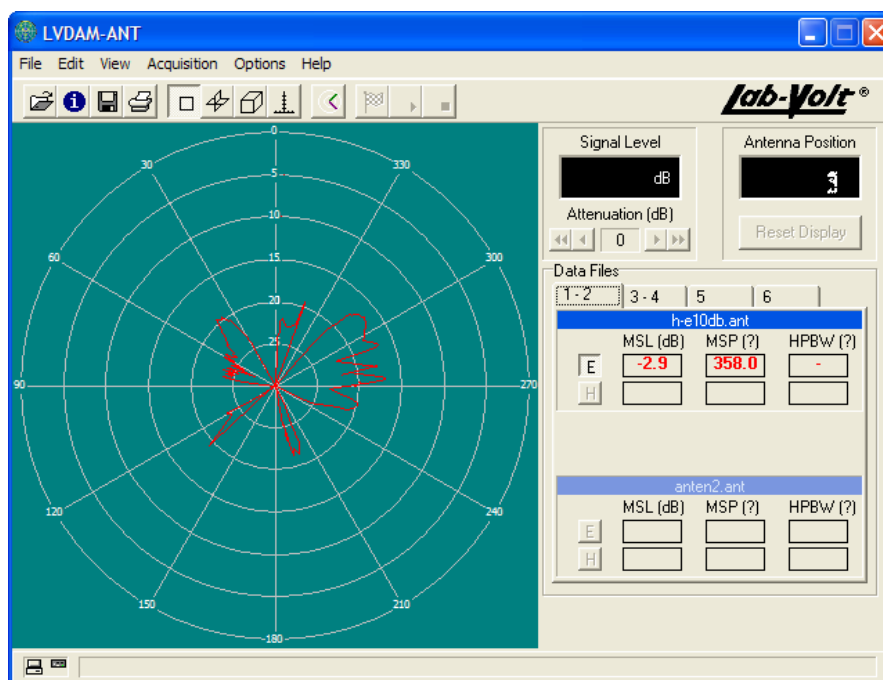
รูปที่ 4.28 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาริซไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง E-รับ H) ที่กำลังส่ง 2.5 dBm



รูปที่ 4.29 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาไรซ์ไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง E-รับ H) ที่กำลังส่ง 10 dBm



รูปที่ 4.30 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาไรซ์ไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง H-รับ E) ที่กำลังส่ง 2.5 dBm



รูปที่ 4.31 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ โดยภาคส่งและภาครับมีโพลาไรซ์ไม่ตรงกันตรงกัน (ส่ง H-รับ E) ที่กำลังส่ง 10 dBm

วิเคราะห์แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ (4- Elements)

จากแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ จะพบว่าเป็นการแผ่กระจายคลื่นแบบมีทิศทางทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E- plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H- plane) เช่นเดียวกับแบบองค์ประกอบเดี่ยว และแบบ 2 องค์ประกอบ และในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) จะมีโหลบข้าง (Side Lobe) เกิดขึ้นทั้ง 2 ข้างของโหลบหลัก (Main Lobe) เหมือนกับแบบ 2 องค์ประกอบ แต่แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะมีลำคลื่นแคบกว่าแบบ 2 องค์ประกอบ

ในกรณีที่มีการโพลาไรซ์ของสายอากาศภาคส่ง กับภาครับตรงกันนั้นจะทำให้การรับคลื่นของสายอากาศภาครับมีประสิทธิภาพมากกว่าในกรณีที่การโพลาไรซ์ของสายอากาศภาคส่ง กับภาครับไม่ตรงกันอย่างชัดเจน โดย ในกรณีสังเกตได้จากระดับกำลังงานที่รับได้

ในกรณีของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ นั้นการที่โพลาไรซ์ของสายอากาศภาคส่ง กับภาครับไม่ตรงกัน และทำการส่งกำลังงานที่ 2.5 dBm นั้นจะไม่ปรากฏแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ดังนั้นจึงได้ทำการเพิ่มกำลังงานที่ส่งเป็น 10 dBm เพื่อที่ต้องการให้ปรากฏแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน เพื่อที่จะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ

การวัดค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ

การวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศมีอยู่หลายวิธี วิธีที่ง่ายที่สุดก็คือวิธีที่เรียกว่า วิธีแบบใช้สายอากาศอ้างอิง (Reference Antenna Method) หรือวิธีการเปรียบเทียบ (Comparison Method) หรือวิธีการแทน (Substitution Method) ซึ่งเปรียบเทียบกำลังงานที่รับได้ โดยสายอากาศอ้างอิง (P_{ref}) กับกำลังงานที่รับได้จากสายอากาศที่ทำการทดสอบ (P_{test}) ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ทดสอบจะหาได้จากสมการ

$$G_{test} = \frac{P_{test}}{P_{ref}} G_{ref}$$

หรือ $G_{test}(dB) = P_{test}(dB) - P_{ref}(dB) + G_{ref}(dB)$

โดยที่ G_{test} คือ อัตราขยายของสายอากาศที่ต้องการทดสอบ

G_{ref} คือ อัตราขยายของสายอากาศอ้างอิง

P_{test} คือ กำลังงานที่สายอากาศที่ต้องการทดสอบรับได้

P_{ref} คือ กำลังงานที่ส่งออกจากสายอากาศอ้างอิง

จากสมการข้างต้นเราสามารถหาค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ดังนี้

1. สายอากาศแบบองค์ประกอบเดียว

$$P_{ref} = 9 \text{ dBm}$$

$$G_{ref} = 15 \text{ dBi}$$

$$P_{test} = -1.1 \text{ dB}$$

เพราะฉะนั้น จะได้อัตราขยาย (G_{test}) ของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดียวเท่ากับ 4.9 dB

2. สายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบ

$$P_{test} = 6 \text{ dBm}$$

$$G_{ref} = 15 \text{ dBi}$$

$$P_{test} = -1 \text{ dB}$$

เพราะฉะนั้น จะได้อัตราขยาย (G_{test}) ของสายอากาศแบบ 2 องค์ประกอบเท่ากับ 8 dB

3. สายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบ

$$P_{test} = 2.5 \text{ dBm}$$

$$G_{ref} = 15 \text{ dBi}$$

$$P_{test} = 0 \text{ dB}$$

เพราะฉะนั้น จะได้อัตราขยาย (G_{test}) ของสายอากาศแบบ 4 องค์ประกอบเท่ากับ 12.5 dB

วิเคราะห์ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณ

จากค่าอัตราขยายที่คำนวณได้ จะพบว่าสายอากาศที่เป็นแบบองค์ประกอบเดี่ยวจะมีค่าอัตราขยายต่ำที่สุด และแบบ 4 องค์ประกอบจะมีอัตราขยายสูงที่สุดเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อนำสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว มาทำเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับจะทำให้มีค่าอัตราขยายเพิ่มขึ้น

สรุปการสร้างและการวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

จากการได้ที่ทำกรสร้างสายอากาศแบบไดโพลบนฐานรอง PCB แบบองค์ประกอบเดี่ยว โดยมีพื้นฐานโครงสร้างมาจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D และนำไปทำการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ ได้แก่ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input impedance) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation pattern) และค่าอัตราขยาย (Gain) และทำการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับสายอากาศแบบไดโพลบนฐานรอง PCB และนำไปวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นเดียวกันกับสายอากาศแบบไดโพลบนฐานรอง PCB แบบองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นค่อนข้างเป็นไปตามทฤษฎี และจากการทดสอบด้วยการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าสายอากาศแบบแถวลำดับไดโพลบนฐานรอง PCB นั้นจะมีประสิทธิภาพดีกว่าสายอากาศแบบไดโพลบนฐานรอง PCB แบบองค์ประกอบเดี่ยว คือ สายอากาศแบบแถวลำดับมีความกว้างของลำคลื่นที่แคบกว่าสายอากาศที่เป็นแบบองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้สายอากาศแบบแถวลำดับมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีกว่าแบบองค์ประกอบเดี่ยว และที่สำคัญ คือมีอัตราขยายสูงกว่า

จากการทดสอบค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ สามารถสรุปได้ว่าสายอากาศแบบแถวลำดับสายอากาศแบบไดโพลบนฐานรอง PCB มีคุณสมบัติในการที่จะรับส่งคลื่นในย่านความถี่ 2.4 GHz -2.5GHz ได้จริง

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

โครงการฉบับนี้เป็นการศึกษาสายอากาศสำหรับเครือข่ายไร้สาย (Wireless LAN) โดยได้ทำการศึกษาการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับ และพารามิเตอร์พื้นฐานที่สำคัญของสายอากาศสำหรับใช้งานในเครือข่ายไร้สาย ได้แก่ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern) อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing-Wave Ratio หรือ SWR) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss) และค่าอัตราขยาย (Gain)

ในโครงการฉบับนี้ได้นำโปรแกรม IE3D เข้ามาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศก่อนที่จะนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไปสร้างเป็นสายอากาศที่สามารถใช้งานในย่านความถี่ 2.4- 2.5 GHz ได้ โดยตัวโปรแกรมสามารถใช้ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆ ของสายอากาศได้ เช่น แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern) อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing-Wave Ratio ;SWR) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss ; S_{11})

จากบทที่ 4 เราได้ทำการสร้างสายอากาศที่ออกแบบโดยการใช่โปรแกรม IE3D และทำการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศและนำผลมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IE3D จะพบว่าผลการทดสอบนั้นมีความใกล้เคียง และค่อนข้างตรงตามทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง อันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางการคำนวณด้วยโปรแกรม และความไม่พร้อมของเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างและการทดสอบ ดังนั้นจึงเกิดความไม่สะดวกอย่างมากในการทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานและความไม่สมบูรณ์ของสถานที่ทดสอบ

ข้อเสนอแนะ

สำหรับสายอากาศแบบแถวลำดับไดโพลบนฐานรอง PCB ที่ได้ทำการออกแบบและทดสอบนี้ มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลที่คำนวณได้จากโปรแกรม IE3D และค่าทางทฤษฎีอยู่พอสมควร ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการออกแบบด้วยทฤษฎี หรือออกแบบด้วยโปรแกรม และการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ สำหรับกรณีแรก การออกแบบสายอากาศที่ดีนั้น ควรที่จะค้นคว้าหาข้อมูลอย่างละเอียดและแม่นยำ เพื่อลดความผิดพลาดเนื่องจากการออกแบบ ซึ่งถือว่าเป็นจุดที่สำคัญที่สุดในการทำโครงการใดๆ ก็ตาม และการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับไดโพลบนฐานรอง PCB สายอากาศที่ได้ออกแบบในโครงการนี้ เนื่องจากในส่วนของ การจำลองด้วยโปรแกรม IE3D ไม่มีส่วนของตัวสะท้อนสัญญาณแต่เมื่อทำการสร้างสายอากาศต้นแบบ ที่นำมาวัดทดสอบ จำเป็นต้องมีปรากฏว่าส่วนของตัวตัวสะท้อนสัญญาณ นี้มีผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน กรณีที่สอง การทดสอบสายอากาศนั้นควรที่จะหาพื้นที่โล่งและกว้างพอสมควร เพื่อลดปัญหาการบังหรือสะท้อนของคลื่นระหว่างสายอากาศและเพื่อให้ได้ค่าที่แท้จริงมากที่สุด ควรจะใช้สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบทั้งภาคส่ง และภาครับ อยู่ในความถี่เดียวกันในการวัดเพื่อบันทึกค่านั้น ควรทำการวัดอย่างน้อย 2 ครั้ง เพื่อจะได้ค่าที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง ทำให้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่วัดได้ มีค่าผิดเพี้ยนไปจากการคำนวณด้วยโปรแกรม จึงควรจะมีการปรับปรุงและพัฒนาต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design 2nd Edition, John Wiley & Sons, INC. 1982
- [2] ผศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สวรรค์, Antenna Engineering, from <http://sut.ac.th/e-text/antennas>, 2004
- [3] IE3D User's Guide, from <http://www.Zeland.com>
- [4] โมไนย์ ไกรฤกษ์, วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ, 2544.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวพฤทธิยาพร สิงห์โตทอง เกิดเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2526 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลบ้านใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนโคราชพิทยาคม จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

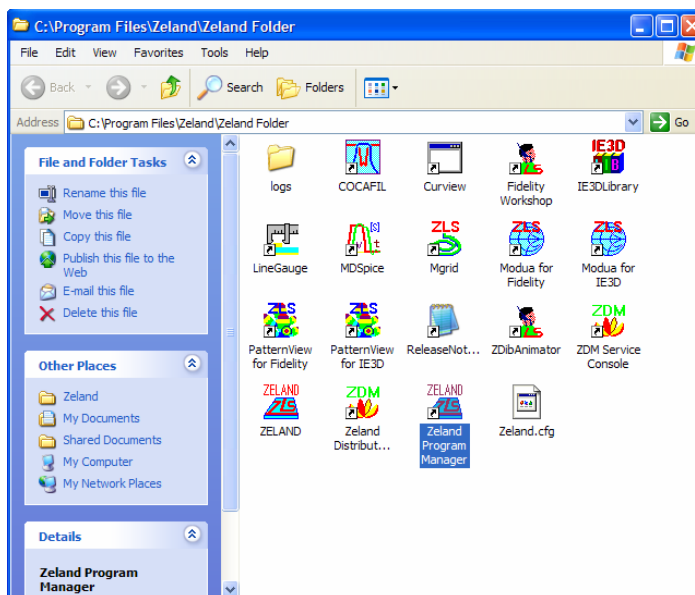
นายจานุวัฒน์ แก้วสิงห์ เกิดเมื่อวันที่ 11 มีนาคม พ.ศ. 2527 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลระโสม อำเภอภาชี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียน ภาชี “สุนทรวิทยานุกูล” จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก.

การใช้งานโปรแกรม IE3D ในการออกแบบสายอากาศลำดับโคโพลที่ 2.45 GHz แบบองค์ประกอบเดี่ยว

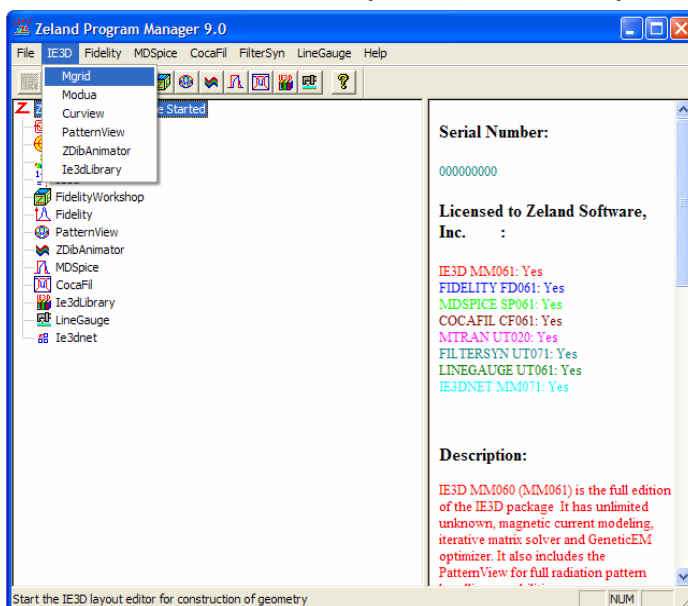
1. การเข้าใช้งานโปรแกรม

ดับเบิลคลิกที่ไอคอน Zeland Program Manager จะเห็นหน้าจอโปรแกรม ดังรูปที่ 1



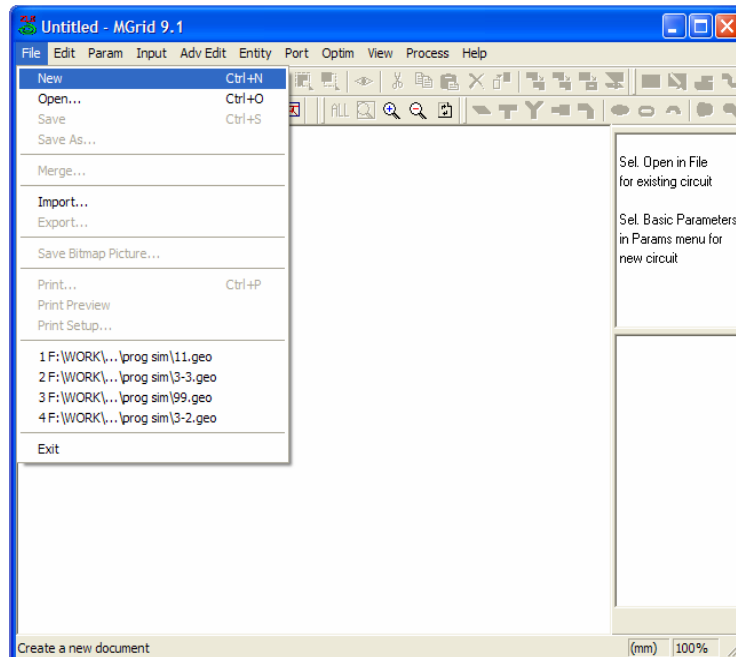
รูปที่ 1

2. เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนที่ 1 จะได้นหน้าต่างดังรูปที่ 2 จากนั้นไปที่เมนู IE3D→ Mgrid



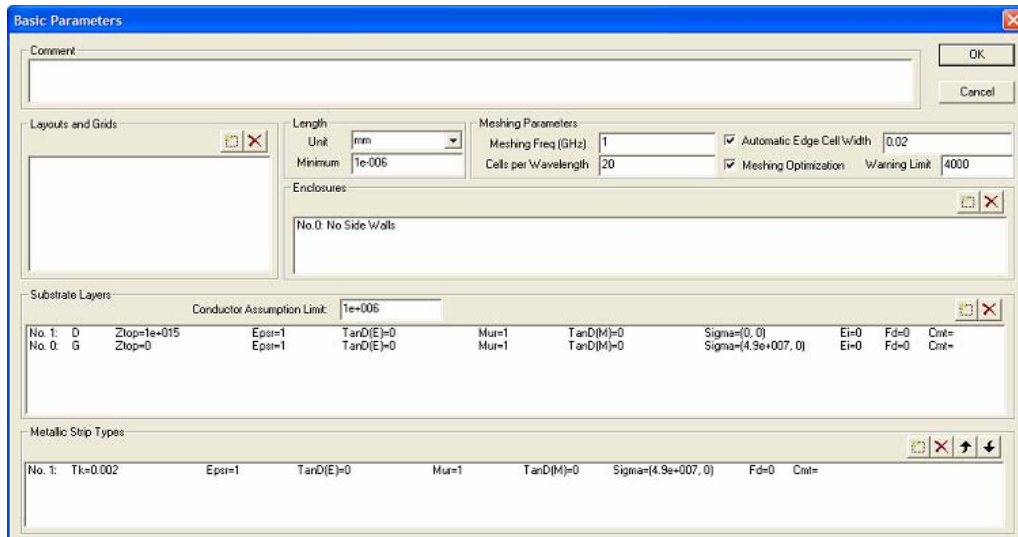
รูปที่ 2

3. เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนที่ 2 จะได้นหน้าต่างดังรูปที่ 3 จากนั้นไปที่เมนู File → New




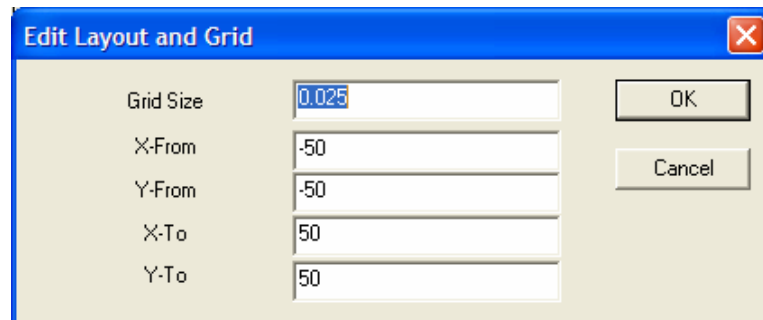
รูปที่ 3

4. เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนที่ 3 จะได้นหน้าต่างดังรูปที่ 4 ซึ่งในหน้าต่างนี้จะเป็นการกำหนดค่า Basic parameter โดยตั้งค่า Grid, Substrate layer และ Metallic layer แล้วกด OK



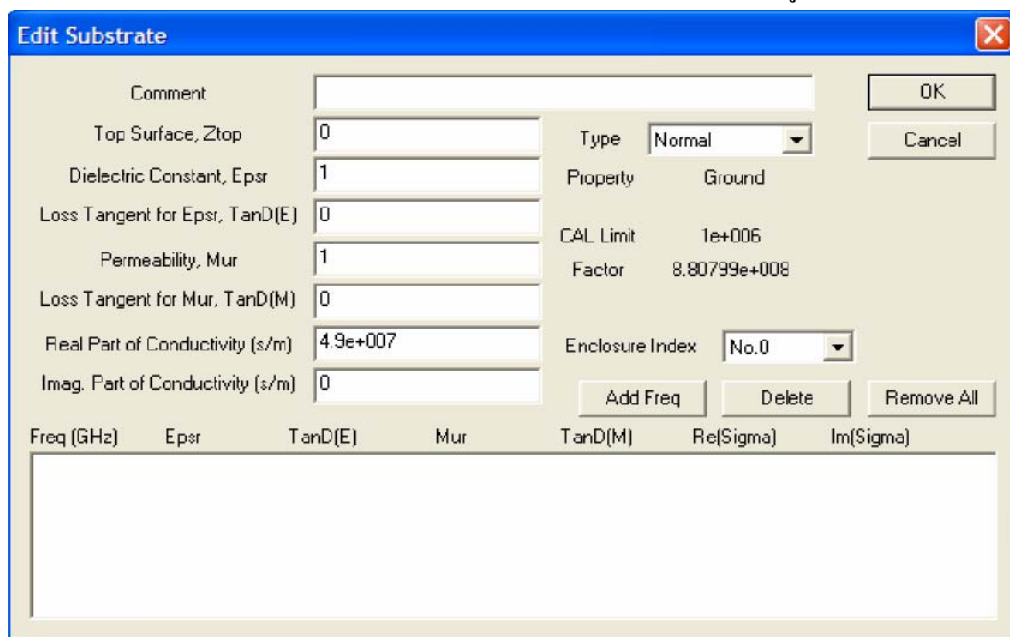
รูปที่ 4

5. คลิกที่ไอคอน  (Edit Layout and Grid) จากนั้นทำการใส่ค่าต่าง ๆ ลงในตาราง ดังรูป แล้วคลิก OK



รูปที่ 5

6. จากนั้นให้ไปที่ Substrate Layers แล้วคลิกที่ No.0 จากนั้นใส่ค่าตามรูปที่ 6 แล้วคลิก OK



รูปที่ 6

7. จากนั้นไปคลิกที่ No.1 แล้วใส่ค่าตามรูปที่ 7 แล้วคลิก OK

The 'Edit Substrate' dialog box shows the following settings:

- Comment: (empty)
- Top Surface, Ztop: 4.8
- Dielectric Constant, Epsr: 1
- Loss Tangent for Epsr, TanD(E): 0.02
- Permeability, Mur: 1
- Loss Tangent for Mur, TanD(M): 0
- Real Part of Conductivity (s/m): 0
- Imag. Part of Conductivity (s/m): 0
- Type: Normal
- Property: Dielectrics
- CAL Limit: 1e+006
- Factor: 1.0002
- Enclosure Index: No.0

Buttons: OK, Cancel, Add Freq, Delete, Remove All.

Freq (GHz)	Epsr	TanD(E)	Mur	TanD(M)	Re(Sigma)	Im(Sigma)

รูปที่ 7

8. จากนั้นให้ไปคลิกที่ No.2 แล้วใส่ค่าตามรูปที่ 8 แล้วคลิก OK


The 'Edit Substrate' dialog box shows the following settings:

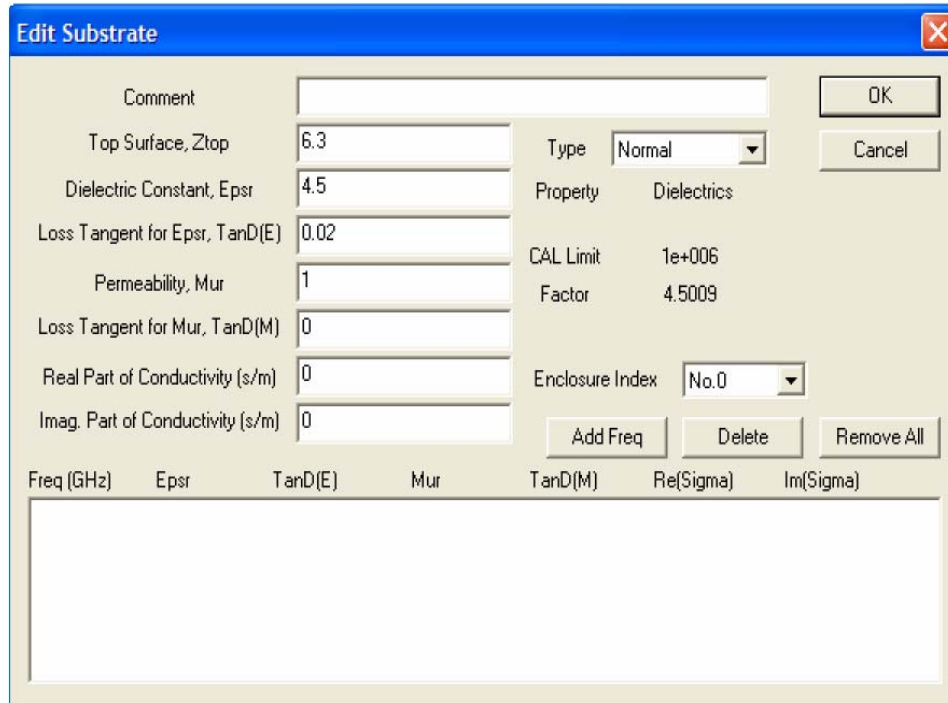
- Comment: (empty)
- Top Surface, Ztop: 4.8
- Dielectric Constant, Epsr: 1
- Loss Tangent for Epsr, TanD(E): 0
- Permeability, Mur: 1
- Loss Tangent for Mur, TanD(M): 0
- Real Part of Conductivity (s/m): 5.8e+007
- Imag. Part of Conductivity (s/m): 0
- Type: Normal
- Property: Ground
- CAL Limit: 1e+006
- Factor: 1.04258e+009
- Enclosure Index: No.0

Buttons: OK, Cancel, Add Freq, Delete, Remove All.

Freq (GHz)	Epsr	TanD(E)	Mur	TanD(M)	Re(Sigma)	Im(Sigma)

รูปที่ 8

9. จากนั้นให้ไปคลิกที่ No.3 แล้วใส่ค่าตามรูปที่ 9 แล้วคลิก OK (การเพิ่ม Layer ให้คลิกที่ ไอคอน )



Edit Substrate

Comment:

Top Surface, Ztop: Type:

Dielectric Constant, Epsr: Property: Dielectrics

Loss Tangent for Epsr, TanD(E): CAL Limit: 1e+006

Permeability, Mur: Factor: 4.5009

Loss Tangent for Mur, TanD(M): Enclosure Index:

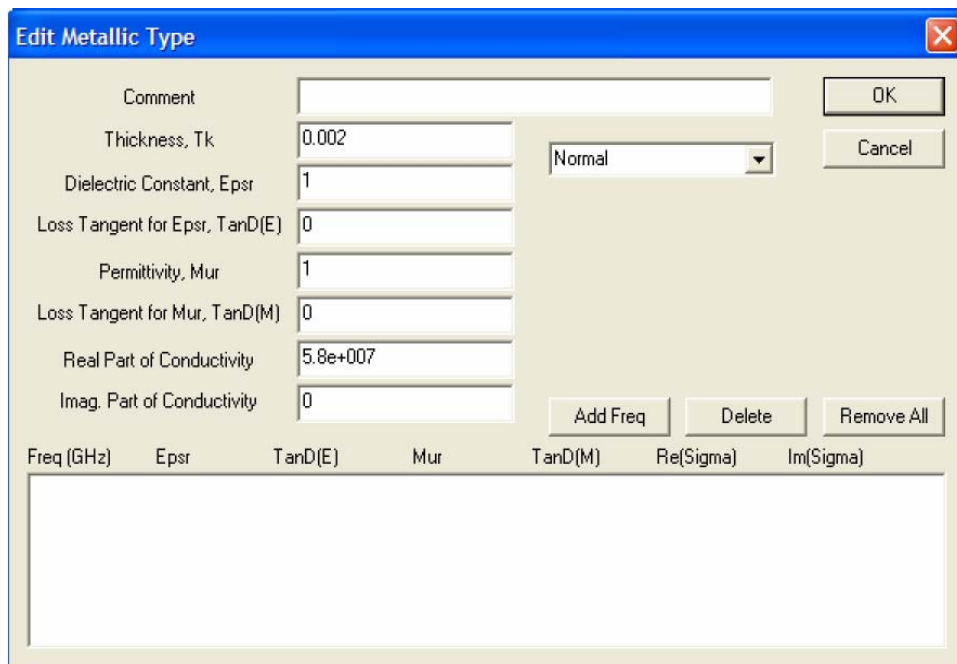
Real Part of Conductivity (s/m): Add Freq Delete Remove All

Imag. Part of Conductivity (s/m):

Freq (GHz)	Epsr	TanD(E)	Mur	TanD(M)	Re(Sigma)	Im(Sigma)

รูปที่ 9

10. จากนั้นไปที่ Metallic strip types แล้วคลิกที่ No.1 แล้วใส่ค่าตามรูปที่ 10 แล้วคลิก OK



Edit Metallic Type

Comment:

Thickness, Tk: Type:

Dielectric Constant, Epsr:

Loss Tangent for Epsr, TanD(E):

Permittivity, Mur:

Loss Tangent for Mur, TanD(M):

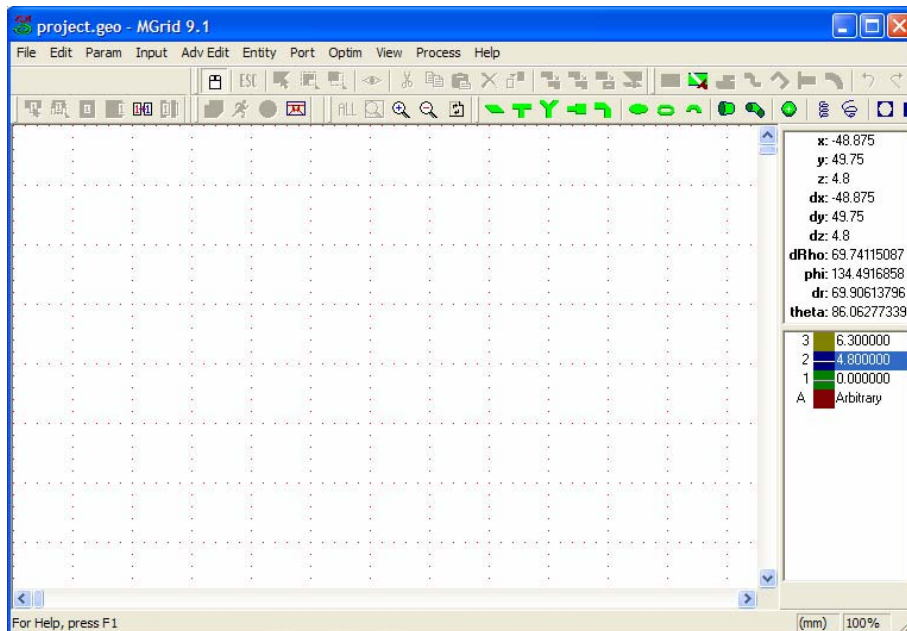
Real Part of Conductivity: Add Freq Delete Remove All

Imag. Part of Conductivity:

Freq (GHz)	Epsr	TanD(E)	Mur	TanD(M)	Re(Sigma)	Im(Sigma)

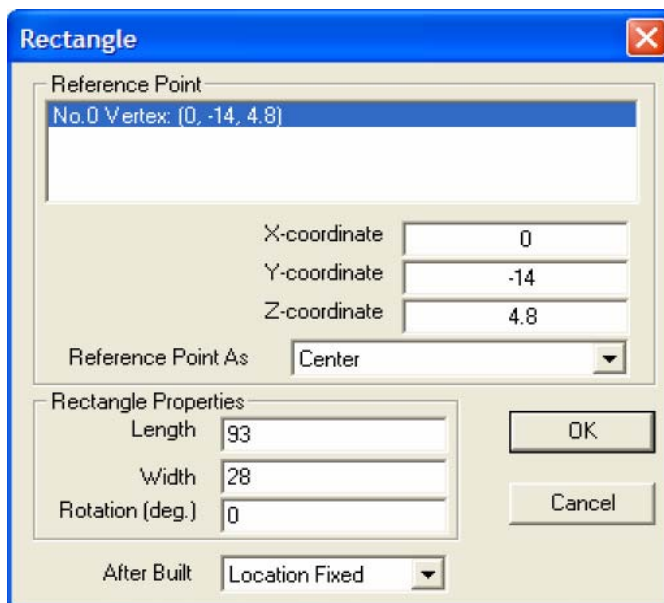
รูปที่ 10

11. เมื่อกำหนดค่า Basic parameter เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้คลิกที่ปุ่ม OK ที่หน้าต่าง Basic parameter ก็จะได้นหน้าต่าง ดังรูปที่ 11



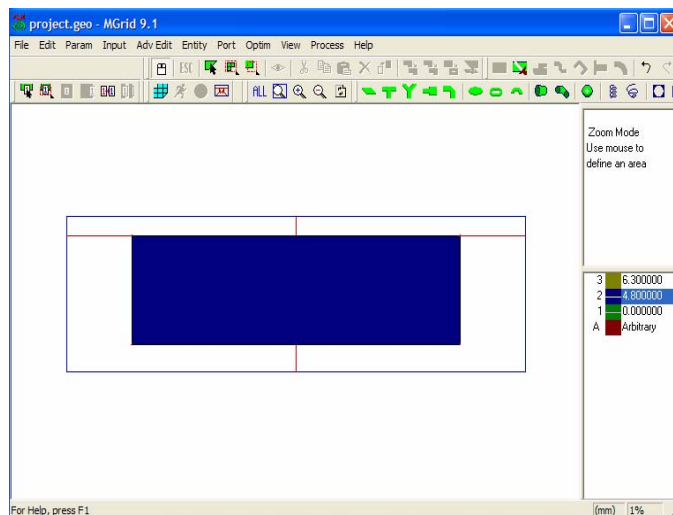
รูปที่ 11

12. เลือก Layer ที่ต้องการสร้างเป็นกราวด์ นั่นคือ Layer No. 2 ซึ่งเป็นทองแดง มีค่าความนำทางไฟฟ้า $5.8 \times 10^7 \Omega^{-1}/m$ ที่มีความสูงจากระนาบ ($x=0$, $y=0$) ขึ้นมา 4.8 mm จากนั้นเลือกไอคอน Rectangle แล้วทำการกำหนดค่า X,Y,Z-coordinate , length และ width



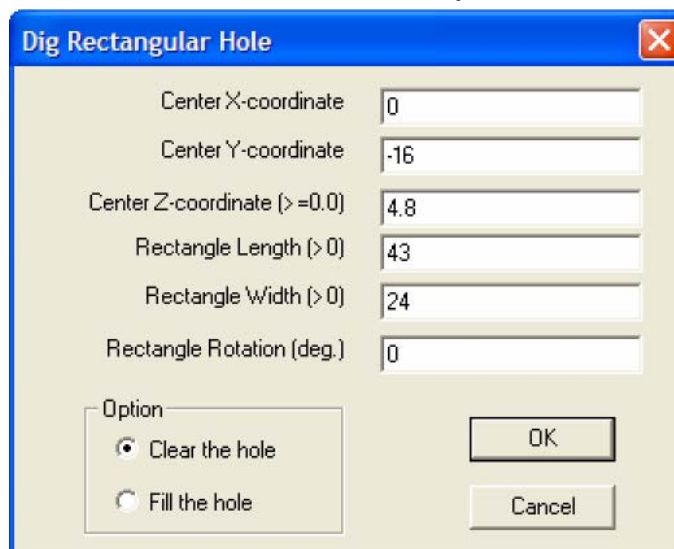
รูปที่ 12

13. เมื่อกำหนดค่าต่างๆ ในขั้นตอนที่ 12 เรียบร้อยแล้ว ให้คลิกที่ปุ่ม OK จะได้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 13



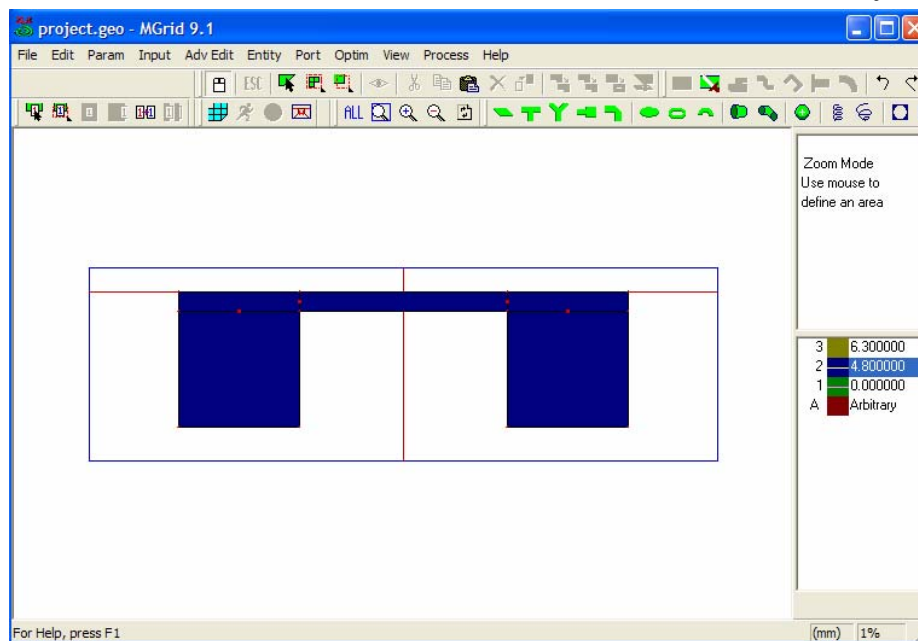
รูปที่ 13

14. เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนที่ 13 จากนั้นเลือกเมนู Adv Edit→ Dig Rectangular Hole... จะได้หน้าต่างของคำสั่งนี้ขึ้นมา แล้วกำหนดค่าต่างๆ ดังรูปที่ 14



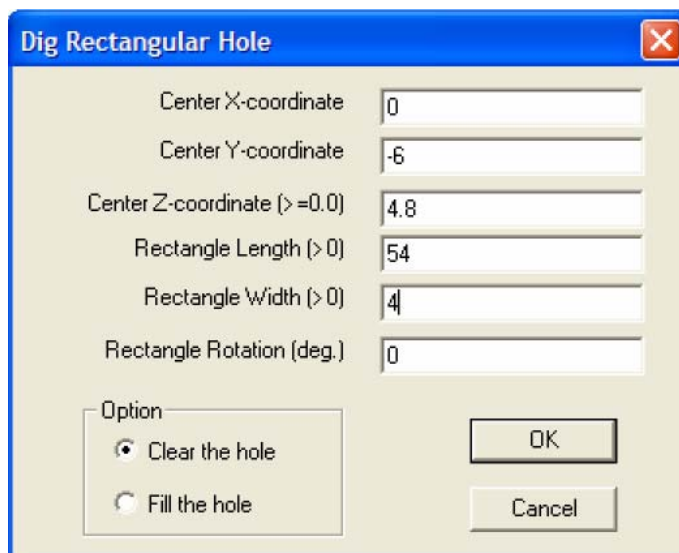
รูปที่ 14

15. เมื่อกำหนดค่าต่างๆ ในขั้นตอนที่ 14 เรียบร้อยแล้ว ให้คลิกที่ปุ่ม OK จะได้ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15

16. ทำตามขั้นตอนที่ 14 แต่จะต่างกันตรงค่าที่กำหนด ซึ่งจะกำหนดค่าตามขั้นตอนดังรูปที่ 16.1 ,16.2 และ 16.3 ตามลำดับ



รูปที่ 16.1

Dig Rectangular Hole ✖

Center X-coordinate

Center Y-coordinate

Center Z-coordinate (>=0.0)

Rectangle Length (> 0)

Rectangle Width (> 0)

Rectangle Rotation (deg.)

Option

Clear the hole

Fill the hole

រូបភាព 16.2

Dig Rectangular Hole ✖

Center X-coordinate

Center Y-coordinate

Center Z-coordinate (>=0.0)

Rectangle Length (> 0)

Rectangle Width (> 0)

Rectangle Rotation (deg.)

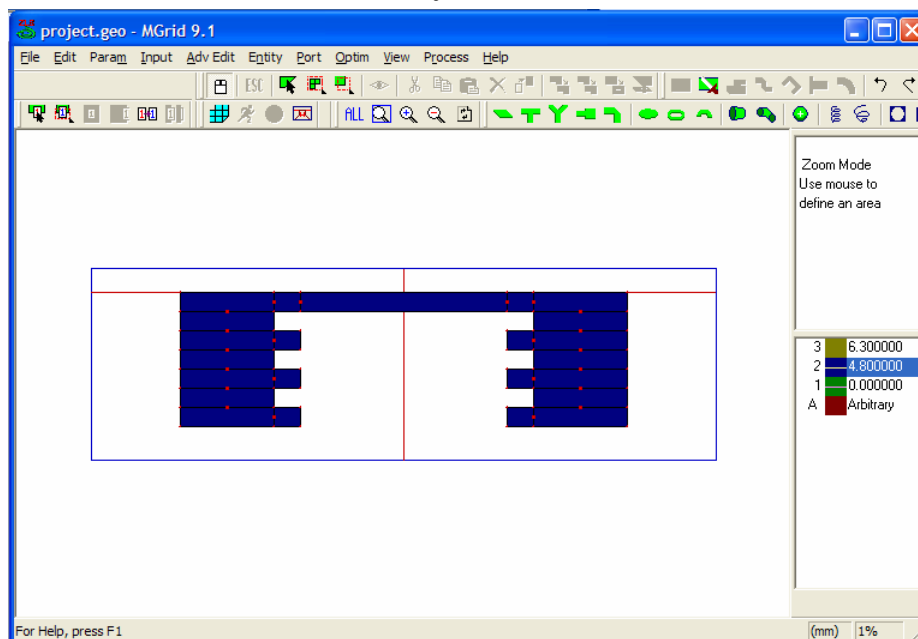
Option

Clear the hole

Fill the hole

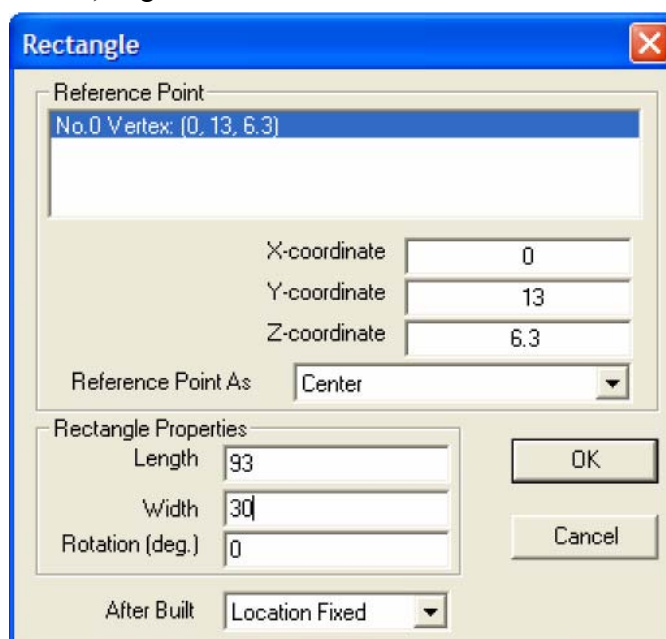
រូបភាព 16.3

17. เมื่อทำตามขั้นตอนที่ 16 แล้วจะได้ดังรูปที่ 17



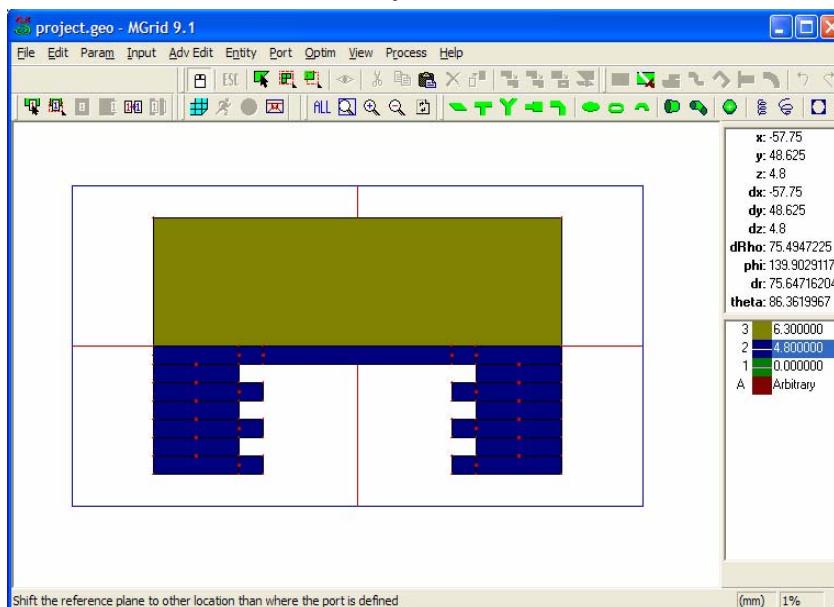
รูปที่ 17

18. ทำการเลือก Layer No.3 ซึ่งเป็น Layer ที่ใช้ทำเป็นตัวสายอากาศซึ่งเป็นทองแดง และมีความสูงจากราวน้เท่ากับความสูงของ substrate (1.5 mm.) ซึ่งหมายความว่า จะสูงจากระนาบ ($x=0$, $y=0$) ขึ้นมา 6.3 mm. แล้วเลือกไอคอน Rectangle แล้วทำการกำหนดค่า X,Y,Z-coordinate , length และ width



รูปที่ 18

19. เมื่อทำตามขั้นตอนที่ 18 แล้วจะได้ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19

20. ทำตามขั้นตอนที่ 19 แล้วกำหนดค่าต่างๆ ดังรูปที่ 20.1, 20.2, 20.3, 20.4 และ 20.5



รูปที่ 20.1

Dig Rectangular Hole ✕

Center X-coordinate

Center Y-coordinate

Center Z-coordinate (>=0.0)

Rectangle Length (> 0)

Rectangle Width (> 0)

Rectangle Rotation (deg.)

Option

Clear the hole

Fill the hole

รูปที่ 20.2

Dig Rectangular Hole ✕

Center X-coordinate

Center Y-coordinate

Center Z-coordinate (>=0.0)

Rectangle Length (> 0)

Rectangle Width (> 0)

Rectangle Rotation (deg.)

Option

Clear the hole

Fill the hole

รูปที่ 20.3

Dig Rectangular Hole ✖

Center X-coordinate

Center Y-coordinate

Center Z-coordinate (>=0.0)

Rectangle Length (> 0)

Rectangle Width (> 0)

Rectangle Rotation (deg.)

Option

Clear the hole

Fill the hole

រូបភាព 20.4

Dig Rectangular Hole ✖

Center X-coordinate

Center Y-coordinate

Center Z-coordinate (>=0.0)

Rectangle Length (> 0)

Rectangle Width (> 0)

Rectangle Rotation (deg.)

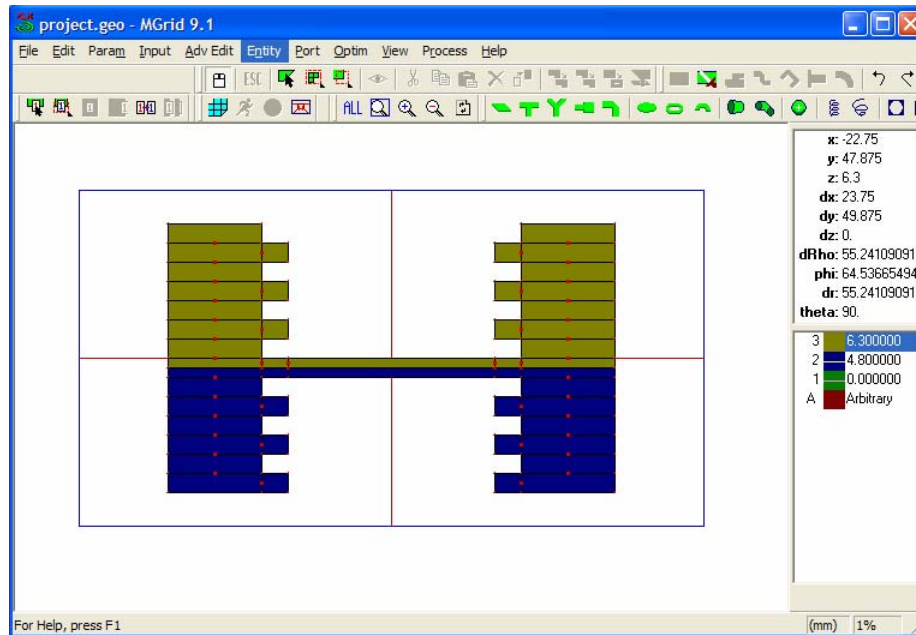
Option

Clear the hole

Fill the hole

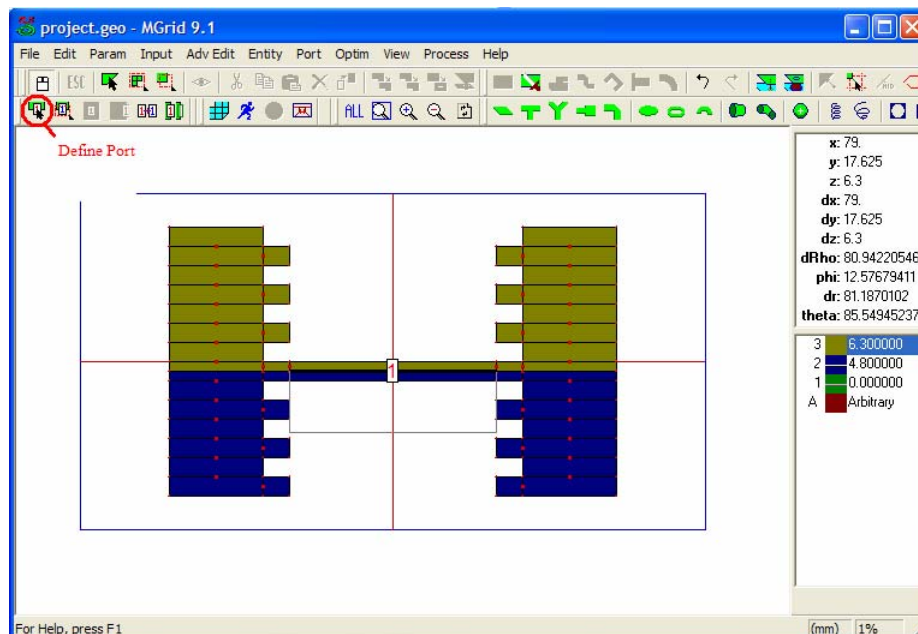
រូបភាព 20.5

21. เมื่อเสร็จขั้นตอนที่ 20. จะได้ดังรูปที่ 21



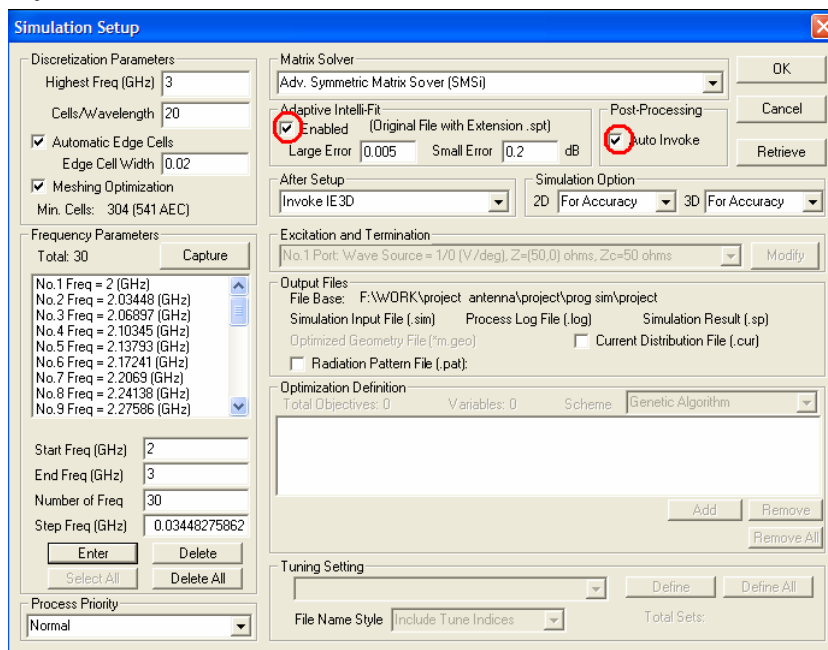
รูปที่ 21

22. เลือกคำสั่ง Define Port เพื่อทำการกำหนดจุด Feed ให้แก่สายอากาศ เมื่อทำการกำหนดตำแหน่งเสร็จแล้วจะได้ดังรูปที่ 22

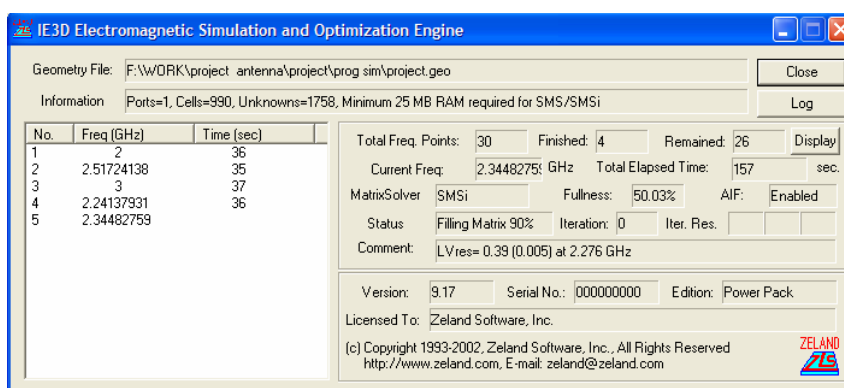


รูปที่ 22

23. ขั้นตอนนี้จะเป็นการวิเคราะห์สายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D โดยไปที่เมนู Process → Simulate แล้วจะได้หน้าต่าง Simulate Setup ให้ทำการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศดังรูปที่ 23.1 แล้วคลิกที่ปุ่ม OK → yes → yes จะได้หน้าต่างดังรูป ที่ 23.2

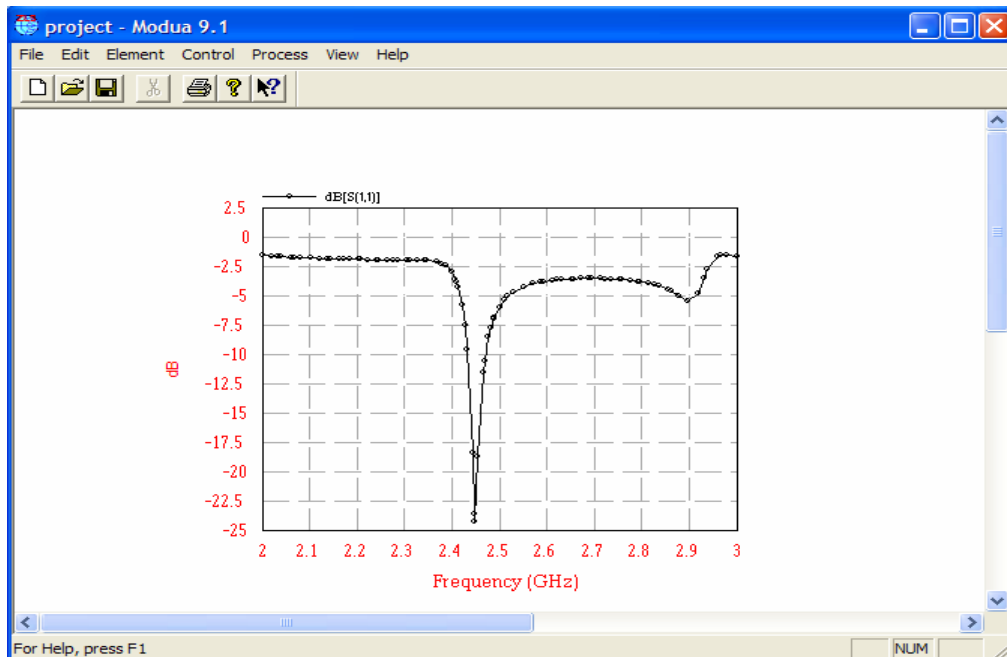


รูปที่ 23.1



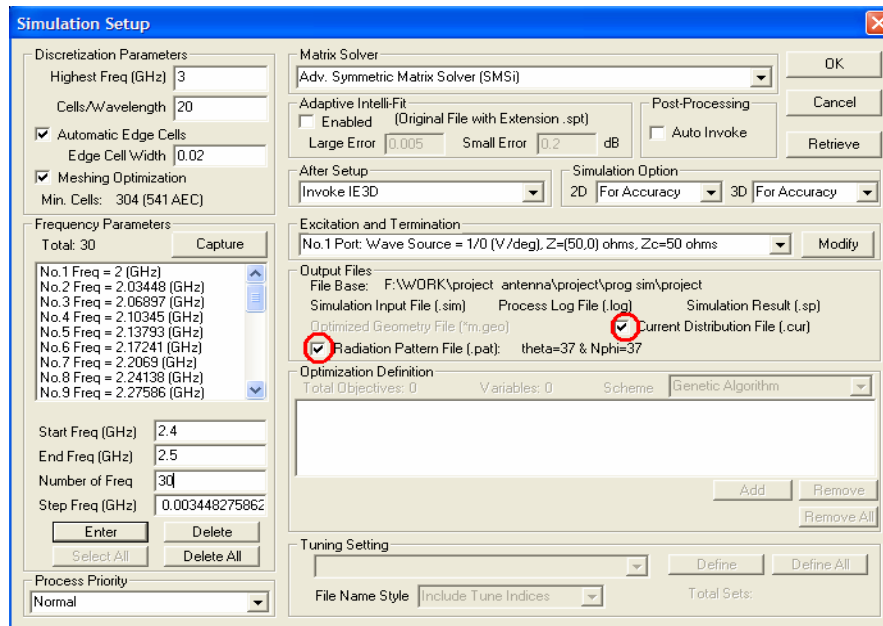
รูปที่ 23.2

เมื่อโปรแกรมทำการ Simulate เสร็จเรียบร้อยแล้ว จะได้กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss : S_{11}) ดังรูปที่ 23.3



รูปที่ 23.3

24. ขั้นตอนนี้จะเป็นการแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างของสายอากาศ จากหน้าต่างที่แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับ ให้ไปที่เมนู Control→Define display graph แล้วเลือกกราฟของพารามิเตอร์ที่ต้องการ
25. ขั้นตอนนี้จะเป็นการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ทำตามขั้นตอนที่ 23 แต่จะเปลี่ยนจุดที่ใส่เครื่องหมายถูก แล้วคลิกที่ปุ่ม OK→Overwrite→yes



รูปที่ 24

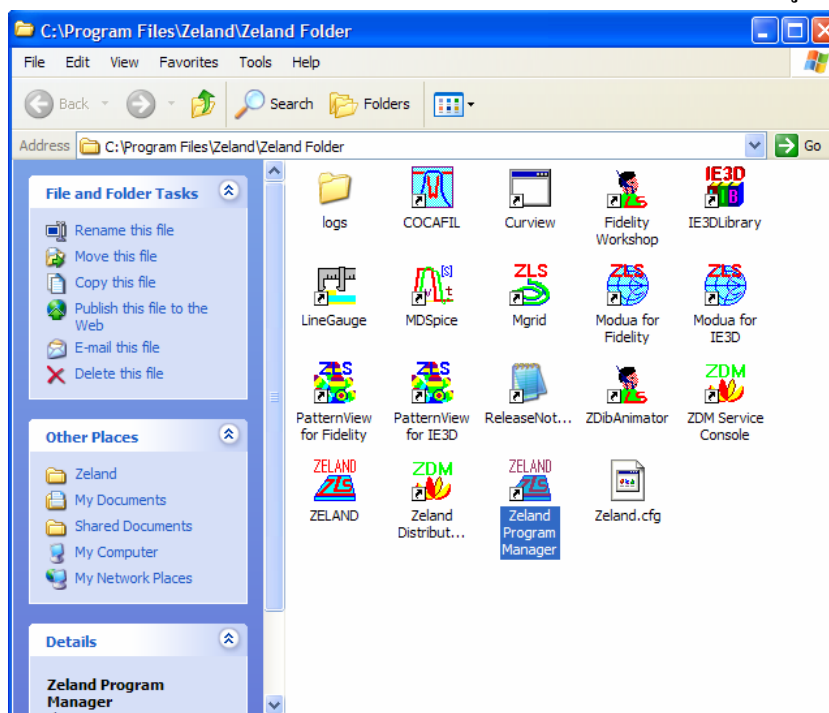
เมื่อโปรแกรมทำการ Simulate เสร็จ ให้ไปที่หน้าต่างดังรูปในขั้นตอนที่ 22 แล้วไปที่คำสั่ง Process→Display Radiation pattern แล้วเปิดไฟล์ที่ทำการ Simulate นั้นขึ้นมา จะได้หน้าต่าง Pattern View ขึ้นมา ไปที่เมนู Display แล้วเลือก Pattern View ที่เราต้องการขึ้นมาเพื่อดู Radiation pattern ของสายอากาศ

ภาคผนวก ข.

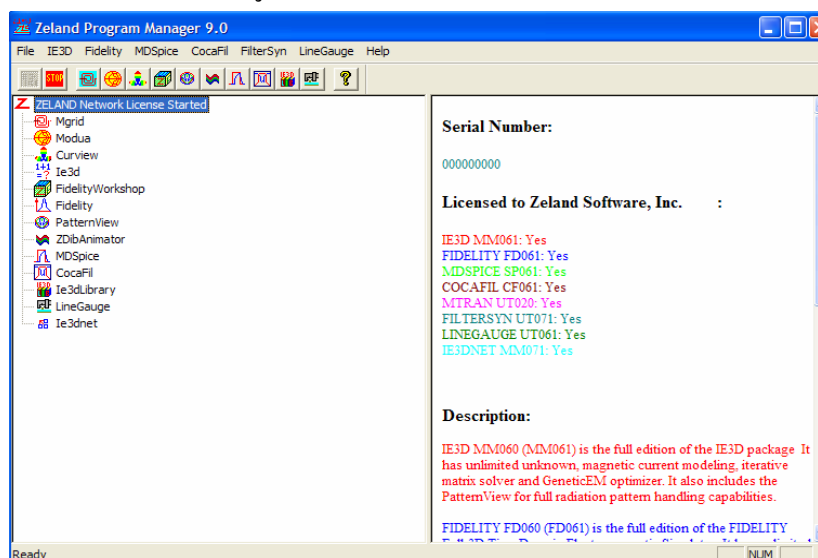
การออกแบบ Feed Line โดยใช้โปรแกรม IE3D

1. การเข้าใช้งานโปรแกรม

ดับเบิลคลิกที่ไอคอน Zeland Program Manager ในหน้าต่างโปรแกรม ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1

2. คลิกที่ไอคอน  หรือไปที่เมนู Line gauge → Line gauge

รูปที่ 2

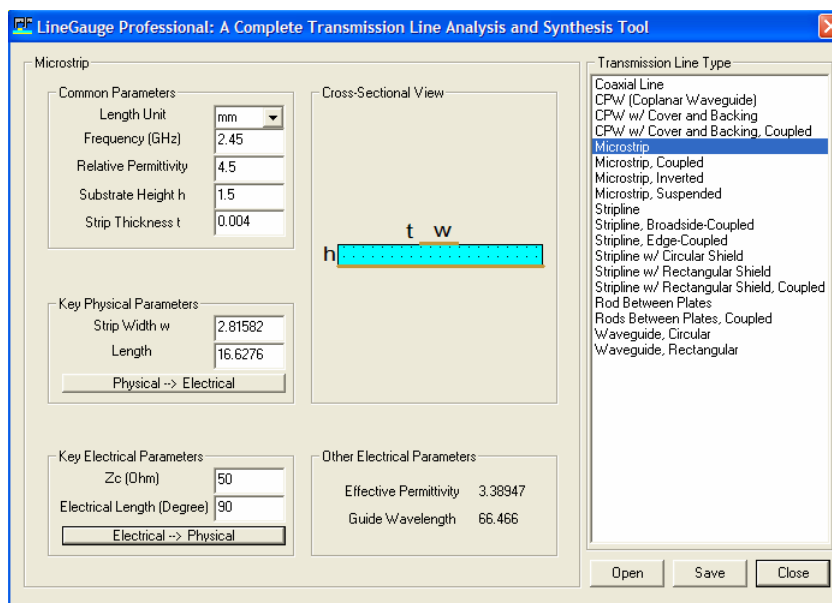
เมื่อทำขั้นตอนที่ 2 เสร็จแล้วจะได้หน้าต่าง LineGauge โดยที่แถบ Transmission line type เลือกเป็น Microstrip และกำหนดค่า Common Parameters ดังนี้

Length Unit	:	หน่วยความยาว	:	mm
Frequency (GHz)	:	ความถี่ที่ใช้งาน	:	2.45
Relative Permittivity	:			
Substrate Height (h)	:	ความสูงของ Substrate	:	1.5
Strip Thickness (t)	:	ความหนาของ Strip	:	0.004

Key Physical Parameters

Zc	:	ความต้านทานที่ต้องการ	:	50
Electrical Length	:	มุมเฟส	:	90

จากนั้นคลิกที่ปุ่ม Electrical → Physical ดังรูป



3. จะได้ขนาดของ Feed Line คือ กว้าง 2.81582 มม. และ ยาว 16.2776 มม.

ภาคผนวก ค.

ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียย้อนกลับ กับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

table of return loss vs. voltage standing wave ratio

RETURN LOSS (dB)	VSWR	RETURN LOSS (dB)	VSWR	RETURN LOSS (dB)	VSWR	RETURN LOSS (dB)	VSWR	RETURN LOSS (dB)	VSWR
46.064	1.01	13.842	1.51	9.485	2.01	7.327	2.51	5.999	3.01
40.086	1.02	13.708	1.52	9.428	2.02	7.294	2.52	5.970	3.02
36.607	1.03	13.577	1.53	9.372	2.03	7.262	2.53	5.956	3.03
34.151	1.04	13.449	1.54	9.317	2.04	7.230	2.54	5.935	3.04
32.256	1.05	13.324	1.55	9.262	2.05	7.198	2.55	5.914	3.05
30.714	1.06	13.201	1.56	9.208	2.06	7.167	2.56	5.893	3.06
29.417	1.07	13.081	1.57	9.155	2.07	7.135	2.57	5.872	3.07
28.299	1.08	12.964	1.58	9.103	2.08	7.105	2.58	5.852	3.08
27.318	1.09	12.849	1.59	9.051	2.09	7.074	2.59	5.832	3.09
26.444	1.10	12.736	1.60	8.999	2.10	7.044	2.60	5.811	3.10
25.658	1.11	12.625	1.61	8.949	2.11	7.014	2.61	5.791	3.11
24.943	1.12	12.518	1.62	8.899	2.12	6.984	2.62	5.771	3.12
24.289	1.13	12.412	1.63	8.849	2.13	6.954	2.63	5.751	3.13
23.686	1.14	12.308	1.64	8.800	2.14	6.925	2.64	5.732	3.14
23.127	1.15	12.207	1.65	8.752	2.15	6.896	2.65	5.712	3.15
22.607	1.16	12.107	1.66	8.705	2.16	6.867	2.66	5.693	3.16
22.120	1.17	12.009	1.67	8.657	2.17	6.839	2.67	5.674	3.17
21.664	1.18	11.913	1.68	8.611	2.18	6.811	2.68	5.654	3.18
21.234	1.19	11.818	1.69	8.565	2.19	6.783	2.69	5.635	3.19
20.828	1.20	11.725	1.70	8.519	2.20	6.755	2.70	5.617	3.20
20.443	1.21	11.634	1.71	8.474	2.21	6.728	2.71	5.598	3.21
20.079	1.22	11.545	1.72	8.430	2.22	6.700	2.72	5.579	3.22
19.732	1.23	11.457	1.73	8.386	2.23	6.673	2.73	5.561	3.23
19.401	1.24	11.370	1.74	8.342	2.24	6.646	2.74	5.542	3.24
19.085	1.25	11.285	1.75	8.299	2.25	6.620	2.75	5.524	3.25
18.783	1.26	11.202	1.76	8.257	2.26	6.594	2.76	5.506	3.26
18.493	1.27	11.120	1.77	8.215	2.27	6.567	2.77	5.488	3.27
18.216	1.28	11.039	1.78	8.173	2.28	6.541	2.78	5.470	3.28
17.949	1.29	10.960	1.79	8.138	2.29	6.516	2.79	5.452	3.29
17.690	1.30	10.881	1.80	8.091	2.30	6.490	2.80	5.435	3.30
17.445	1.31	10.804	1.81	8.051	2.31	6.465	2.81	5.417	3.31
17.207	1.32	10.729	1.82	8.011	2.32	6.440	2.82	5.400	3.32
16.977	1.33	10.654	1.83	7.972	2.33	6.415	2.83	5.383	3.33
16.755	1.34	10.581	1.84	7.933	2.34	6.390	2.84	5.365	3.34
16.540	1.35	10.509	1.85	7.894	2.35	6.366	2.85	5.348	3.35
16.332	1.36	10.437	1.86	7.856	2.36	6.341	2.86	5.331	3.36
16.131	1.37	10.367	1.87	7.818	2.37	6.317	2.87	5.315	3.37
15.936	1.38	10.298	1.88	7.781	2.38	6.293	2.88	5.298	3.38
15.747	1.39	10.230	1.89	7.744	2.39	6.270	2.89	5.281	3.39
15.563	1.40	10.163	1.90	7.707	2.40	6.246	2.90	5.265	3.40
15.385	1.41	10.097	1.91	7.671	2.41	6.223	2.91	5.248	3.41
15.211	1.42	10.032	1.92	7.635	2.42	6.200	2.92	5.232	3.42
15.043	1.43	9.968	1.93	7.599	2.43	6.177	2.93	5.216	3.43
14.879	1.44	9.904	1.94	7.564	2.44	6.154	2.94	5.200	3.44
14.719	1.45	9.842	1.95	7.529	2.45	6.131	2.95	5.184	3.45
14.564	1.46	9.780	1.96	7.494	2.46	6.109	2.96	5.168	3.46
14.412	1.47	9.720	1.97	7.460	2.47	6.086	2.97	5.152	3.47
14.264	1.48	9.660	1.98	7.426	2.48	6.064	2.98	5.137	3.48
14.120	1.49	9.601	1.99	7.393	2.49	6.042	2.99	5.121	3.49
13.979	1.50	9.542	2.00	7.360	2.50	6.021	3.00	5.105	3.50