

CONTRIBUTION



สายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปรีปสี่เหลี่ยม
บนผิวของผิวโค้งทรงกลมที่มีตัวรวมกำลังงานและสายเฟสที่ความถี่ 3.5 GHz

(Rectangular Microstrip Antenna Array on Quartered-Spherical Surface
with Power Combiner and Phasing Line at 3.5 GHz)

โดย

นางสาว รัชฎา อ่อนมุก	รหัสประจำตัว	B4500513
นางสาว สุภัตรา บุญลาด	รหัสประจำตัว	B4507260
นางสาว กิรดา รัตนนที	รหัสประจำตัว	B4511915

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427494 โครงการศึกษาวិชาการวิศวกรรมโทรคมนาคม
และ 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม


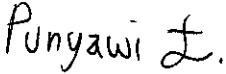

ประจำภาคปีการศึกษาที่ 1 และ 2 ปีการศึกษา 2548

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ.2541

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Special Project in Telecommunication Report Certification
School of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology

Project Title Rectangular Microstrip Antenna Array on Quartered- Spherical
Surface with Power Combiner and Phasing Line at 3.5 GHz
Student Miss Ratchanoo Onmuk No.B4500513
Miss Supattra Boonlad No.B4507260
Miss Keerata Ruttanon No.B4511915
Degree Bachelor of Engineering
Program Telecommunication Engineering
Project Advisor Asst. Prof. Dr. Rangsak Wongsak

Examiners	Signatures
Asst. Prof. Dr. Rangsak Wongsak	
Asst. Prof. Punyawit Jamjareekul	
Ms. Piyapon Krachodnok	

Date 29 March 2006 **Time** 11.00-12.00 a.m.
Place Telecommunication Laboratory

หัวข้อโครงการ	Rectangular Microstrip Antenna Array on Quartered-Spherical Surface with Power Combiner and Phasing Line at 3.5 GHz
(ภาษาไทย)	สายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมบนผิวของผิวโค้งทรงกลมที่มีตัวรวมกำลังงานและสายเฟสที่ความถี่ 3.5 GHz
นักศึกษา	นางสาว รัชฎา อ่อนมุข B4500513 นางสาว สุภัตรา บุญลาด B4507260 นางสาว กิรดา รัตนนท์ B4511915
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
พ.ศ.	2548
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	ผศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรุทธ์

บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้ เป็นการศึกษาวิเคราะห์ ออกแบบตัวสายอากาศ รวมถึงทดสอบและประเมินคุณสมบัติของสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมบนผิวของผิวโค้งทรงกลม สำหรับเครือข่ายบรอดแบนด์แบบไร้สายที่ความถี่ 3.5 GHz ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสายอากาศแบบแพทช์ ซึ่งได้ทำการศึกษาแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง อิมพีแดนซ์อินพุต และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ของสายอากาศโดยใช้โปรแกรม IE3D ในการจำลองสายอากาศและได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบ เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงการสื่อสารภายใต้สภาพแวดล้อมการใช้งานจริงในระบบการสื่อสารที่ความถี่ปฏิบัติการ 3.5 GHz และทำการทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศแถวลำดับที่ใช้สายนำสัญญาณ 2 แบบคือตัวรวมสัญญาณและสายเฟส กับสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับพบว่า สายอากาศแถวลำดับที่ใช้สายนำสัญญาณทั้ง 2 แบบให้ผลที่ใกล้เคียงกันซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว และสายอากาศบนผิวโค้งมีประสิทธิภาพมากกว่าสายอากาศบนผิวระนาบเรียบ จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่นำเสนอในโครงการนี้มีคุณสมบัติเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานจริง

กิตติกรรมประกาศ

คุณความดีอันใดที่เกิดจากโครงการฉบับนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา และพี่ๆ ของข้าพเจ้า ผู้ที่คอยห่วงใย ให้โอกาส ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด

โครงการเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ที่เป็นเจ้าของแนวคิดเริ่มแรกของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมแฉกลำดับบนเสี้ยวของพื้นผิวโค้งทรงกลม เพื่อใช้เป็นสายอากาศรับส่งคลื่นในเครือข่ายบรอดแบนด์แบบไร้สายระยะไกลซึ่งทำงานที่ความถี่ 3.5 GHz รวมถึงให้ความช่วยเหลือในการให้แนวคิด การดูแลเอาใจใส่ติดตามผลงาน ซึ่งแนะนำขอพร่องที่ข้าพเจ้ามองข้าม ตลอดจนฝึกฝนและสนับสนุนข้าพเจ้าให้มีความสามารถในการทำโครงการจนสามารถนำเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและยอมรับได้

ขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ดังนี้

- อ.ดร. ชาญชัย ทองโสภิต ที่ให้ความรู้ในการออกแบบตัวรวมสัญญาณ
- อาจารย์ ปิยาภรณ์ กระฉอดนอก ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบตัวรวมสัญญาณ โดยการใช้ทรานสฟอร์มเมอร์ความยาวคลื่นส่วนสี่
- อาจารย์ อุษา คงเมือง ที่ให้ความรู้ในการใช้โปรแกรม IE3D การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป และสายอากาศไดโพล
- คุณประพล จาระตะคุ วิศวกรประจำอาคารเครื่องมือ 3 ที่ช่วยเป็นธุระช่วยเหลือในการเบิกอุปกรณ์ และช่วยอำนวยความสะดวกในการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน
- พี่นักศึกษาปริญญาโททุกท่านที่คอยแนะนำ และให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์
- พี่ๆประจำอาคารเครื่องมือ 1 และ 6 ที่ให้ความช่วยเหลือในการเบิกและใช้อุปกรณ์
- เพื่อนๆ วิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนสำหรับความช่วยเหลือที่ดีทุกด้านตลอดจนกำลังใจที่มอบให้แก่คณะผู้จัดทำตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบข่ายงาน.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริป.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป.....	4
2.2.1 ข้อดีและข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป.....	5
2.2.2 คุณสมบัติของซັบสเตรต.....	6
2.3 คุณลักษณะของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	7
2.4 วิธีการป้อนสัญญาณ.....	9
2.5 ผลกระทบจากไดอิเล็กทริกซັบสเตรต.....	11
2.6 ผลกระทบจากขนาดของแผ่นกราวด์.....	12
2.7 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน.....	14
2.8 การสูญเสียและองค์ประกอบคุณภาพ.....	17
2.9 สายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริป.....	20
2.10 การคำนวณขนาดของสายอากาศ.....	25
2.11 สรุป.....	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 สายอากาศไมโครสตริปบนผิวโค้ง.....	28
3.1 กล่าวนำ.....	28
3.2 แบบจำลองรูปทรงผิวโค้ง.....	28
3.3 สนามไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนผิวโค้ง.....	30
3.4 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น.....	31
3.5 สรุป.....	33
บทที่ 4 การออกแบบสายเฟสและตัวรวมสัญญาณ.....	34
4.1 กล่าวนำ.....	34
4.2 การออกแบบสายเฟส.....	34
4.2.1 การออกแบบจุดป้อนสัญญาณ.....	34
4.2.2 ทฤษฎีสายเฟส.....	36
4.2.3 สายแกนร่วม.....	38
4.2.4 เปรียบเทียบระหว่างสายแกนร่วมแบบบางและสายแกนร่วมแบบหนา.....	40
4.2.5 การชีลด์ (shield) สายนำสัญญาณ.....	40
4.3 การออกแบบตัวรวมสัญญาณ.....	42
4.3.1 การออกแบบจุดป้อนสัญญาณ.....	42
4.3.2 การแบ่งกำลังงานแบบวิคตินสัน.....	44
4.3.3 สายนำสัญญาณยาว $\lambda / 4$	52
4.4 สรุป.....	55
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	56
5.1 กล่าวนำ.....	56
5.2 วิธีการทดลอง.....	56
5.2.1 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ.....	57
5.2.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	58
5.2.3 อิมพีแดนซ์อินพุต.....	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.4 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน.....	58
5.2.5 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง.....	61
5.2.6 อัตราขยาย.....	62
5.3 ผลการทดลอง.....	63
5.3.1 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ.....	63
5.3.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	65
5.3.3 อิมพีแดนซ์อินพุต.....	67
5.3.4 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน.....	69
5.3.5 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง.....	72
5.3.6 อัตราขยาย.....	73
5.4 ผลการทดลองการสูญเสียภายใน.....	75
5.4.1 ผลการทดลองจากการออกแบบสายเฟส.....	75
5.4.2 ผลการทดลองจากการออกแบบตัวรวมสัญญาณ.....	78
5.5 สรุป.....	81
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	82
6.1 บทสรุป.....	82
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
บรรณานุกรม.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	85
ภาคผนวก ก การจำลองสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม IE3D.....	86
ภาคผนวก ข การออกแบบตัวป้อนสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม IE3D.....	91
ภาคผนวก ค การทดสอบแผ่นขับสเตรต	94

สารบัญรูป

	หน้า
2.1 การออกแบบจุดป้อนสัญญาณ.....	5
2.2 สายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	7
2.3 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพทช์.....	8
2.4 วิธีการป้อนสัญญาณสำหรับสายอากาศไมโครสตริป.....	9
2.5 วงจรสมดุสสำหรับวิธีการการป้อนสัญญาณในรูปที่ 2.4.....	10
2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการแผ่คลื่นกับคุณสมบัติของไดอิเล็กตริก.....	12
2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์กับขนาดของแผ่นกราวด์.....	13
2.8 การเปรียบเทียบแบบรูปในระนาบของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นกราวด์ขนาด 2λ และแผ่นกราวด์ขนาดใหญ่.....	14
2.9 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามไฟฟ้าและระนาบ ของสนามแม่เหล็กขององค์ประกอบเรโซแนนซ์บนแพทช์รูปสี่เหลี่ยม W และ h สำหรับ $\epsilon_r = 2.2$	16
2.10 การผันแปรของกำลังงานที่แผ่ออกไป (P_r), การสูญเสียที่เกิดจากตัวนำ (P_c), และ การสูญเสียไดอิเล็กตริก (P_d) ตามฟังก์ชันความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโหมด TM_{10}	18
2.11 การผันแปรขององค์ประกอบคุณภาพทั้งหมดกับความถี่เรโซแนนซ์สำหรับ โหมด TM_{10} ของแพทช์รูปสี่.....	20
2.12 สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีการส่งกำลังงาน P_1	22
2.13 สายอากาศซึ่งมีสององค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1	22
2.14 สายอากาศซึ่งมีสี่องค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1	23
2.15 ขนาดของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 3.5 GHz แผ่นซับสเตรตหนา 3 มม. $\epsilon_r = 1.2$	27
3.1 แบบจำลองสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมบนผิวโค้ง.....	29
3.2 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป รูปสี่เหลี่ยมบนผิวโค้ง 2 ชนิด.....	32
3.3 แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามไฟฟ้า.....	33
4.1 การคำนวณหาจุดป้อนสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม IE3D.....	34
4.2 แสดงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 200 โอห์มที่คำนวณได้จากโปรแกรม IE3D.....	35
4.3 การติดตั้งแผ่นทองแดงแถวลำดับบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม.....	36
4.4 แสดงค่าความต้านทานที่ปลายสายเมื่อทำการแมตช์สายเฟส.....	37
4.5 แสดงลักษณะของสายแกนร่วมแต่ละประเภท.....	39

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.6 สายเฟสที่ได้จากการออกแบบเมื่อต่อเข้ากับขั้วต่อ.....	41
4.7 สายอากาศไมโครสตริปเมื่อต่อเข้ากับสายเฟส.....	42
4.8 การคำนวณหาจุดป้อนสัญญาณโดยใช้โปรแกรม IE3D.....	42
4.9 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่คำนวณได้จากโปรแกรม IE3D.....	43
4.10 อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่คำนวณได้จากโปรแกรม IE3D.....	43
4.11 อินพุตอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม IE3D.....	44
4.12 การแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน.....	45
4.13 วงจรการแบ่งกำลังแบบวิลคินสันในรูปแบบนอร์มอลไลซ์และสมมาตรกัน.....	46
4.14 วงจรถูกแบ่งเป็นสองส่วนสำหรับรูปที่ 4.13 (ก) สำหรับโหมคคู่ (ข) สำหรับโหมคเดี่ยว.....	47
4.15 การวิเคราะห์การแบ่งแบบวิลคินสัน เพื่อหา S_{11} (ก) การแบ่งแบบวิลคินสันสิ้นสุด (ข) แบ่งเป็นสองส่วนสำหรับวงจรในข้อ (ก).....	48
4.16 การแบ่งกำลังแบบวิลคินสันในรูปแบบไมโครสตริปมีการแบ่งกำลังแบบไม่เท่ากัน.....	49
4.17 N-Way, การแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน Equal-Split.....	50
4.18 แสดงถึงการแมตช์สายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$	50
4.19 ค่าอินพุตที่ปลายสายของการแมตช์สายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$	51
4.20 แสดงค่าความต้านทานในสายของตัวรวมสัญญาณ.....	51
4.21 การออกแบบสายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$	52
4.22 ตัวรวมสัญญาณที่ได้จากการออกแบบเมื่อต่อเข้ากับขั้วต่อแบบ SMA.....	54
4.23 สายอากาศไมโครสตริปเมื่อต่อเข้ากับตัวรวมสัญญาณ.....	54
5.1 แสดงสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ.....	56
5.2 แสดงการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย.....	57
5.3 แสดงการติดตั้งสายอากาศเข้ากับอุปกรณ์วัด.....	59
5.4 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า โดยให้สายอากาศไดโพลวางตัวขนานกับพื้น.....	60
5.5 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าแบบไขว้ โดยให้สายอากาศไดโพลวางตัวตั้งฉากกับพื้น.....	60
5.6 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก โดยให้สายอากาศไดโพลวางตัวตั้งฉากกับพื้น.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
5.7 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กแบบไขว้ โดยให้สายอากาศไดโพลวางตัวขนานกับพื้น.....	61
5.8 กราฟแสดงความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว.....	63
5.9 กราฟแสดงความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณ	64
5.10 กราฟแสดงความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบสายเฟส.....	64
5.11 กราฟแสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว.....	65
5.12 กราฟแสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ แบบตัวรวมสัญญาณ	66
5.13 กราฟแสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบสายเฟส.....	66
5.14 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว.....	67
5.15 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณ.....	68
5.16 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบสายเฟส.....	68
5.17 กราฟแสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไมโครสตริป องค์ประกอบเดียวบนผิวระนาบเรียบ.....	69
5.18 กราฟแสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไมโครสตริป องค์ประกอบเดียวบนเส้นผิวของผิวโค้งทรงกลม.....	70
5.19 กราฟแสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณ.....	71
5.20 กราฟแสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบสายเฟส.....	72
5.21 แสดงพอร์ตของสายเฟส.....	75
5.22 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 1 ของสายเฟส.....	76
5.23 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 2 ของสายเฟส.....	76
5.24 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 3 ของสายเฟส.....	77
5.25 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 4 ของสายเฟส.....	77

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
5.26 แสดงพอร์ตของตัวรวมสัญญาณ.....	78
5.27 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 1 ของตัวรวมสัญญาณ.....	79
5.28 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 2 ของตัวรวมสัญญาณ.....	79
5.29 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 3 ของตัวรวมสัญญาณ.....	80
5.30 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 4 ของตัวรวมสัญญาณ.....	80
5.31 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 5 ของตัวรวมสัญญาณ.....	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะทางด้านการสื่อสารที่เรียกว่า Wireless MAN (Wireless Metropolitan Area Network) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีไร้สายความเร็วสูงในระดับขอบเขตเมืองใหญ่ที่กำลังได้รับการพัฒนา ภายได้ช่วงความถี่ใช้งานที่ 2 ถึง 6 GHz [7] และในอนาคตอันใกล้เทคโนโลยี WiMAX จะถูกนำมาใช้ในประเทศไทย เป็นเทคโนโลยีเชื่อมโยงเครือข่ายบรอดแบนด์แบบไร้สายระยะไกลที่มีจุดเด่นที่แบนด์วิธปริมาณมหาศาล ทำงานที่ความถี่ 3.5 GHz ยกตัวอย่างเช่น การเชื่อมต่ออาคารที่พักอาศัยและอาคารพาณิชย์เข้าด้วยกันด้วยเครือข่ายหลักที่มีความเร็วสูง เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการติดตั้งสายอากาศ (Antenna) ไว้ที่ตัวอาคารเพื่อความสะดวกสวยงามและความเป็นระเบียบเนื่องจากสายอากาศที่เราใช้อยู่ในปัจจุบันนี้เป็นสายอากาศแบบไดโพล (Dipole Antenna) ซึ่งมีการแผ่กระจายคลื่นออกทุกทิศทาง ทำให้สิ้นเปลืองกำลังงานอันเนื่องมาจากสายอากาศด้านที่ติดกับผนังไม่ได้ถูกใช้งาน ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบสายอากาศแบบไมโครสตริป (Microstrip Antenna) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแถวลำดับ (Array) บนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม (Quartered - Spherical Surface) ที่มีลักษณะคล้ายกับโคมไฟติดผนังเหตุผลที่ใช้สายอากาศไมโครสตริป เพราะว่ามีคุณสมบัติที่ดีคือ มีลักษณะแบนราบสามารถติดตั้งได้ตามผิวโค้งของวัสดุได้ซึ่งนำไปสู่การออกแบบที่ว่าจะให้คลื่นที่แผ่กระจายออกไปเฉพาะด้านที่ใช้งานเพียงด้านเดียว เพื่อจะได้ไม่มีการสูญเสียพลังงานหรือสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งทำให้มีกำลังงานสูงสุด มีความกว้างแถบกว้างและสามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป 1 องค์ประกอบ จะมีข้อดีคือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและมีลักษณะแบนราบสามารถติดตั้งได้ตามผิวของวัสดุต่างๆได้ แต่จะมีข้อเสียบางประการคือ มีความกว้างแถบแคบ อัตราขยาย (Gain) ต่ำ และแบบรูปการแผ่กำลังงาน (Radiation Pattern) ถูกרבกวนได้ง่าย ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้ทำการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมแถวลำดับบนผิวโค้งเพื่อลดข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวและเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน

รายงานฉบับนี้ได้เน้นเนื้อหาเกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมที่นำมาแถวลำดับกันบนผิวโค้งซึ่งมีการออกแบบสายนำสัญญาณ 2 แบบด้วยกันคือ การออกแบบสายเฟส (Phasing line) และการออกแบบตัวรวมสัญญาณ (Combiner) รวมไปถึงการวัดทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของสายอากาศด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปส์สี่เหลี่ยม ที่นำมาติดตั้งบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการทำงานของสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปส์สี่เหลี่ยมที่นำมาติดตั้งบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม แล้วนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการทำงานของโปรแกรม IE3D
- 1.2.4 เพื่อนำความรู้ที่ได้ในการทดลองไปปฏิบัติงานจริง

1.3 ขอบข่ายงาน

โครงงานฉบับนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศต้นแบบที่เรียกว่า สายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปส์สี่เหลี่ยมบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม ซึ่งมีโครงสร้างที่ง่าย แข็งแรง มีขนาดเล็ก เป้าหมายการประยุกต์ใช้งานเพื่อเป็นสายอากาศสำหรับอาคารรับส่งคลื่นสัญญาณ WLAN

การวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศทำได้โดยเริ่มจาก

- 1.3.1 ทำการหาโครงสร้างวัสดุทรงกลมโลหะ เพื่อนำมาเป็นแผ่นกราวด์ (Ground plane)
- 1.3.2 ทำการหาโพลีเมอร์ที่จะนำมาเป็นซับสเตรต (Substrate) โดยจะต้องทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)
- 1.3.3 ทำการคำนวณหาขนาดของแผ่นทองแดง (Copper patch)
- 1.3.4 ออกแบบสายเฟส (Phasing line) ที่ใช้ร่วมกับสายอากาศ
- 1.3.5 ออกแบบตัวรวมสัญญาณ (Combiner) ที่ใช้ร่วมกับสายอากาศ
- 1.3.6 สร้างสายอากาศต้นแบบตามทีออกแบบ
- 1.3.7 วัดทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของสายอากาศ
- 1.3.8 จัดทำรายงานเพื่อนำเสนอ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

- 1.4.1 ศึกษาพารามิเตอร์ที่จำเป็นของสายอากาศ
- 1.4.2 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม IE3D

- 1.4.3 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรม IE3D
- 1.4.4 ออกแบบแถวลำดับด้วยโปรแกรม IE3D โดยใช้การแมตซ์ด้วยสายเฟส
- 1.4.5 ออกแบบแถวลำดับด้วยโปรแกรม IE3D โดยใช้ การแมตซ์ด้วยตัวรวมสัญญาณ
- 1.4.6 สร้างสายอากาศต้นแบบ และทำการวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลจากการคำนวณ โดยใช้โปรแกรม IE3D
- 1.4.7 สรุปผลการทำงาน

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 มีความรู้เกี่ยวกับกลไกการทำงานของสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปที่ติดตั้งบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม
- 1.5.2 มีความรู้เกี่ยวกับการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปที่ใช้ในงาน WLAN
- 1.5.3 สามารถใช้โปรแกรม IE3D ได้เป็นอย่างดี
- 1.5.4 สามารถคำนวณหาขนาดและระยะของแผ่นทองแดงที่นำมาแถวลำดับกันบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม โดยใช้การแมตซ์ด้วยสายเฟสได้
- 1.5.5 สามารถคำนวณหาขนาดและระยะของแผ่นทองแดงที่นำมาแถวลำดับกันบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลมโดยใช้การแมตซ์ด้วยตัวรวมสัญญาณได้
- 1.5.6 สามารถเข้าใจในทักษะการสร้างและการวัดทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของสายอากาศที่ใช้งานจริงได้

บทที่ 2

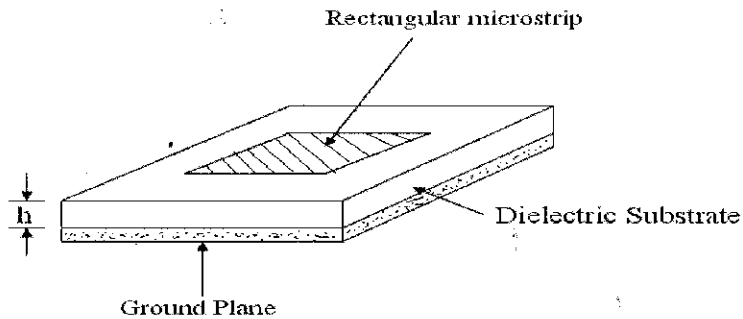
ทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริป

2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำสายอากาศไมโครสตริปมาประยุกต์ใช้กับการทำงานชั้นสูง จำพวกเครื่องบิน ยานอวกาศ ดาวเทียม และจรวด เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ราคาถูก ง่ายในการติดตั้ง และมีลักษณะแบนราบ ดังนั้นจึงเป็นที่ต้องการในการเสนอให้นำไปประยุกต์ใช้ในรัฐบาลและเชิงพาณิชย์เช่น วิทยุเคลื่อนที่และการสื่อสารไร้สาย ความต้องการเหล่านี้ทำให้สายอากาศไมโครสตริปถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ สามารถแบนราบไปตามพื้นผิวที่เป็นระนาบและไม่เป็นระนาบได้ง่าย และมีการผลิตด้วยเครื่องจักร โดยใช้เทคโนโลยีวงจรมัลติไมครอนที่ราคาไม่แพง ในเชิงกลก็มีความแข็งแรงเมื่อนำไปติดตั้งบนพื้นผิวที่แข็ง สำหรับรูปร่างของแพทช์ที่มีลักษณะเฉพาะและโหมดที่ถูกเลือกนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงในเทอมของ ความถี่เรโซแนนซ์ อิมพีแดนซ์ การโพลาไรซ์ และแบบรูปการแผ่กระจาย กำลังงาน ในบทนี้ จะกล่าวถึงแนวคิดและทฤษฎีในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป

2.2 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างง่ายที่สุดดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 กล่าวคือ รูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแถบ ๆ ติดตั้งอยู่บนซับสเตรต (Substrate) ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างของซับสเตรตเป็นผิวโลหะที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นกราวด์ (Ground Plane) พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในซับสเตรตบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบโลหะแถบ ๆ กับผิวโลหะด้านล่าง ความหนาของซับสเตรตนั้นจะหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ความกว้างของสตริปนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติที่ต้องการ สำหรับความหนาของตัวสตริปเองนั้นจะมีค่าประมาณ 5-10 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับการใช้เทคโนโลยีแบบฟิล์มบาง หรือ แบบฟิล์มหนาในการสร้างสตริปนั้น [4]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปบนพื้นระนาบเรียบ

2.2.1 ข้อดีและข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปมีข้อดีหลายอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟธรรมดา และ ประยุกต์ใช้ครอบคลุมขอบเขตความถี่จาก 100 MHz ถึง 100 GHz ข้อดีที่สำคัญของสายอากาศไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟธรรมดามีดังนี้

- น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก
- สามารถนำมาดัดแปลงรูปร่างให้สมดุลได้
- ราคาถูก การผลิตง่าย
- สามารถทำให้บางได้
- มีการโพลาไรซ์ได้ทั้งแบบเส้นตรงและวงกลม
- สามารถดัดแปลงใช้ในการนำวิถีจรหรือดาวเทียมได้
- สามารถรวมกันได้ง่ายกับวงจรไมโครเวฟ
- มีค่าภาคตัดขวางของการกระเจายคลื่น (Scattering Cross Section) ต่ำ
- ไม่ต้องใช้โพรงด้านหลังในการเก็บพลังงานของคลื่น (Cavity Backing)
- จุดบ่อนสัญญาณและการแมตซ์สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันกับโครงสร้างของสายอากาศ

อย่างไรก็ดีสายอากาศไมโครสตริปก็ยังมีข้อจำกัดบางอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟธรรมดามีดังนี้

- ความกว้างแถบ (Bandwidth) แคบ
- อัตราขยายต่ำกว่า -6 dB
- มีการสูญเสียที่จุดบ่อนสัญญาณขององค์ประกอบโครงสร้างแถวลำดับ (Array)

- สายอากาศไมโครสตริปส่วนใหญ่แผ่กระจายคลื่นเฉพาะครึ่งด้านบน (Half-Space)
- โครงสร้างการป้อนสัญญาณซับซ้อนหากต้องการทำแถวลำดับจำนวนมาก

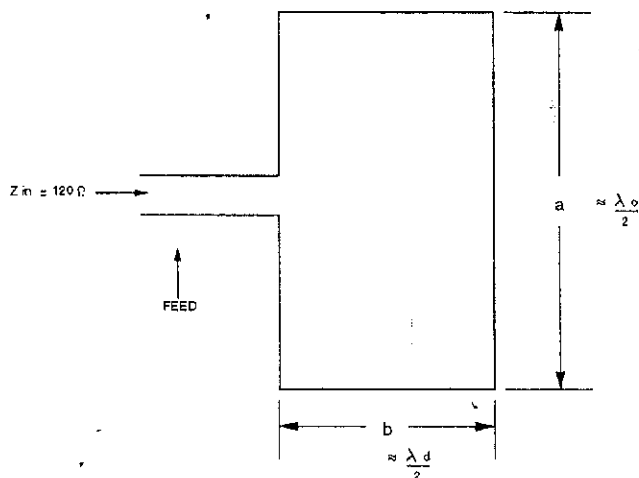
เนื่องจากความหนาของไมโครสตริปบางมาก คลื่นที่เกิดขึ้นภายในสารไดอิเล็กตริก ชั้นสเตรต สามารถพิจารณาได้จากการสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงขอบของสตริป ซึ่งเป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ที่แสดงถึง สนามที่มีการแผ่กระจายที่ขอบ (Fringing Field) ดังนั้นสายอากาศที่พิจารณาจึงมีประสิทธิภาพต่ำ

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปนั้น ความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกชั้นสเตรตถือว่ามีความสำคัญมากเพราะเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าคงที่ของการเดินทางของคลื่น ความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

2.2.2 คุณสมบัติของชั้นสเตรต

- 1) ϵ_r จะบอกคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริกโดยเทียบกับอากาศอิสระ ค่านี้จะส่งผลให้อิมพีแดนซ์ลักษณะ (Z_0) ของไมโครสตริปเปลี่ยนแปลง
- 2) ค่า $\tan \delta$ นั้นคือค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำ (Conduction Current) กับกระแสขจัด (Displacement Current) ซึ่งค่านี้จะแสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใด โดยที่มีค่ายิ่งต่ำก็ยิ่งดี
- 3) ค่าของการนำความร้อน จะแสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด โดยค่าที่ยิ่งต่ำยิ่งดี
- 4) ความขรุขระ จะมีผลต่อการส่งผ่านของคลื่นไปตามไมโครสตริป โดยยังมีค่าน้อยยิ่งดี
- 5) ความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะบอกถึงความสามารถในการรับกำลังคลื่น ยิ่งมีค่าสูงจะยิ่งดี

2.3 คุณลักษณะของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Patch)



รูปที่ 2.2 สายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

รูปที่ 2.2 แสดงมิติพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปซึ่งเป็นแพทช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยค่าความนำของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความกว้าง a โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นฟังก์ชันของความยาว b ซึ่งความยาว b จะถูกกำหนดโดย

$$b = 0.49 \lambda_d$$

หรือ

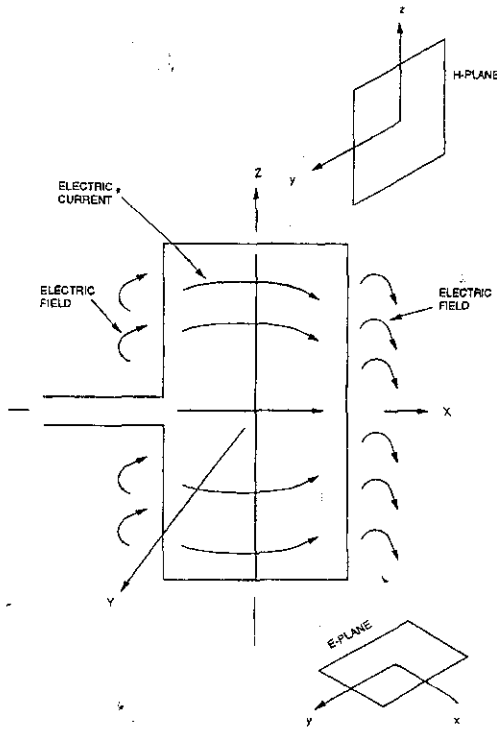
$$b = 0.49 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

โดยที่ λ_d คือ ความยาวคลื่นในสารไดอิเล็กตริก

λ_0 คือ ความยาวคลื่นในอากาศอิสระ

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ของฉาบสเตรต

เนื่องจากการแปรผันของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าความนำของตัวป้อนสัญญาณ การทดสอบเพื่อหาความยาวที่แท้จริงของแพทช์จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง



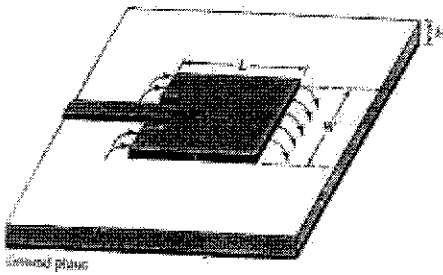
รูปที่ 2.3 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแพทช์

ในรูปที่ 2.3 เป็นการแสดงกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงของสนามไฟฟ้าภายในและบริเวณรอบๆ แพทช์ โดยปกติสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของแพทช์ที่ถูกต่อด้วยสายนำสัญญาณและด้านตรงข้ามขอบซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ คลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศในรูปที่ 2.3 จะมีการโพลาไรซ์ในแนวนอน ซึ่งระนาบของสนามไฟฟ้า (ระนาบ x-y) จะมีทิศทางในแนวนอน และระนาบของสนามแม่เหล็ก (ระนาบ y-z) จะมีทิศทางในแนวตั้ง

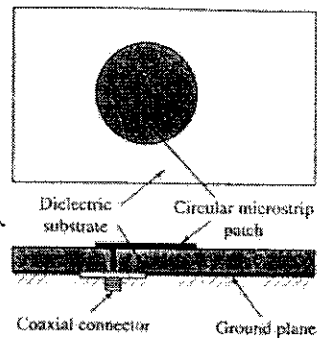
ระยะห่าง b ซึ่งเป็นระยะของขอบทั้งสองด้านของแพทช์จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่เดินทางภายในสารไดอิเล็กตริก ($0.49 \lambda_d$) ซึ่งที่ระยะห่างขนาดนี้จะมีผลทำให้ร่องที่อยู่ตรงข้ามมีการป้อนด้วยเฟสที่ตรงกันข้าม อย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมาจากองค์ประกอบทั้งสองจะมีการเสริมกันเนื่องจากเฟสตรงกัน ทำให้ทิศทางการแผ่กระจายคลื่นออกมาในทิศตั้งฉากกับองค์ประกอบ และมีทิศทางการแผ่คลื่นด้านข้าง (Broadside) ในทิศทาง y

2.4 วิธีการป้อนสัญญาณ (Feeding Methods) [3]

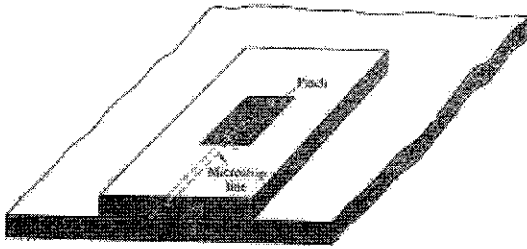
ลักษณะรูปร่างมากมายที่สามารถนำมาใช้ในการป้อนสัญญาณสายอากาศไมโครสตริป ที่นิยมใช้มากที่สุดมี 4 ลักษณะคือ สายไมโครสตริป (Microstrip Line) โพรบแกนร่วม (Coaxial probe) เชื่อมต่อโดยใช้ช่องเปิด (Aperture Coupling) และการเชื่อมต่อแบบใกล้ (Proximity Coupling) ซึ่งแสดงตามรูปที่ 2.4 ซึ่งวงจรมูลของแต่ละลักษณะแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



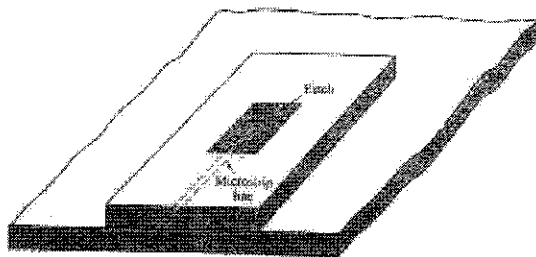
(ก) แบบสายไมโครสตริป



(ข) แบบโพรบแกนร่วม



(ค) แบบเชื่อมต่อโดยใช้ช่องเปิด



(ง) แบบเชื่อมต่อแบบใกล้

รูปที่ 2.4 วิธีการป้อนสัญญาณสำหรับสายอากาศไมโครสตริป

การป้อนสัญญาณแบบสายไมโครสตริป นั้นมีสตริปเป็นตัวเหนี่ยวนำซึ่งโดยปกติความกว้างของสตริปจะน้อยมากเมื่อเทียบกับความกว้างของแพทช์ วิธีนี้ง่ายต่อการสร้าง การแมตช์ โดยความคุมตำแหน่งที่ใส่และรูปแบบจำลองที่ค่อนข้างง่าย อย่างไรก็ตามความหนาของชั้นสเตรตทำให้เพิ่มพื้นผิวของคลื่นและเพิ่มการแผ่คลื่นจากการป้อนสัญญาณ ซึ่งสำหรับการปฏิบัติ การออกแบบจะจำกัดความก้างแถบ (โดยทั่วไป 2-5%)

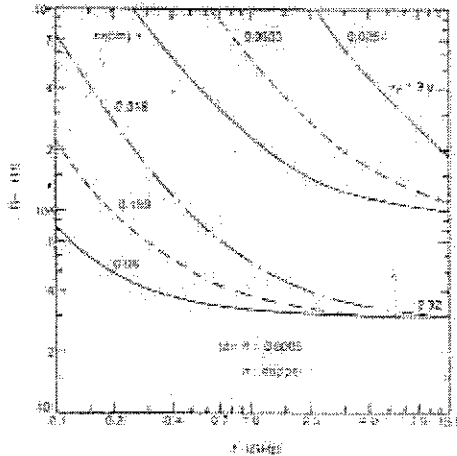
การป้อนสัญญาณแบบโพรบแกนร่วม ตัวนำด้านในของแกนร่วมถูกติดอยู่กับแพทช์ที่แผ่คลื่นออกไป ขณะที่ตัวนำด้านนอกถูกเชื่อมต่อกับกราวด์ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย การ

กว้างของสายนำสัญญาณ และความยาวของร่อง การเชื่อมต่อตรงร่องสามารถทำเป็นรูปแบบจำลอง โดยใช้ทฤษฎีของนายเบทท์ (Bethe) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการอธิบายการเชื่อมต่อตรงช่องเปิดเล็กในระนาบเหนี่ยวนำ ทฤษฎีนี้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวเชื่อมต่อชนิดนำคลื่น (Waveguide Couplers) ซึ่งใช้การเชื่อมต่อตรงร่อง ในทฤษฎีนี้ร่องถูกอธิบายโดยไดโพลสมมูลทางไฟฟ้า ซึ่งให้เหตุผลสำหรับส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและไดโพลแวนอนสมมูลแม่เหล็ก เพื่ออธิบายถึงส่วนประกอบที่สัมพันธ์สนามแม่เหล็ก ถ้าร่องอยู่ตรงกลางข้างล่างแพทช์ ที่สำคัญสำหรับโหมดสนามไฟฟ้าในอุดมคติเป็นศูนย์ ขณะที่สนามแม่เหล็กจะครอบคลุมถึงค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กสูงสุด การทำลักษณะนี้นำไปสู่การโพลาริซที่ตี และการแผ่คลื่นในระนาบโดยทั่วไปไม่มีการโพลาริซไซส์

การป้อนสัญญาณแบบสุดท้ายคือ การเชื่อมต่อแบบใกล้ มีความกว้างแถบกว้างที่สุด (สูง=13%) ซึ่งมีรูปแบบจำลองค่อนข้างง่ายและมีการแผ่คลื่นต่ำ อย่างไรก็ตาม การสร้างค่อนข้างยุ่งยากกว่า ความยาวของสตับ (Stub) ที่มีการป้อนสัญญาณและอัตราส่วนของความกว้างต่อสายของแพทช์ถูกนำมาใช้ในการควบคุมการแมตซ์

2.5 ผลกระทบจากไดอิเล็กทริกซบสเตรต

ในขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้น องค์ประกอบสำคัญที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของสายอากาศคือ ไดอิเล็กทริกซบสเตรต เช่น ผลกระทบต่อความกว้างและความยาวของสายอากาศ จากสมการที่ (2.3), (2.4) และ (2.6) จะเห็นว่าถ้าค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกซบสเตรตเปลี่ยนแปลงจะมีผลทำให้ขนาด W และ L เปลี่ยนไปด้วย ผลกระทบที่สองคือความหนาของค่าคงที่ของแผ่นไดอิเล็กทริกซบสเตรตซึ่งมีผลต่อความต้านทานการแผ่คลื่น (Radiation Resistance) ในแต่ละความถี่ที่ใช้งานดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการแผ่คลื่น
กับคุณสมบัติของ ไดอิเล็กทริก

นั่นคือที่ความถี่เดียวกันแผ่น ไดอิเล็กทริกซบสเตรตยังมีความหนามากยิ่งขึ้นเท่าใด (ที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากัน) ค่าความถี่ของการแผ่คลื่นจะยิ่งมีมากขึ้น ยกเว้นที่ความถี่สูงมากๆ ความหนาจะไม่มีผลใดๆ ผลกระทบอีกประการหนึ่งคือความหนาและค่าคงที่ของแผ่น ไดอิเล็กทริกซบสเตรตจะมีผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศด้วย นั่นคือแผ่น ไดอิเล็กทริกซบสเตรตยังมีความหนาเพิ่มขึ้น (ที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากัน) ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศก็จะเพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับความถี่ของสายอากาศด้วย

2.6 ผลกระทบจากขนาดของแผ่นกราวด์ [1]

มีการตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศไมโครสตริปนั้นขนาดของแผ่นกราวด์จะมีขนาดใหญ่ ในความเป็นจริงการใช้แผ่นกราวด์ขนาดใหญ่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้แค่เป็นเครื่องมือเท่านั้น ดังนั้นสำหรับการนำไปใช้กับการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปซึ่งเป็นตัวสะท้อนนั้น แผ่นกราวด์ควรจะมีความถี่จำกัด นำไปสู่การสร้างขนาดของสายอากาศและการเพิ่มแผ่นกราวด์ให้มากกว่าขนาดของแพทช์ ซึ่งแพทช์ก็ควรจะเล็กที่สุด

วิธีเชิงวิเคราะห์และเชิงตัวเลขได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศเช่นกัน กราวด์ขนาดใหญ่ทำให้การแผ่กระจายออกไปจากขอบของกราวด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน การแผ่กระจายของตัวนำและความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนไป

นายคูโบยาม่า (Kuboyama) ได้รายงานผลของการค้นคว้าและทดลองบนความถี่เรโซแนนซ์ แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นและอัตราขยายของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามฟังก์ชันขนาดของแผ่นกราวด์ ซึ่งพบว่า สายอากาศแพทช์กับขนาดของแผ่นกราวด์เปรียบเสมือนแพทช์ที่เป็นโลหะ ความถี่เรโซแนนซ์จะสูงกว่าเมื่อเทียบกับสายอากาศที่มีขนาดของแผ่นกราวด์ใหญ่

แสดงว่าการเพิ่มขนาดของกราวด์โดยเพิ่ม d ดังรูปที่ 2.7 เศษส่วนการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์เป็นดังสมการ

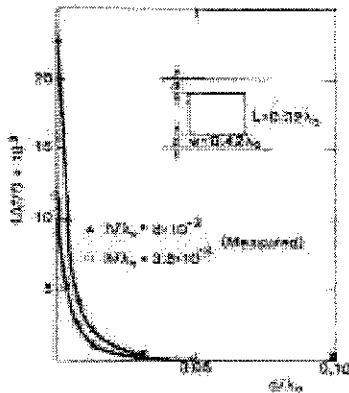
$$\lim_{k_0 d \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{f_r} \approx \frac{1}{\pi} \frac{\epsilon_r + 1}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{h}{\lambda_0} \ln(W/h) \quad (2.2)$$

โดย $(W/h) \gg 1$

เมื่อทำการ take limit เข้าไป จะได้ค่าดังนี้

$$\frac{\Delta f}{f_r} = -\frac{240}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{h}{W} B_d \quad (2.3)$$

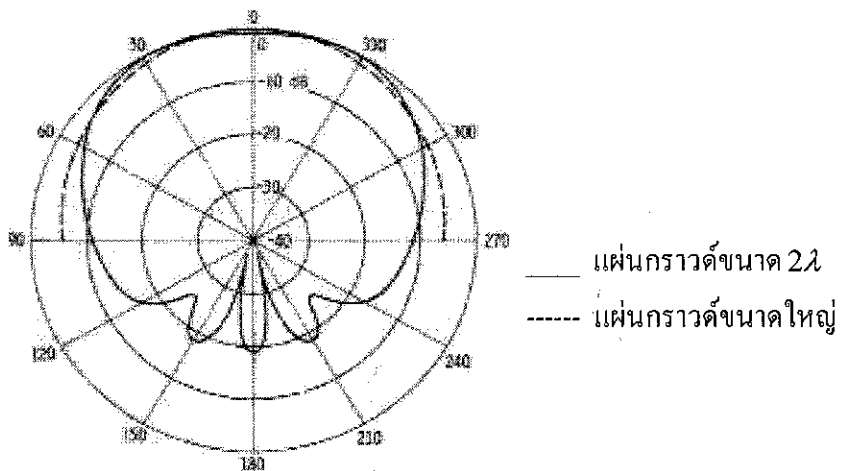
$$B_d = \frac{k_0 W}{8\eta_0} [J_0^2(k_0 d) - Y_0^2(k_0 d)] \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์กับขนาดของแผ่นกราวด์

ผลกระทบที่เกิดจากขนาดของแผ่นกราวด์ ตามการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนซ์ สามารถสังเกตได้จากรูป 2.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มขนาดของแผ่นกราวด์ ความถี่เรโซแนนซ์ก็จะลดลง และจะเข้าใกล้ ∞ เมื่อเพิ่มขนาดของแผ่นกราวด์ประมาณ $\lambda_0 / 20$

ผลกระทบของแผ่นกราวด์ขนาดใหญ่บนสนามที่แผ่กระจายออกไป ได้ศึกษาโดยฮูอัน (Huang) ซึ่งใช้รูปแบบจำลองช่องเปิดสำหรับการแผ่กระจายในทฤษฎีการกระจายเชิงเรขาคณิต (Geometrical Theory of Diffraction, GTD) ซึ่งจะไม่ครอบคลุมถึงผลกระทบของซบสเตรต ในการคำนวณการกระจายที่ขอบ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามไฟฟ้า (E-plane) จะมีผลกระทบโดยแผ่นกราวด์ที่มีขนาดใหญ่กว่าแบบรูปในระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-plane) รูปที่ 2.8 แสดงถึงความแตกต่างระหว่างแบบรูปในระนาบของสนามไฟฟ้า สำหรับแผ่นกราวด์ขนาด 2λ และแผ่นกราวด์ขนาดใหญ่ สำหรับแผ่นกราวด์ที่มีขนาดเล็ก ($< \lambda_0$) ซึ่งถ้าคลื่นจะประกอบด้วยแบบรูปที่มีความกว้างเกิน 0° ถ้าขนาดแผ่นกราวด์เพิ่มขึ้นจะทำให้แบบรูปของคลื่นหลัก (Main pattern) ลดลง ดังนั้นแผ่นกราวด์ขนาดใหญ่จะทำให้การแผ่กระจายคลื่นเกิดการกระเจิงเพิ่มขึ้นในทิศทางข้างหลัง



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบแบบรูปในระนาบของสนามไฟฟ้าระหว่าง แผ่นกราวด์ขนาด 2λ และแผ่นกราวด์ขนาดใหญ่

2.7 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern) [1]

วิธีการแผ่กระจายถูกใช้ในการวิเคราะห์เต็มคลื่น (Full-Wave) ซึ่งเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริป ในรูปแบบจำลองนี้แพทช์โลหะถูกแทนที่ด้วยการกระจายของ

กระแสเชิงผิวและสนามเพื่อนำมาแก้ปัญหา ซึ่งนำไปอธิบายซบสเตรตที่อยู่ติดกับกราวด์เป็นไปตามฟังก์ชันของกรีน (Green's function) แบบรูปการแผ่กระจายหาได้ดังนี้

$$E_\phi(\theta, \phi) = \sin\phi \left(\frac{j\omega\mu_0}{4\pi r}\right) e^{-jk_0 r} \tilde{J}(\theta, \phi) F_4(\theta) \quad (2.5)$$

$$E_\theta(\theta, \phi) = -\cos\phi \left(\frac{j\omega\mu_0}{4\pi r}\right) e^{-jk_0 r} \tilde{J}(\theta, \phi) F_3(\theta) \quad (2.6)$$

ซึ่ง $\tilde{J}(\theta, \phi)$ คือฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของกระแสบนแพทช์ สำหรับโหมด TM_{10}

$$\tilde{J}(x, y) = \hat{x} \frac{V_0}{Z_0 W} \sin(\beta x) \quad \text{สำหรับ } 0 < x < L, 0 < y < W \quad (2.7)$$

แสดง $\tilde{J}(\theta, \phi)$ ได้ดังนี้

$$\tilde{J}(\theta, \phi) = \frac{V_0}{Z_0} \frac{2\sqrt{\epsilon_{re}} \cos(\pi \sin\theta \cos\phi / 2\sqrt{\epsilon_{re}})}{k_0(\sin^2\theta \cos^2\phi - \epsilon_{re})} \sin 9(0.5k_0 W \sin\theta \cos\phi) \quad (2.8)$$

ซึ่ง $\sqrt{\epsilon_{re}} = \beta/k_0$ คือ ค่าคงที่ประสิทธิภาพไดอิเล็กตริกของสายไมโครสตริป สำหรับแพทช์ที่ตัดออกมาและ Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ลักษณะเปรียบเทียบกับความกว้าง W ความยาวของแพทช์ L สำหรับโหมด TM_{10} ถูกเลือกดังนี้

$$L = \lambda_g / 2 \Rightarrow k_0 L = \pi / \sqrt{\epsilon_{re}} \quad (2.9)$$

แบบรูปกำลังงานของระนาบโดยทั่วไปเป็นไปตาม สำหรับระนาบ $\phi = 0^\circ$ หรือแบบรูปในระนาบของสนามไฟฟ้า

$$E_\phi = 0 \quad (2.10)$$

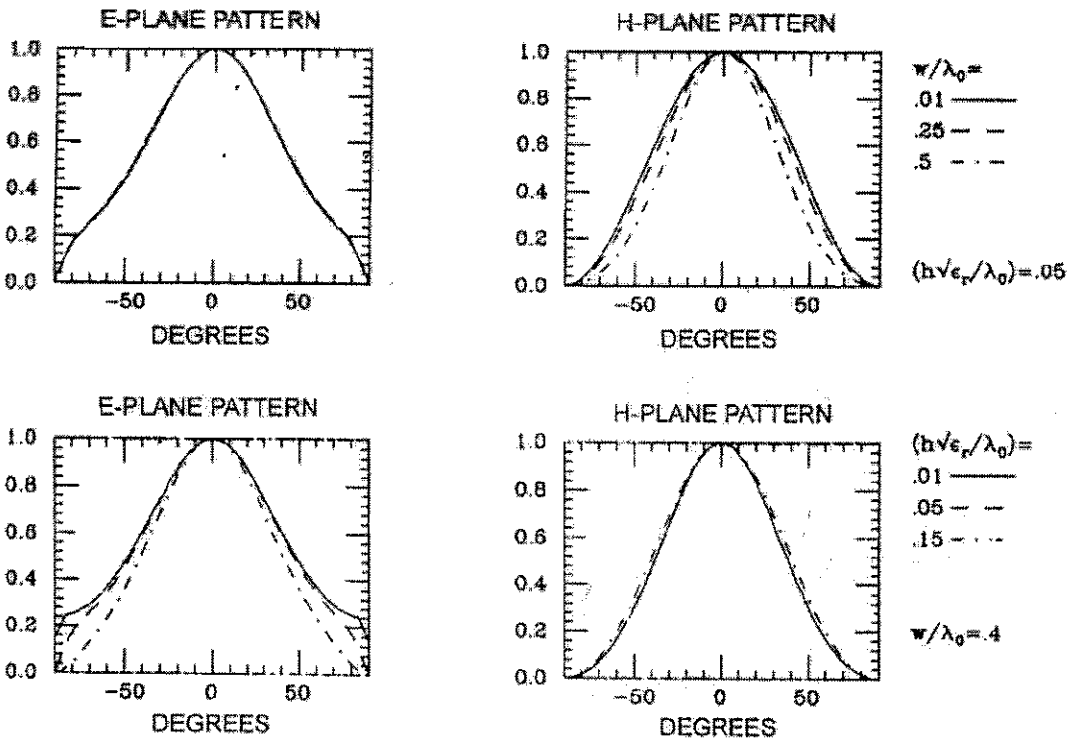
$$|E_\theta(\theta)|^2 = \epsilon_{re} \left[1 + \epsilon_r \cot^2(k_0 h \sqrt{\epsilon_r}) \right] \frac{\cos^2(k_0 L \sin\theta / 2)}{(\epsilon_{re} - \sin^2\theta)^2}$$

$$\frac{(\epsilon_r - \sin^2 \theta) \cos^2 \theta}{(\epsilon_{re} - \sin^2 \theta) + \epsilon_r^2 \cos^2 \theta \cot^2(k_0 h \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta})} \quad (2.11)$$

และสำหรับระนาบ $\phi = 90^\circ$ หรือแบบรูปในระนาบของสนามแม่เหล็ก

$$E_\theta = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{|E_\theta(\theta)|^2 = [1 + \epsilon_r \cot^2(k_0 h \sqrt{\epsilon_r})] \cos^2 \theta}{(\epsilon_r - \sin^2 \theta) \cot^2(k_0 h \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}) + \cos^2 \theta} \sin^2 c^2(k_0 W \sin \theta / 2) \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.9 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามไฟฟ้า และ ระนาบของสนามแม่เหล็กขององค์ประกอบเรโซแนนซ์ บนแพทช์รูปสี่เหลี่ยม w และ h สำหรับ $\epsilon_r = 2.2$

แบบรูปการแผ่กระจายอยู่บนพื้นฐานของวิธีการแผ่กระจายที่แตกต่างกัน 2 ลักษณะดังที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้น ซึ่งถูกเปรียบเทียบด้วยการวัดแบบรูปการแผ่กระจาย สำหรับค่าที่แตกต่างกันของความหนาชั้นสเตรต $\epsilon_r = 2.5$ รูปแบบจำลองช่องเปิดจะไม่มีตัวแปร $F_3(\theta)$ และ $F_4(\theta)$ ซึ่งจะได้แบบรูปการแผ่กระจายที่เปรียบเทียบได้ดีกับการวัด แบบรูปการแผ่กระจายโดยทั่วไปบนพื้นฐานตามสมการที่ (2.11) และ (2.13) ซึ่งจะได้ดังรูปที่ 2.9 จะสังเกตเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายในระนาบของสนามไฟฟ้า และระนาบของสนามแม่เหล็ก มีความกว้างและไม่มีโหลบด้านข้าง (Sidelobes) การแผ่กระจายของสนามเข้าใกล้ศูนย์ที่ $\theta = \pi/2$ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของ แพทช์บนแผ่นกราวด์ ถ้าแพทช์แคบซึ่งก็คือแพทช์มีค่าของ W น้อยลง ทำให้แบบรูประนาบของสนามแม่เหล็กกว้างขึ้น ในขณะที่ชั้นสเตรตบางลงก็จะทำให้แบบรูปในระนาบของสนามไฟฟ้ากว้างขึ้น

2.8 การสูญเสียและองค์ประกอบคุณภาพ (Losses and Quality Factor) [1]

องค์ประกอบคุณภาพ (Q-factor) ของสายอากาศแพทช์ จำเป็นสำหรับการคำนวณตามรูปแบบจำลองโพรง (Cavity Model) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการหาความกว้างแถบ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio) ของสายอากาศ องค์ประกอบคุณภาพทั้งหมดของแพทช์หรือ Q_T ให้นิยามในเทอมขององค์ประกอบคุณภาพที่เชื่อมโยงกับการสูญเสียแต่ละชนิดในสายอากาศแพทช์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_{sur}} \quad (2.14)$$

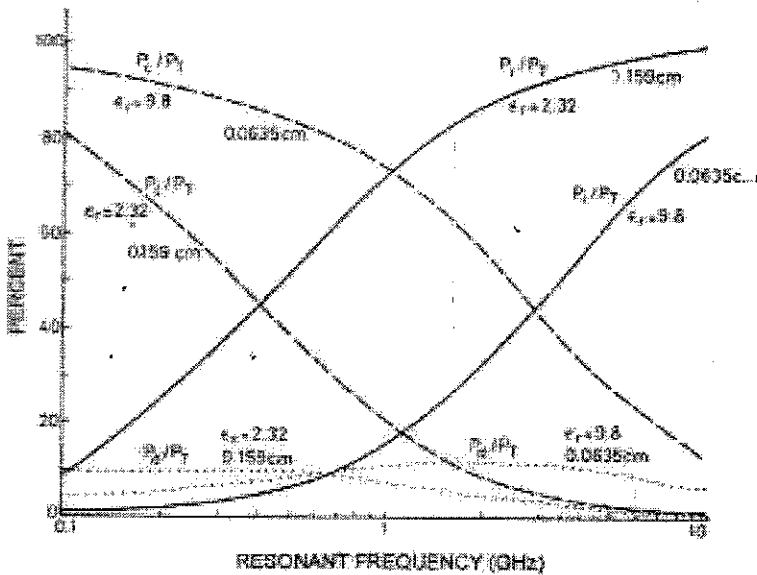
ซึ่งสมการด้านขวาแสดงถึงองค์ประกอบคุณภาพแต่ละชนิด โดยนิยามได้ดังนี้

$$Q = \frac{\omega_r W_T}{\text{Associated power loss}} \quad (2.15)$$

พลังงานสะสมที่เรโซแนนซ์ W_T ก็เหมือนกัน ไม่ขึ้นอยู่กับ การสูญเสียของกำลังงาน ดังนั้นสมการที่ 2.14 สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{P_d + P_c + P_r + P_{sur}}{\omega_r W_T} \quad (2.16)$$

- โดย P_d คือ กำลังที่สูญเสียในไดอิเล็กตริกของฉนวน
 P_c คือ กำลังที่สูญเสียเนื่องจากโลหะตัวนำที่มีจำกัด หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการสูญเสียของแผ่นทองแดง (Copper Loss)
 P_r คือ กำลังที่แผ่กระจายออกไปในอากาศ
 P_{sur} คือ กำลังที่สูญเสียในรูปแบบกำลังงานที่ห่างจากพื้นผิวของคลื่น



รูปที่ 2.10 การผันแปรของกำลังงานที่แผ่ออกไป (P_r), การสูญเสียที่เกิดจากตัวนำ (P_c), และการสูญเสียไดอิเล็กตริก (P_d) ตามฟังก์ชันความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโหมด TM_{10}

กำลังสูญเสีย P_d , P_c และ P_r สามารถสังเกตได้ดังรูป 2.10 สำหรับฉนวน 2 ชนิด ซึ่ง $P_T = P_r + P_c + P_d$ ที่สำคัญวัสดุฉนวนสามารถเลือกได้ตามความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ $P_r + P_c + P_d$ สำหรับประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นที่ดี อธิบายค่า W_T, Q_d, Q_c และ Q_r ได้ดังนี้

$Q_d = 1/\tan \delta$	โดยที่ $\tan \delta$ คือ ค่า Loss Tangent ของวัสดุฉนวน
$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}$	โดยที่ σ คือ ค่าความนำของแพทช์โลหะ
$Q_r = \omega_T W_T / P_r$	
$W_T = \frac{1}{4} \epsilon_0 \epsilon_r h L W$	

กำลังงานของคลื่นที่พื้นผิวสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$P_{sur} = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} E_\theta H_\phi^* \rho d\phi dz \quad (2.17)$$

ซึ่ง E_z และ H_ϕ คือสนามของพื้นผิวคลื่นในโหมด TM_0 กำลังที่สูญเสียไปยังพื้นผิวคลื่นไม่สนใจว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำและซัปสเตรตบาง อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ที่ถูกต้องสามารถให้ตามการอธิบายดังนี้

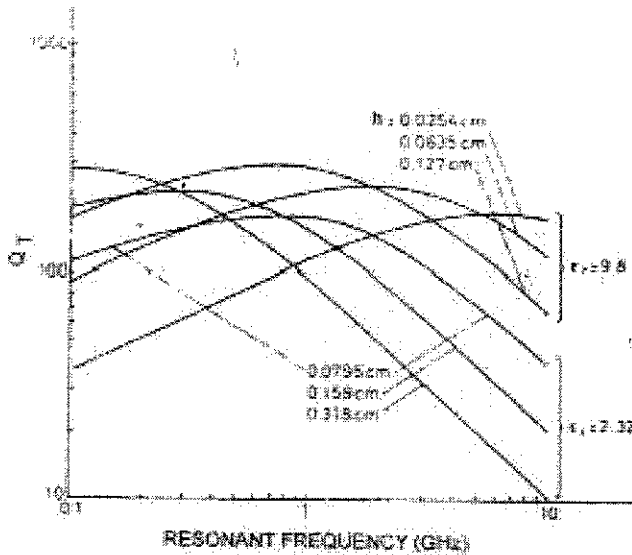
$$P_{sur} = 60 \epsilon_{re} A_s \int_0^{2\pi} \frac{\cos^2(\pi x_0 \cos \phi / (2\sqrt{\epsilon_{re}}))}{(x_0^2 \cos^2 \phi - \epsilon_{re})} \sin^2(Wk_0 x_0 \sin \phi / 2) \cos^2 \phi d\phi \quad (2.18)$$

ซึ่ง

$$A_s = \frac{\epsilon_r (x_0^2 - 1) x_0}{\epsilon_r x_0 \left[\frac{1}{\sqrt{x_0^2 - 1}} + \frac{\sqrt{x_0^2 - 1}}{\epsilon_r - x_0^2} \right] + x_0 k_0 h \left[1 + \frac{\epsilon_r^2 (x_0^2 - 1)}{\epsilon_r - x_0^2} \right]} \quad (2.19)$$

และ $x_0 = \beta / k_0$ คือ ค่าคงที่เฟสที่ถุกนอมอลไลซ์สำหรับคลื่น TM_0 กำลังงานของคลื่นสามารถเพิ่มขึ้นด้วย h และ ϵ_r

รูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของตัวประกอบคุณภาพทั้งหมด



รูปที่ 2.11 การค้นแปรขององค์ประกอบคุณภาพทั้งหมดกับความถี่เรโซแนนซ์
สำหรับโหมด TM_{10} ของแพทช์รูปสี่เหลี่ยม

จะได้แนวคิดในการเปลี่ยนแปลง Q_T ด้วย h และ ϵ_r จะประมาณได้ดังนี้

$$Q_T \approx \frac{\omega_r W_T}{P_r} \quad (2.20)$$

ดังนั้น

$$W_T \propto h\epsilon_r, \text{ และ } P_r \propto h^2 \Rightarrow Q_T \propto \epsilon_r/h$$

จะได้ว่า

$$Q_T \propto 1/W \quad (2.21)$$

2.9 สายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริป

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

ข้อดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ โดยการใช้สายอากาศที่มีลักษณะเหมือนกันหลายๆ องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศสององค์ประกอบเดี่ยว จะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ นอกจากนี้สายอากาศแบบแถวลำดับยังสามารถปรับขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้แก่ละองค์ประกอบได้อีกด้วย ซึ่งทำให้สามารถปรับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นไปตามที่เราต้องการในการใช้งานแต่ละประเภทได้ การเปลี่ยนเฟสอย่างต่อเนื่องของสายอากาศเมื่อเทียบกับเวลาจะทำให้สายอากาศสามารถกวาดลำคลื่นออกไปในทิศทางต่างๆ ได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกแถวลำดับแบบนี้ว่า แถวลำดับแบบปรับเฟส (Phased Array)

แถวลำดับแบบปรับเฟส ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายๆ ประเภท โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้ในงานระบบเรดาร์ การปรับเฟสของแถวลำดับจะใช้วิธีการปรับเฟสโดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์อีกระดับหนึ่ง เพื่อปรับเฟสให้มีผลทำให้ทิศทางการแผ่กระจายกำลังงานสามารถกวาดไปยังตำแหน่งต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว

เราสามารถแบ่งการจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับตามรูปร่าง ได้หลายประเภท เช่น แถวลำดับแบบเชิงเส้น (Linear Array) จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบจำนวนมากที่จัดเรียงกันอย่างสมมาตรเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของแถวลำดับในแนวเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะระหว่างองค์ประกอบห่างเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ประเภทต่อไปก็คือ แถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array) จะเป็นการจัดเรียงองค์ประกอบในลักษณะสองมิติบนแผ่นระนาบ ซึ่งการจัดเรียงแถวลำดับในลักษณะนี้ อาจจัดเรียงในลักษณะของสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือรูปวงกลมก็ได้โดยขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่มีอยู่ เมื่อพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเรียงแถวลำดับมีลักษณะไม่แบนราบ เช่น ที่ส่วนหัวของจรวดหรือเครื่องบิน การจัดเรียงแถวลำดับก็จะต้องมีรูปร่างเป็นไปตามลักษณะของพื้นที่ดังกล่าวด้วย แถวลำดับแบบนี้จะถูกเรียกว่า แถวลำดับแบบคงรูป (Conformal Array)

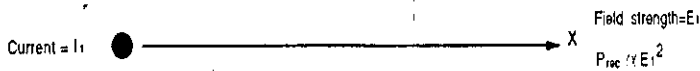
ถ้าทิศทางของการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุดมีทิศทางตั้งฉากหรือเกือบจะตั้งฉากกับเส้นหรือระนาบของแถวลำดับ แถวลำดับแบบนี้จะมีชื่อเรียกเฉพาะว่า แถวลำดับแบบบรอดไซด์ (Broadside Array) แต่ถ้าทิศทางในการแผ่กระจายกำลังงานสูงสุดมีทิศทางที่ขนานกับระนาบของแถวลำดับ จะมีชื่อเรียกเฉพาะว่า แถวลำดับแบบเอนด์ไฟร์ (End-fire Array)

อัตราขยายสายอากาศแถวลำดับโดยใช้สายอากาศไมโครสตริป

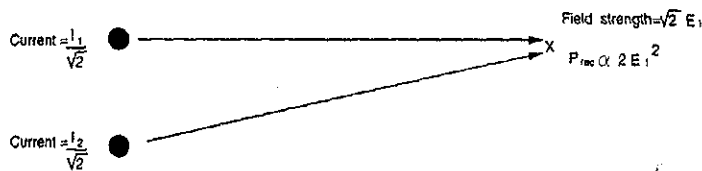
ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) รวมทั้งค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับ มักจะมีค่ามากกว่ากรณีของสายอากาศสององค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งคุณสมบัตินี้มีประโยชน์อย่าง

มากทั้งในการส่งและรับสัญญาณ ในการส่งสัญญาณนั้น สายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีจะสามารถรวบรวมกำลังงานให้อยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ ได้ ซึ่งให้ผลเสมือนว่าเกิดการเพิ่มกำลังงานให้กับจุดนั้นๆ ของเครื่องส่ง ส่วนทางด้านรับ สายอากาศจะทำหน้าที่เสมือนว่าเลือกรับคลื่นที่เข้ามาในทิศทางที่เจาะจง โดยจะไม่เลือกรับสัญญาณที่เราไม่ต้องการรวมทั้งการแทรกสอดจากทิศทางอื่นๆ

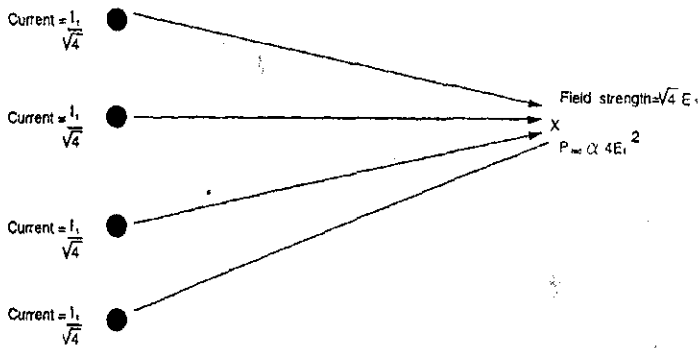
เพื่อความเข้าใจเกี่ยวกับการเพิ่มค่าอัตราขยายของสายอากาศแฉก ลำดับ ในเบื้องต้นจะพิจารณาองค์ประกอบเดี่ยวของสายอากาศไอโซทรอปิก (Isotropic Antennas) ซึ่งมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงาน P_1 ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศนี้มีค่า I_1 ณ จุดที่ไกลออกไปกำหนดให้เป็นจุด X ค่ากระแสนี้จะสร้างความเข้มของสนาม (ศักดาไฟฟ้า) เป็น E_1 ซึ่งค่านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศ



รูปที่ 2.12 สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีการส่งกำลังงาน P_1



รูปที่ 2.13 สายอากาศซึ่งมีสององค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1



รูปที่ 2.14 สายอากาศซึ่งมีสี่องค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1

ค่ากำลังงานที่รับได้โดยสายอากาศที่จุด X จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของความเข้มสนาม ทั้งหมด E_T ที่จุดนั้น กล่าวคือ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = E_1^2 \quad (2.22)$$

ต่อไปจะแทนองค์ประกอบเดี่ยวด้วยสายอากาศชนิดแถวลำดับ ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบไอโซทรอปิกที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 องค์ประกอบ และมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงานที่เท่ากันทั้งหมด คือ P_1 ดังแสดงในรูปที่ 2.13 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

$$E_T = \frac{2E_1}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}E_1 \quad (2.23)$$

กำลังงานทั้งหมดที่รับได้จะเท่ากับ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = (\sqrt{2}E_1)^2 = 2E_1^2 \quad (2.24)$$

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสมการ (2.21) และสมการ (2.23) จะเห็นว่ากำลังสองของค่าความเข้มของสนามทั้งหมด (E_T^2) ที่จุด X จะมีค่าเป็นสองเท่า ด้วยเหตุผลนี้สามารถแสดงได้ว่าค่ากำลังงานที่รับได้ที่จุด X ก็จะมีค่าเป็นสองเท่า ดังนั้นเมื่อใช้แถวลำดับที่มีองค์ประกอบสององค์ประกอบ แทนองค์ประกอบเดียวจะทำให้ได้ค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานมีค่าเป็นสองเท่า

สมมติว่าเราเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็นสองเท่าดังแสดงในรูปที่ 2.14 ก็จะได้แถวลำดับที่มีขนาด 4 องค์ประกอบ ซึ่งทำหน้าที่ในการแผ่กระจายกำลังงานทั้งหมดเป็น P , กระแสในแต่ละองค์ประกอบจะมีค่าเป็น $I_1 / \sqrt{4}$ ดังนั้นความเข้มของสนามที่ถูกสร้างขึ้นจากแต่ละองค์ประกอบที่จุด X จึงกลายเป็น $E_1 / \sqrt{4}$

ความเข้มของสนามทั้งหมด E_T ที่เกิดจากแถวลำดับซึ่งประกอบด้วย 4 องค์ประกอบจะเท่ากับ

$$E_T = \frac{4E_1}{\sqrt{4}} = \sqrt{4}E_1 \quad (2.25)$$

และกำลังงานทั้งหมดที่รับได้จะมีค่าเท่ากับ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = (\sqrt{4}E_1)^2 = 4E_1^2 \quad (2.26)$$

ดังนั้นค่าของ E_T^2 และค่ากำลังงานที่รับได้ทั้งหมดก็จึงมีค่าเป็นสองเท่าความสัมพันธ์ที่กล่าวมาทั้งหมดในตัวอย่างจะถูกพิจารณาภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. องค์ประกอบของสายอากาศทุกตัวจะต้องมีลักษณะเหมือนกันและมีกระแสเท่ากัน
2. สนามที่แผ่กระจายออกจากองค์ประกอบของสายอากาศทั้งหมดจะต้องมีเฟสตรงกันที่จุดรับ
3. กระแสที่เหนี่ยวนำในแต่ละองค์ประกอบจะไม่ถูกนำมาพิจารณา

เงื่อนไขที่สองจะเป็นจริงได้ถ้าเฟสของกระแสแต่ละองค์ประกอบเท่ากัน และจุดสังเกต X ซึ่งไปในทิศทางที่ตั้งฉากโดยตรงกับสายอากาศแถวลำดับ และให้สมมุติว่าที่สนามระยะไกล (Far Field) ซึ่งมีระยะห่างจากจุด X ของทุกองค์ประกอบมีค่าเท่ากัน ส่วนเงื่อนไขที่สามจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็นสำคัญ

สำหรับสายอากาศแถวลำดับในทางปฏิบัติ เงื่อนไขเหล่านี้จะเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น แม้ว่าการสูญเสียซึ่งเกิดจากการป้อนสัญญาณและจากตัวประกอบอื่นๆ จะมีส่วนในการจำกัดการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราขยาย แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเหล่านี้จะดีขึ้นเมื่อจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปพบว่าค่าอัตราขยายของแถวลำดับจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า (เพิ่มขึ้นประมาณ 3 dB) ทุกๆ ครั้งที่จำนวนองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเช่นกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบถูกกำหนดไว้ให้คงที่

2.10 การคำนวณขนาดของสายอากาศ

2.10.1 ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency, f) เท่ากับ 3.5 GHz

2.10.2 แผ่นฉนวนเป็นแบบโฟมยืดหยุ่น (Flexible foam) ที่มีค่าคงที่ของสารไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) $\epsilon_r = 1.2$ และมีความหนา h เท่ากับ 3 มม. ความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 85.71 มม. ซึ่งหาได้จาก

$$\lambda = c / f \quad (2.27)$$

โดย c คือ ความเร็วแสงเท่ากับ 3×10^8 m/s

f คือ ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 3.5 GHz

2.10.3 คำนวณหาขนาดความกว้างและความยาวของแผ่นทองแดง

-การหาขนาดความกว้าง (w)

$$\begin{aligned} w &= \frac{c}{2f} \left(\frac{2}{\epsilon_r + 1} \right)^{(1/2)} \\ &= \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3.5 \times 10^9} \left(\frac{2}{1.2 + 1} \right)^{(1/2)} = 40.86 \text{ มม.} \end{aligned} \quad (2.28)$$

-การหาขนาดความยาว (L)

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2} \quad (2.29)$$

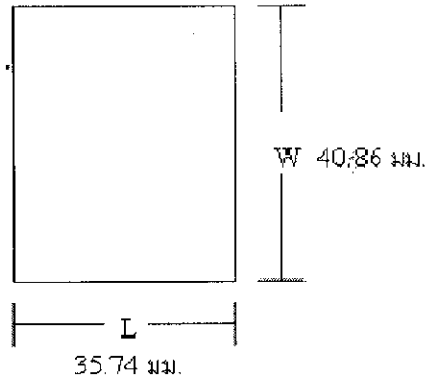
โดยค่า ϵ_{reff} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant)

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{reff}} &= \frac{1.2 + 1}{2} + \frac{1.2 - 1}{2} \left(1 + \frac{12(3)}{40.86} \right)^{-1/2} \\ &= 1.1 + 0.1 (0.729) \\ &= 1.1729 \\ \Delta l &= h(0.412) \left[\frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \right] \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} &= 3(0.412) \left[\frac{(1.1729 + 0.3) \left(\frac{40.86}{3} + 0.264 \right)}{(1.1729 - 0.258) \left(\frac{40.86}{3} + 0.8 \right)} \right] \\ &= 3(0.412) \left(\frac{20.45}{13.19} \right) \\ &= 1.916 \text{ มม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L &= \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta l \quad (2.31) \\ &= \frac{3 \times 10^8}{2(3.5 \times 10^9) (\sqrt{1.1729})} - 2(1.916) \\ &= 35.74 \text{ มม.} \end{aligned}$$

สรุป คำนวณหาความกว้าง $W = 40.86$ มม. และความยาว $L = 35.74$ มม. ดังนั้น จะได้ขนาดของแผ่นไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.15 ขนาดของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 3.5 GHz
แผ่นซับสเตรตหนา 3 มม. $\epsilon_r = 1.2$

2.11 สรุป

ไมโครสตริปที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างที่ง่าย คือรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแคบ ๆ อยู่บนซับสเตรต ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างของซับสเตรตเป็นกราวด์ที่ทำจากโลหะ สายอากาศไมโครสตริปมีข้อดีหลายอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟธรรมดา เช่น น้ำหนักเบา สามารถผลิตได้ง่าย แต่อย่างไรก็ดีสายอากาศไมโครสตริปก็ยังมีข้อจำกัดบางอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟธรรมดา เช่น ความกว้างแถบแคบ ในการออกแบบสายอากาศนั้นค่าไดอิเล็กตริกซับสเตรตถือว่าสำคัญมากเพราะเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าคงที่ของการเดินทางของคลื่น ความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากขนาดของแผ่นกราวด์ด้วย เนื่องจากขนาดของแผ่นกราวด์ที่ใหญ่จะทำให้เบบรูปในระนาบของสนามไฟฟ้าลดลง และความถี่เรโซแนนซ์ก็จะลดลง

บทที่ 3

สายอากาศไมโครสตริปบนผิวโค้ง

3.1 กล่าวนำ

สายอากาศไมโครสตริปเป็นหัวข้อที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสายอากาศชนิดนี้มีข้อได้เปรียบที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้แก่ มีน้ำหนักเบา มีขนาดเล็ก และที่สำคัญคือมีโครงสร้างและรูปร่างขนาดเล็ก

การศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศไมโครสตริปที่อยู่บนพื้นผิวโค้งยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริงได้ในทางปฏิบัติ ถึงแม้ว่าจะมีการนำไปใช้งานจริงในอุปกรณ์ต่างๆ ทางด้านยานยนต์ทางการบินอย่างเช่นยานอวกาศ และการประยุกต์ใช้งานทางด้านอื่นๆ อย่างไรก็ตามการนำไปใช้งานดังกล่าวก็เป็นเหตุผลสำคัญในการพัฒนางานทางด้านสายอากาศไมโครสตริปในยุคปัจจุบัน

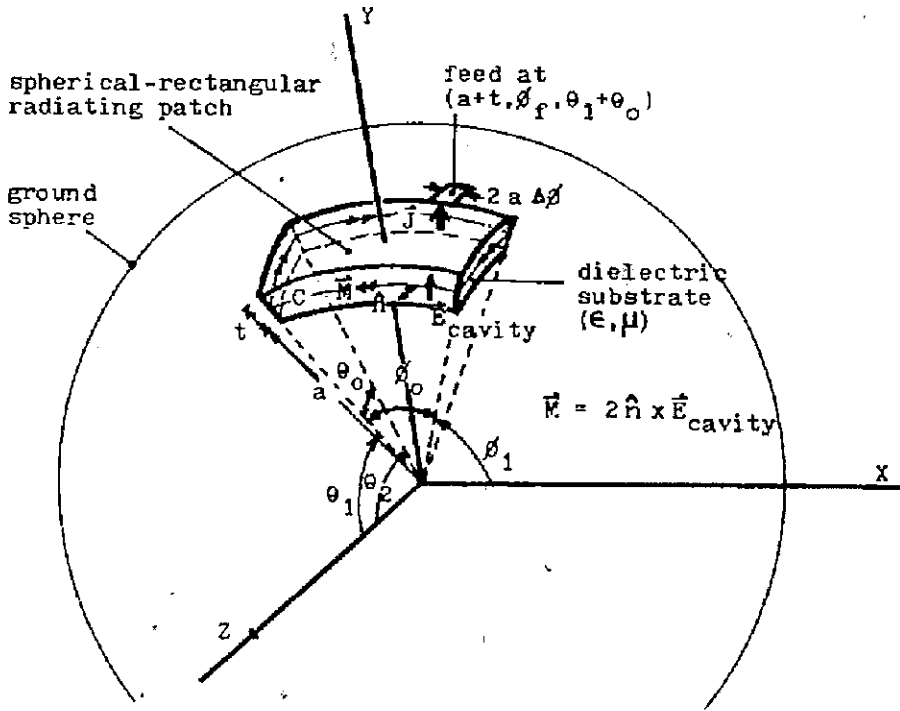
แบบจำลองสายอากาศที่มีลักษณะเป็นโพรงจะมีผนังที่มีลักษณะเป็นแม่เหล็ก ซึ่งจะใช้ในการปะติดและวิเคราะห์ตัวแพทช์ ดังนั้นการแสดงให้เห็นสนามในบริเวณโพรงและการคำนวณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ของแต่ละตัวจะต่างกันออกไปตามแต่ละโหมดปฏิบัติการของแต่ละตัวแพทช์ ในกรณีค่าของอินพุตอิมพีแดนซ์ของโพรงสายอากาศจะใช้สายแกนร่วมต่อเข้ากับโพรงของสายอากาศ จากนั้นสายแกนร่วมก็จะถูกต่อผ่านไปยังตัวกราวด์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งเป็นวิธีการที่คล้ายกับที่ ลูค และคณะ ได้นำเสนอมา

สนามที่มีการแผ่กระจายคลื่นออกไปจากตัวสายอากาศจะสามารถรับสนามดังกล่าวที่ปลายทางได้โดยการใช้ฟังก์ชันของกรีน (Green's function) ทั้งสองและโดยการให้บริเวณโพรงของสายอากาศมีกระแสแม่เหล็กสมมูลเกิดขึ้นที่บริเวณด้านข้างของโพรง

การพัฒนาและทฤษฎีเชิงตัวเลขได้มีการอธิบายและกล่าวถึงในหัวข้อดังต่อไปนี้

3.2 แบบจำลองรูปทรงผิวโค้ง [5]

รูปแบบทางเรขาคณิตที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปที่อยู่บนพื้นผิวทรงกลมได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมบนผิวโค้ง

การใช้รูปแบบจำลองที่เป็นโพรงอากาศซึ่งมีสนามแม่เหล็กอยู่ที่ผนังของตัวแบบจำลอง และมีฉนวนที่มีความหนา h ซึ่งมีขนาดเล็กพอจะสามารถทำให้สามารถสมมติสนามไฟฟ้าให้มีเพียงเฉพาะในทิศทางขององค์ประกอบตามแนวรัศมีเท่านั้น (E_r) การแก้ปัญหาเพื่อที่จะหาค่าของ E_r สามารถหาได้โดยใช้สมการของเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz Equation) ที่อยู่ในเทอมของ m, λ ได้ดังนี้

$$E_{r(m,\lambda)} = E_{(m,\lambda)} P_\lambda^m(\cos\theta) \cos(m\phi) \quad (3.1)$$

โดยที่ $P_\lambda^m(\rho)$ คือฟังก์ชันลีเจนดรี (Legendre Function) ลำดับที่ λ และจะสอดคล้องกับตัวแปร m และอาร์กิวเมนต์ของ ρ สำหรับตัว λ สามารถหาได้จากสมการคุณลักษณะดังนี้

$$\left. \frac{dP_\lambda^m}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_0} = 0$$

โดยที่ θ_0 เป็นมุมของตัวแพทช์ ดังรูปที่ 3.1 และความถี่เรโซแนนซ์ที่อยู่ในเทอมของ m, λ สามารถหาได้จาก

$$f_{(m,\lambda)} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \frac{\sqrt{\lambda(\lambda+1)}}{a} \quad (3.2)$$

โดยที่ c คือ ค่าความเร็วของแสงในอากาศอิสระ

a คือ รัศมีของพื้นที่ทรงกลม

ϵ_r คือ ค่าคงที่ของ ไดอิเล็กทริกของวัสดุที่ใช้เป็นตัวจับสเตรตหรือแผ่นที่ใช้รองตัวแพทช์ที่มีความหนา h

3.3 สนามไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนผิวโค้ง [5]

กระบวนการต่อไปนี้จะป็นวิธีการที่คล้ายกับลู่และคณะ ได้ทำไว้ใน การหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ โดยการ ใช้สายแกนร่วมที่ถูกปลอกเปลือกนอกและส่วนที่เป็นโลหะออกซึ่งมีความกว้าง w โดยที่ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ดังกล่าวสามารถหาได้ดังนี้

$$Z = \sum_{m,\lambda} \frac{h}{2\pi^2 \epsilon_0 \epsilon_r a^2 I_{(m,\lambda)} (1 + \delta_{0m})} [P_\lambda^m(\cos\theta_1)]^2 j_0^2 \left(\frac{mw}{2a \sin\theta_1} \right) \frac{\delta_{eff} f^3 - jf(f^2 - f_{(m,\lambda)}^2)}{\delta_{eff}^2 f^4 + (f^2 - f_{(m,\lambda)}^2)^2} \quad (3.3)$$

โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของอากาศอิสระ

δ_{0m} คือ ค่าโครเนคเกอร์ เดลต้า (Kronecker Delta)

$[\delta_{0m} = 1$ เมื่อ $m = 0, \delta_{0m} = 0$ เมื่อ $m \neq 0]$

θ_1 คือ ค่ามุมของตำแหน่งที่จุดป้อน

$j_0(x)$ คือ ฟังก์ชันเบสเซล (Bessel Function)

$\delta_{eff} = 1/Q_t$ คือ ค่าการสูญเสียประสิทธิผลในแนวผิวสัมผัส

Q_t คือ ค่าองค์ประกอบคุณภาพรวมของโพรงอากาศ

$I_{(m,\lambda)}$ คือ ตัวแปรที่สามารถหาค่าได้จาก

$$I_{(m,\lambda)} = \int_{\theta_0}^{\pi} [P_{\lambda}^m(\cos\theta_1)]^2 \sin\theta d\theta \quad (3.4)$$

ในการหาค่าสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกไปสามารถหาได้จาก

$$\bar{E} = -jk_0 n_0 \iiint_{V'} \nabla \times \bar{G}_2(\bar{R}|\bar{R}')_g \bar{M}(\bar{R}') dV' \quad (3.5)$$

โดยที่ $\bar{G}_2(\bar{R}|\bar{R}')$ คือ ฟังก์ชันของกรีนในรูปแบบไฟฟ้า

$\bar{M}(\bar{R}')$ คือ แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กในพื้นที่ทรงกลมที่เป็นตัวนำ

k_0 และ n_0 คือ หมายเลขคลื่นของอากาศอิสระและค่าอิมพีแดนซ์จริงของอากาศอิสระตามลำดับ

ในการหาค่า $\bar{M}(\bar{R}')$ สามารถหาได้จาก

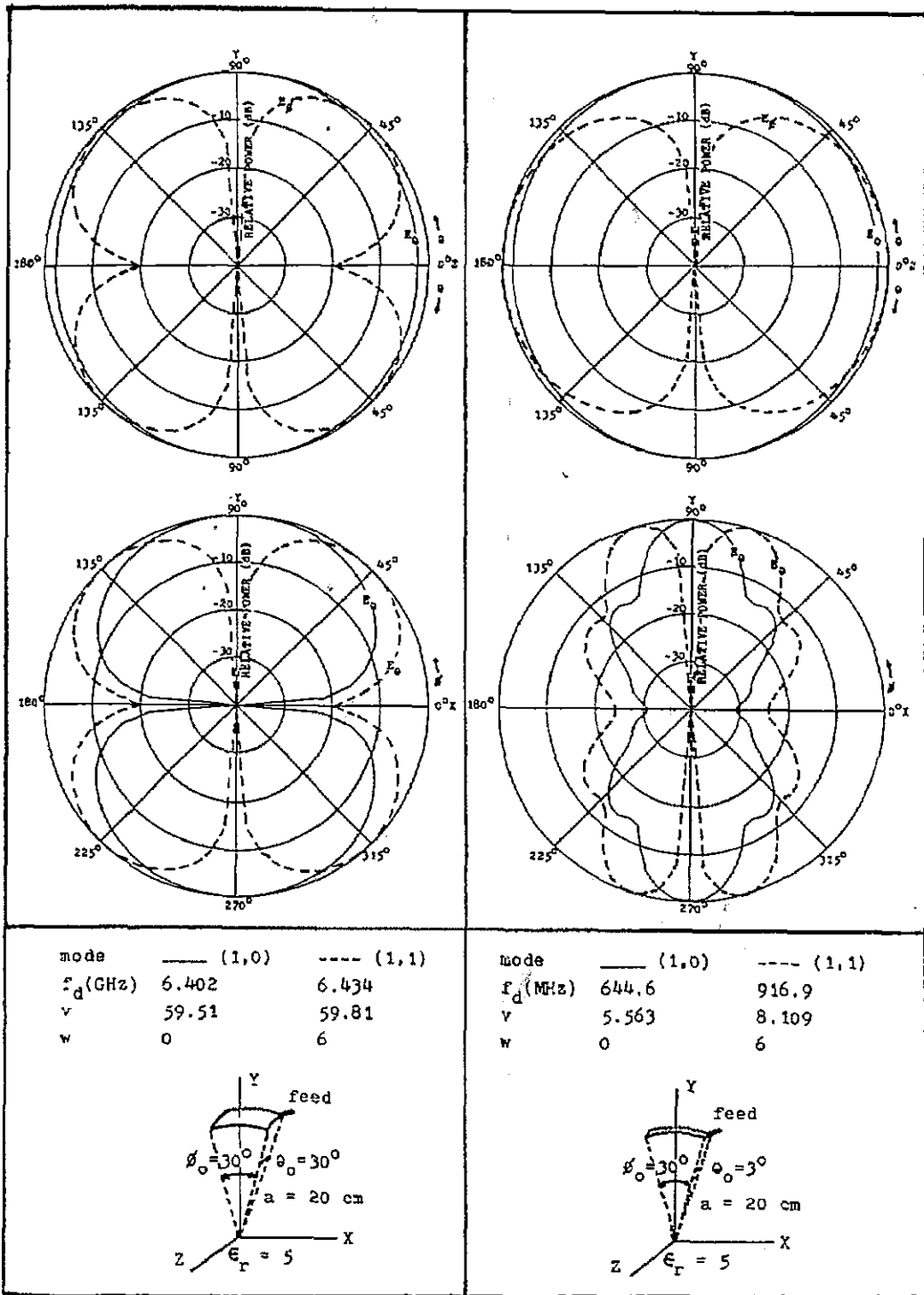
$$\bar{M}(\bar{R}') = j \frac{2ah}{k_0 n_0} E(m, \lambda) P_{\lambda}^m(\cos\theta') \cos(m\phi') \frac{\delta(r'-a)}{r'^2} \delta(\theta'-\theta_0) \bar{\phi} \quad (3.6)$$

โดยที่ $\delta(r'-a)$ คือ ฟังก์ชันเดลต้าไคเร็ก (Dirac Delta Function) และ \bar{G}_2 ให้สมการโดยไต (Tai)

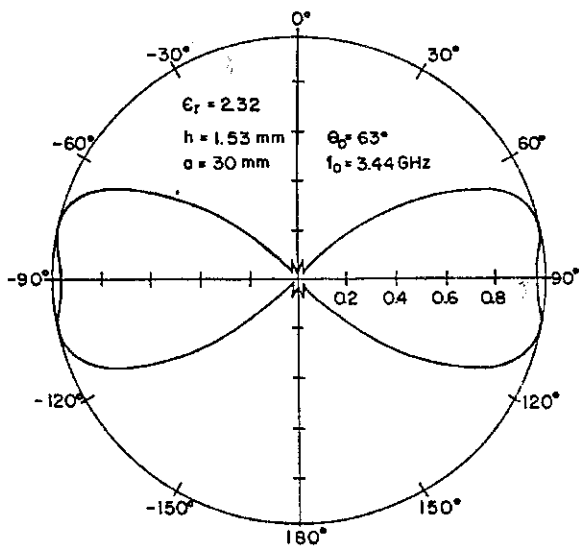
ในการหาค่าองค์ประกอบของสนามในระยะไกล $\bar{E}(R)$ จำเป็นต้องใช้วิธีการที่มีลักษณะเฉพาะสำหรับฟังก์ชันเฮนเคิลในระนาบทรงกลม (Spherical Hankel Function) และการอินทิเกรต

3.4 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมบนผิวโค้ง 2 ชนิด คือ $\theta_0 = 30^\circ$ และ $\theta_0 = 3^\circ$ ซึ่งค่า $\epsilon_r = 5$ เท่ากัน แสดงดังรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของผิวโค้งทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นแบบรูปที่ได้จากการวิเคราะห์ในกรณีจำกัดที่ถูกรับเทียบกับผลของ Lo [6] และการร่วมทำงานกันสำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่เป็นระนาบ และมีความสอดคล้องกันดี



รูปที่ 3.2 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป
รูปสี่เหลี่ยมบนผิวโค้ง 2 ชนิด



รูปที่ 3.3 แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของ
สนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่า การแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปบนพื้นผิวโค้งที่มี $\theta_0 = 63.43^\circ$ $a = 30$ มม. $h = 1.53$ มม. และ $\epsilon_r = 2.32$ จะมีจุดที่เป็นนัล (Null) หรือศูนย์ที่ทิศของมุม $\theta = 0^\circ$ และ $\theta = 180^\circ$

3.5 สรุป

โครงสร้างหนึ่งที่ย่างที่สุดของสายอากาศไมโครสตริปบนพื้นผิวโค้งทรงกลมคือสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งบนพื้นผิวโค้งทรงกลม ซึ่งประกอบไปด้วยการแผ่กระจายคลื่นของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมบนแผ่นกราวด์พื้นผิวโค้งทรงกลมและชั้นของไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างแพทช์กับแผ่นกราวด์ตามที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งโครงสร้างค่อนข้างบาง โดยทำการสมมติความหนาของไดอิเล็กตริกเป็น t ซึ่งเล็กกว่ารัศมีของกราวด์ทรงกลม

ตามวิธีของรูปแบบจำลองที่เป็นโพรงอากาศได้มีวิธีการคำนวณหาสนามและกระแสไฟฟ้า ความถี่เรโซแนนท์ และค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแพทช์ สำหรับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมบนพื้นผิวโค้งที่มีค่า θ_0 แตกต่างกันก็จะทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแตกต่างกันด้วย

บทที่ 4

การออกแบบสายเฟสและตัวรวมสัญญาณ

4.1 กล่าวนำ

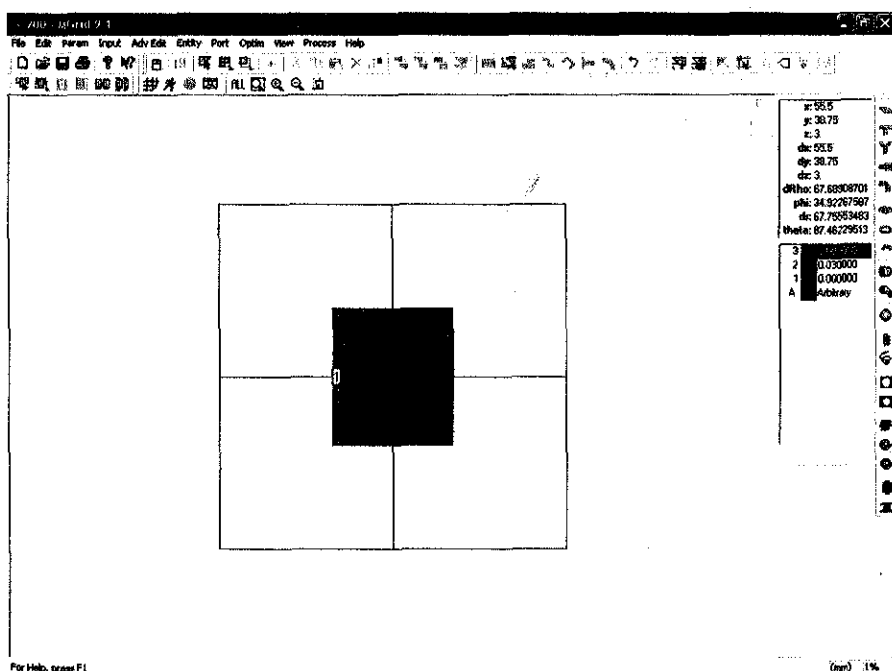
สายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปจะรวมถึงองค์ประกอบของไมโครสตริปหลายๆ ชั้นและโครงข่ายการป้อนสัญญาณให้กับไมโครสตริป ซึ่งโครงข่ายการป้อนสัญญาณนี้จะรวมถึงองค์ประกอบแบบพาสซีฟ เช่น ตัวแบ่งกำลังงานและสายนำสัญญาณ รวมทั้งองค์ประกอบแบบแอ็กทีฟ เช่น ตัวรวมสัญญาณ สำหรับเส้นสตริปที่ใช้ในการป้อนสัญญาณจะถูกต่อโดยตรงกับองค์ประกอบการแผ่กระจายคลื่น แต่จะไม่มีผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

ในบทนี้จะเป็นการออกแบบตัวป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแถวลำดับไมโครสตริป ทั้งวิธีการป้อนสัญญาณแบบสายเฟสและการป้อนสัญญาณแบบตัวรวมสัญญาณ

4.2 การออกแบบสายเฟส

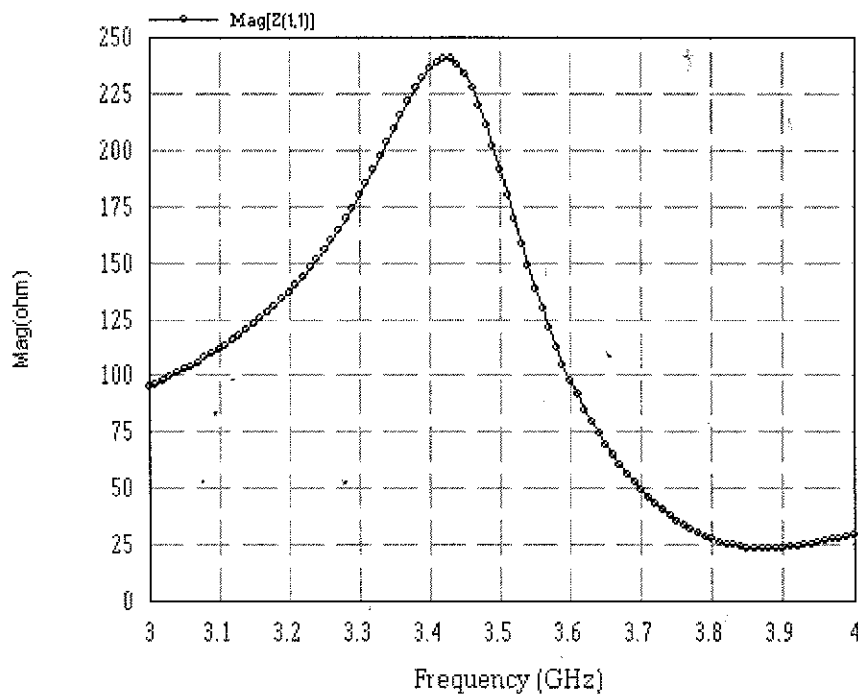
4.2.1 การออกแบบจุดป้อนสัญญาณ

การหาจุดป้อนสัญญาณ (แสดงหมายเลข 1) สามารถหาได้จากการคำนวณ โดยใช้โปรแกรม IE3D (ภาคผนวก ก.) ดังรูปที่ 4.1



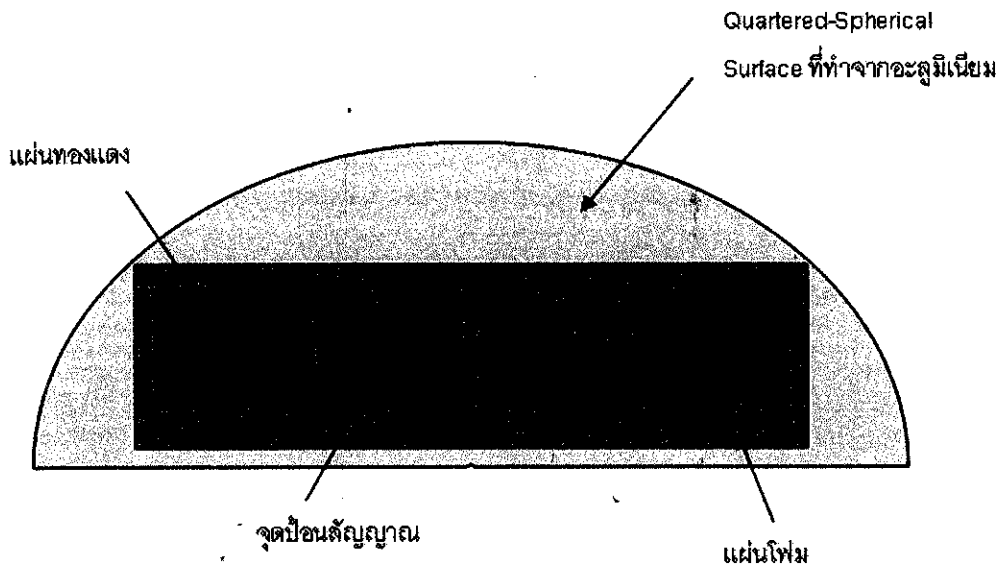
รูปที่ 4.1 การคำนวณหาจุดป้อนสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม IE3D

เมื่อทำการหาจุดป้อนสัญญาณ จะได้จุดป้อนสัญญาณที่ห่างจากจุดศูนย์กลางไปตามแกน x เป็นระยะ 16.5 มม. เพื่อให้ได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น 200 โอห์ม ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 200 โอห์ม
ที่คำนวณได้จากโปรแกรม IE3D

การสร้างแบบจำลองของสายอากาศไมโครสตริปนั้น เราจะติดตั้งแผ่นทองแดงโดยการนำมาแถวลำดับกัน 4 องค์ประกอบบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม (Quartered-Spherical Surface) ที่ทำมาจากอลูมิเนียม ดังรูปที่ 4.3 โดยแต่ละแผ่นมีขนาดเท่ากันดังที่คำนวณไว้แล้วข้างต้น และจุดป้อนสัญญาณของแต่ละแผ่นมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางตามแนวแกน $x = 16.5$ มม. เท่ากัน ซึ่งจุดป้อนสัญญาณแต่ละจุดก็จะมีระยะห่างเท่ากันคือ $\lambda/2$ เมื่อทำการคำนวณแล้วจะห่างกันเท่ากับ 42.8 มม.

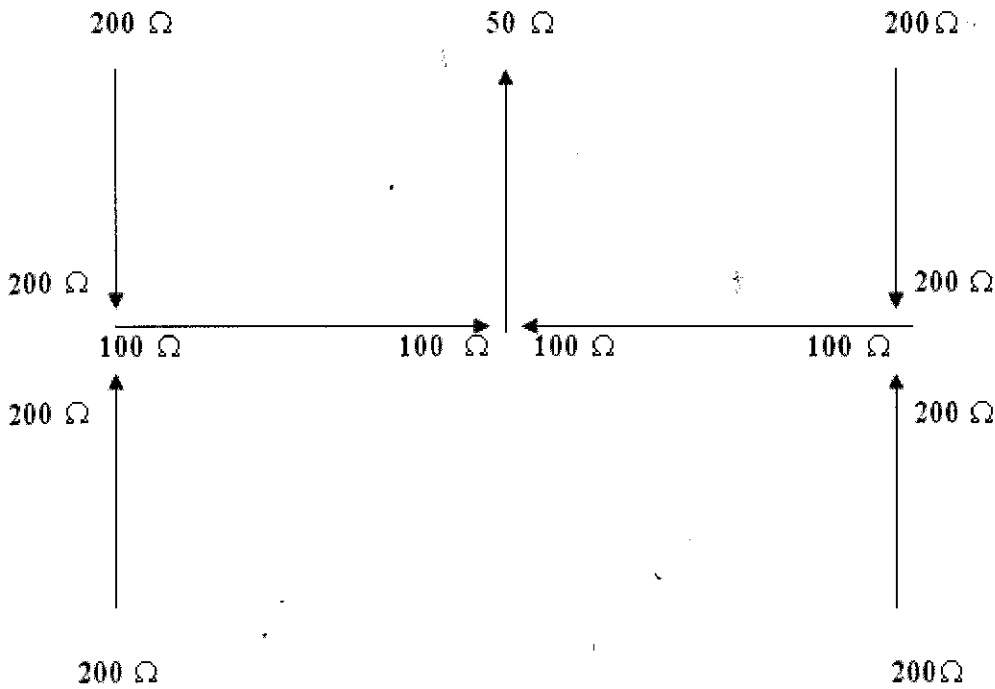


รูปที่ 4.3 การติดตั้งแผ่นทองแดงแถวลำดับบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม

การป้อนจุดนำสัญญาณนั้น ใช้วิธีแบบโพรบแกนร่วมโดยเจาะทะลุแผ่นกราวด์ด้านใน แล้วเชื่อมสายนำสัญญาณไปยังแผ่นทองแดงตรงตำแหน่งที่กำหนดเอาไว้ จากนั้นต่อเข้ากับขั้วต่อ SMA ส่วนการออกแบบสายสัญญาณนั้นจะอธิบายดังต่อไปนี้

4.2.2 ทฤษฎีสายเฟส

โครงการนี้เป็นการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมที่มี 4 องค์ประกอบ แต่ละองค์ประกอบมีอินพุตอิมพีแดนซ์ 200 โอห์ม เพื่อให้ได้อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ปลายสายนำสัญญาณเท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นจึงทำการออกแบบสายเฟส ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานที่ปลายสายเมื่อทำการแมตซ์สายเฟส

โดยปกติเมื่อนำสายนำสัญญาณมาใช้งานตามปกติ ค่าตัวคูณความเร็วของสายนำสัญญาณก็แทบไม่ต้องสนใจ แต่ถ้าใช้สายนำสัญญาณมาต่อเพื่อขนานสายอากาศหลายๆ ต้นเข้าด้วยกัน เช่น สายอากาศแบบยาก็หลายๆ แอสติก หรือ สายอากาศโคโรลาหลายๆ ห่วง สายนำสัญญาณที่ถูกนำมาใช้งานในลักษณะนี้เรียกว่า "สายเฟส (phasing line)" ซึ่งจะต้องคำนวณความยาวสายอากาศเทียบกับความยาวคลื่น โดยความยาวคลื่นหาได้จากสูตร

$$\lambda = c / f$$

ค่าความยาวคลื่นที่ได้ออกมาแล้ว เมื่อนำมาใช้กับสายนำสัญญาณ หรือ สายเฟส จะเรียกว่า ความยาวทางไฟฟ้า (Electrical Length) ซึ่งเมื่อต้องการตัดสายสายนำสัญญาณมาใช้งานจริงๆ จะต้องคูณค่าตัวคูณความเร็วของสายนำสัญญาณกับค่าความยาวทางไฟฟ้าก่อน ค่าที่ได้ออกมาจึงคือ ค่าความยาวจริงที่ใช้ในทางปฏิบัติ วิธีการคำนวณมีดังนี้

1. กำหนดขนาดความยาวของสายให้ได้ $n\frac{\lambda}{2}$ ในที่นี้ใช้ $n=3$ ดังนั้น

$$l = 3\left(\frac{85.71}{2}\right) = 128.565 \text{ มม.}$$

2. นำค่าตัวคูณความเร็ว (V) ของสายนำสัญญาณไปคูณกับค่าความยาวทางไฟฟ้า (λ) สำหรับสายนำสัญญาณที่ใช้เป็นเบอร์ RG 188 มีค่าตัวคูณความเร็วเท่ากับ 0.71 จะได้ค่าความยาวจริงในทางปฏิบัติดังนี้

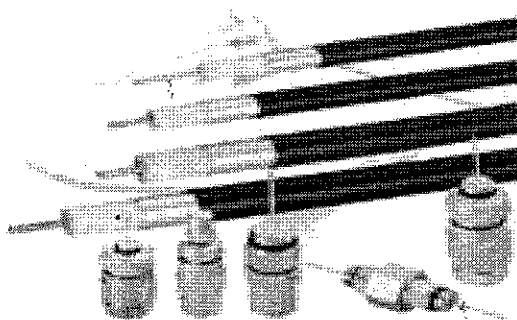
$$\begin{aligned} l &= n\frac{\lambda}{2} \times v \\ &= 3\left(\frac{85.71}{2}\right) \times 0.71 \\ &= 91.28 \text{ มม.} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะต้องตัดสายยาวเท่ากับ 91.28 มม.

4.2.3 สายแกนร่วม (Coaxial Cable)

สายแกนร่วมเป็นสายสัญญาณประเภทแรกที่ใช้และเป็นที่นิยมมากในเครือข่ายคอมพิวเตอร์สมัยแรก ๆ แต่ในปัจจุบันเครือข่ายส่วนใหญ่จะใช้สายคู่เกลียวบิดและสายใยแก้วนำแสง ส่วนสายแกนร่วมถือได้ว่าเป็นสายที่ล้าสมัยสำหรับเครือข่ายคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามยังมีระบบเครือข่ายบางประเภทที่ยังใช้สายประเภทนี้อยู่

สายแกนร่วม ส่วนใหญ่จะเรียกสั้น ๆ ว่าสายโคแอก จะมีตัวนำไฟฟ้าอยู่สองส่วน คำว่า โคแอกเชียมมีความหมายว่า "มีแกนร่วมกัน" ซึ่งชื่อก็บอกความหมายว่าตัวนำทั้งสองตัวมีแกนร่วมกันนั่นเอง โครงสร้างของสายแกนร่วมประกอบด้วยสายทองแดงเป็นแกนกลาง แล้วห่อหุ้มด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน ชั้นต่อมาจะเป็นตัวนำไฟฟ้าอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งจะเป็นแผ่นโลหะบาง ๆ หรืออาจจะเป็นใยโลหะที่ถักเปียหุ้มอีกชั้นหนึ่ง สุดท้ายก็หุ้มด้วยฉนวนและวัสดุป้องกันสายสัญญาณ



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของสายแกนร่วมแต่ละประเภท

ส่วนแกนเป็นส่วนที่นำสัญญาณข้อมูล ส่วนชั้นโพลีเอทิลีนเป็นชั้นที่ใช้ป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกและเป็นสายดินในตัว ดังนั้นสองส่วนนี้ต้องไม่เชื่อมต่อกันมิฉะนั้นอาจเกิดลัดวงจรได้ ถึงแม้ว่าส่วนใหญ่สายแกนร่วมจะมีลักษณะคล้ายกัน แต่ก็แบ่งออกได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับชนิดของเครือข่ายที่ใช้ สายแกนร่วมจะถูกแยกเป็นประเภทต่างๆ โดยใช้มาตรา RG (Radio Grade Scale) เช่น สายแกนร่วมแบบ RG-58 จะใช้ได้กับเครือข่ายอีเธอร์เน็ตแบบ 10Base2 ซึ่งมีความต้านทานที่ 50 โอห์ม

สายแกนร่วมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. สายแกนร่วมแบบบาง (Thin Coaxial Cable)
2. สายแกนร่วมแบบหนา (Thick Coaxial Cable)

1. สายแกนร่วมแบบบาง

สายแกนร่วมแบบบาง เป็นสายที่มีขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.64 cm เนื่องจากสายประเภทนี้มีขนาดเล็กและมีความยืดหยุ่นสูงจึงสามารถใช้ได้กับการติดตั้งเครือข่ายเกือบทุกประเภท สายประเภทนี้สามารถนำสัญญาณได้ไกลถึง 185 เมตร ก่อนที่สัญญาณจะเริ่มอ่อนกำลังลง

บริษัทผู้ผลิตสายแกนร่วมได้ลงความเห็นร่วมกันในการแบ่งประเภทของสายแกนร่วม สายแกนร่วมแบบบางได้ถูกรวมไว้ในสายประเภท RG-58 ซึ่งสายประเภทนี้จะมีมีความต้านทาน (อิมพีแดนซ์) ที่ 50 โอห์ม สายประเภทนี้จะมีแกนกลางอยู่ 2 ลักษณะคือ แบบที่เป็นสายทองแดงเส้นเดี่ยวและแบบที่เป็นโพลีเอทิลีนหลายเส้น

2. สายแกนร่วมแบบหนา

สายแกนร่วมแบบหนา เป็นสายแกนร่วมที่ค่อนข้างแข็ง และขนาดใหญ่กว่าสายแกนร่วมแบบบาง โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.27 cm สายแกนร่วมแบบหนานี้เป็นสายสัญญาณ

ประเภทแรกที่ใช้กับเครือข่ายแบบอีเธอร์เน็ต ส่วนแกนกลางที่เป็นสายทองแดงของสายแกนร่วมแบบหนาจะมีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นสายแกนร่วมแบบหนานี้จึงสามารถนำสัญญาณได้ไกลกว่าแบบบาง โดยสามารถนำสัญญาณได้ไกลถึง 500 เมตร ด้วยความสามารถนี้สายแกนร่วมแบบหนาจึงนิยมใช้ในการเชื่อมต่อเส้นทางหลักของข้อมูล หรือ แบ็คโบน (Backbone) ของเครือข่ายสมัยแรก ๆ แต่ปัจจุบันได้เลิกใช้สายแกนร่วมแล้ว โดยสายที่นิยมใช้ทำเป็นแบ็คโบน คือ สายใยแก้วนำแสง

4.2.4 เปรียบเทียบระหว่างสายแกนร่วมแบบบางและสายแกนร่วมแบบหนา

ตามกฎการนำสัญญาณ สายที่ใหญ่กว่าย่อมนำสัญญาณได้ดีกว่าสายแกนร่วมแบบหนา จะยุ่งยากในการติดตั้งมากกว่าเนื่องจากเป็นสายที่ค่อนข้างแข็งแรง ในขณะที่ มีความยืดหยุ่นที่ดีกว่าสายแกนร่วมแบบบางทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและราคาก็ถูกกว่า ความยืดหยุ่นของสายมีผลต่อการติดตั้งเมื่อเดินสายผ่านท่อขนาดเล็กที่ติดบนฝ้าเพดาน ทำให้เป็นที่นิยมมากกว่า

ในการออกแบบสายเฟส นี้เราได้เลือกใช้สายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโดยใช้สายเบอร์ RG 188 ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม และค่าตัวคูณความเร็ว (Velocity Factor, v) เท่ากับ 0.71, 1 = 91.28 mm

4.2.5 การชิลด์ (shield) สายนำสัญญาณ

เราชิลด์สายเพราะต้องการป้องกันไม่ให้คลื่นวิทยุภายนอกมารบกวนคลื่นวิทยุในสายได้ และกันไม่ให้คลื่นในสายไปรบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกเช่นกัน

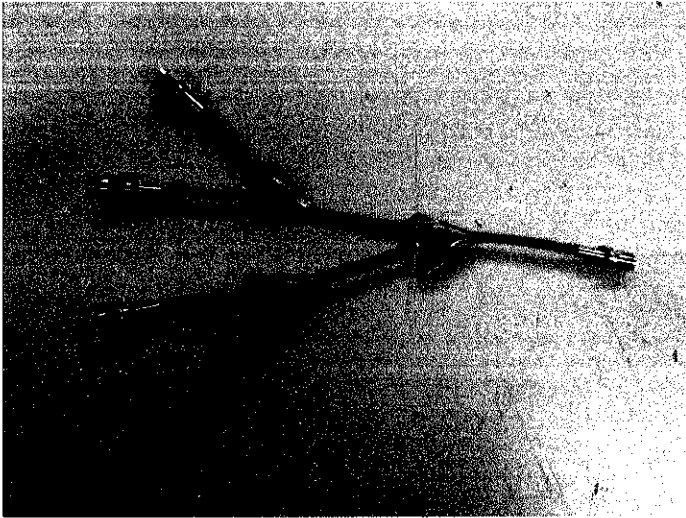
ดังนั้นสายแกนร่วมที่มีการชิลด์ที่ดี จะให้คุณภาพที่ดีขึ้น

วิธีการชิลด์ที่ใช้โดยทั่วไปมี

- การใช้ลวดทองแดงสานเป็นตัวนำชั้นนอก โดยพิจารณาว่าสามารถครอบคลุมพื้นที่ไดอิเล็กตริกได้มากเท่าใด เช่น อาจครอบคลุมได้ 95% หรือ ในที่มีการรบกวนสูง ต้องใช้ถึง 100% ก็ได้ โดยดูได้จากความถี่แน่นในสายลวดทองแดง
- ใช้ท่ออะลูมิเนียม (ในสายฮาร์ด ไลน์) หรือท่อทองแดง (ในสายเฮลิกคัล)
- ใช้วิธีทำเป็นชิลด์ 2 ชั้น อย่างเช่น สายเบอร์ RG - 214 /U ที่ใช้วิธีชิลด์เป็นลวดทองแดงชุบเงินถักทั้ง 2 ชั้น ครอบคลุมพื้นที่ได้ 100% (มีราคาแพงมาก)

เนื่องจากในโครงการนี้สายนำสัญญาณต้องใช้ 3 สายโดยแต่ละสายยาวเท่ากับ 91.28 มม. มาเชื่อมกัน ดังนั้นจึงนำพื้นฐานของการชิลด์แบบสายเส้นเดียวดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ มีขั้นตอนดังนี้

1. นำลวดตัวนำชั้นในของทั้ง 3 เส้นมาทำการบัดกรีตะกั่วเชื่อมกันตรงกลาง
2. ใช้ปืนกาวยิงตรงจุดที่ทำการบัดกรีในข้อ 1 เพื่อหุ้มลวดตัวนำชั้นในของทั้ง 3 เส้น
3. ทำการบัดกรีเส้นทองแดงที่สานกันชั้นนอกเพื่อให้ทองแดงทั้ง 3 สายเชื่อมกัน
4. ตัดแผ่นทองแดงเป็นรูปสามเหลี่ยม ทาหน้ายาประสานรอบๆ แผ่นแล้วบัดกรี หลังจากนั้นนำแผ่นทองแดงที่ได้ไปหุ้มที่จุดเชื่อมต่อของทั้ง 3 สาย บัดกรีขอบของแผ่นทองแดงให้ติดกัน จะได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 สายเฟสที่ได้จากการออกแบบเมื่อต่อเข้ากับขั้วต่อ

เมื่อได้สายเฟสตามที่ได้ออกแบบแล้วทำการซึลด์ด้วยแผ่นทองแดง ต่อปลายสายเข้ากับขั้วต่อ หลังจากนั้นนำสายเฟสที่ได้ไปต่อเข้ากับสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบไว้แล้ว จะได้ดังรูปที่

4.7

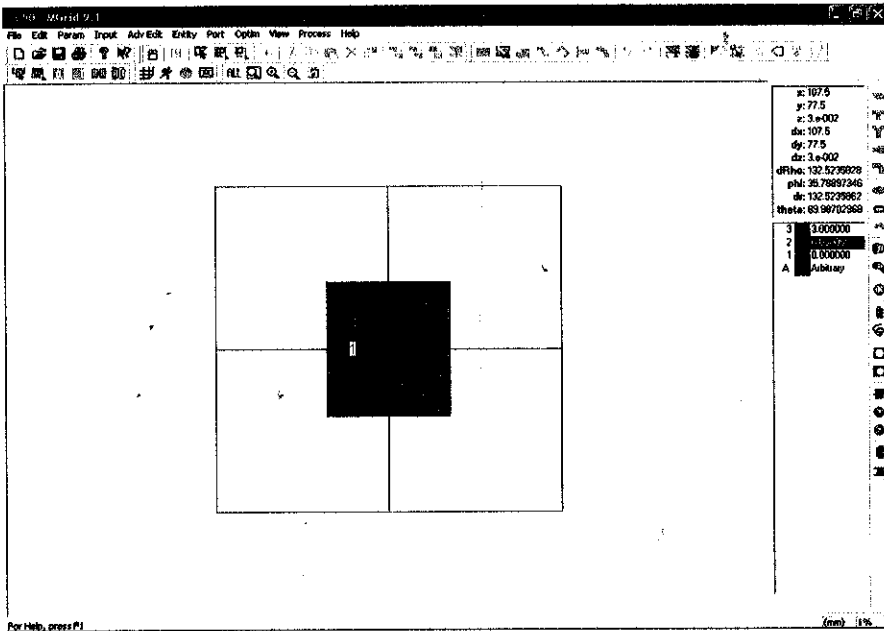


รูปที่ 4.7 สายอากาศไมโครสตริปเมื่อต่อเข้ากับสายเฟส

4.3 การออกแบบตัวรวมสัญญาณ

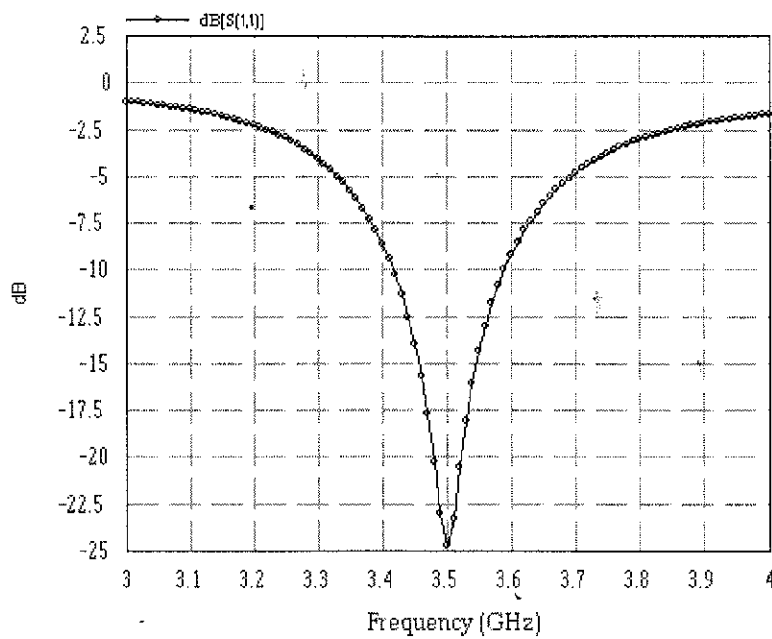
4.3.1 การออกแบบจุดป้อนสัญญาณ

การหาจุดป้อนสัญญาณ (แสดงหมายเลข 1) สามารถหาได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม IE3D ดังนี้(ภาคผนวก ก.)

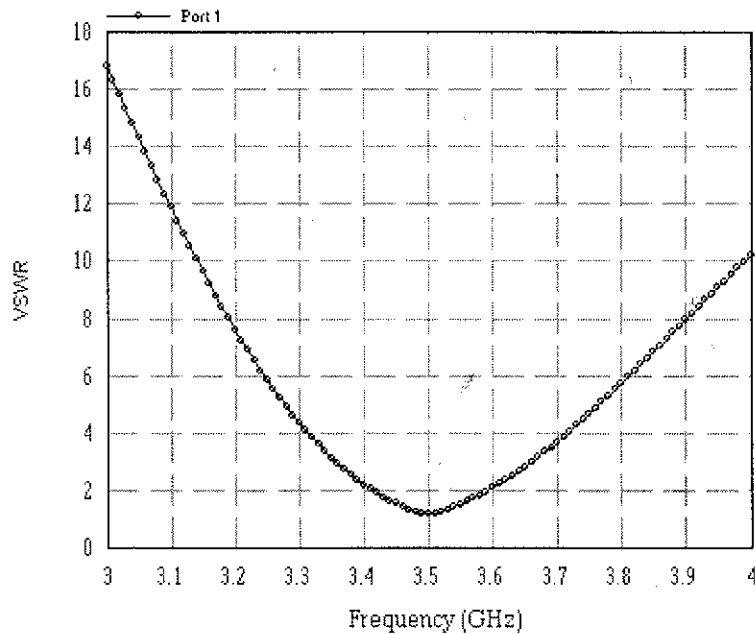


รูปที่ 4.8 การคำนวณหาจุดป้อนสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม IE3D

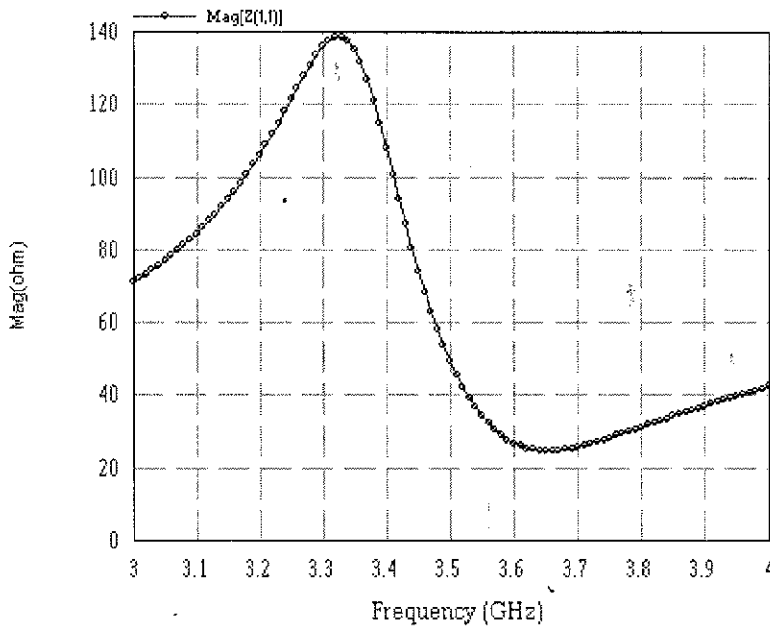
เมื่อทำการหาจุดป้อนสัญญาณ จะได้จุดป้อนสัญญาณที่ห่างจากจุดศูนย์กลางไปตามแกน x เป็นระยะ 10.5 mm เพื่อให้ได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น 50 โอห์ม ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.9 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่คำนวณได้จากโปรแกรม IE3D



รูปที่ 4.10 อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่คำนวณได้จากโปรแกรม IE3D



รูปที่ 4.11 อินพุตอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม IE3D

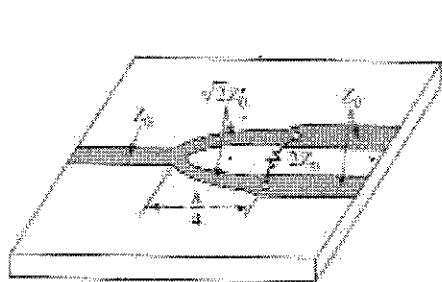
จากรูปที่ 4.9-4.11 เป็นค่าที่ได้จากการจำลอง (Simulate) โดยรูปที่ 4.9 เป็นค่าความสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -24.79dB ที่ความถี่ 3.5GHz โดยปกติแล้วค่านี้จะต้องมากกว่า -15dB เพื่อที่เวลาใช้งานจริงจะได้ไม่มีคลื่นสะท้อนกลับไปยังเครื่องส่งซึ่งจะทำให้เครื่องส่งพังได้ รูปที่ 4.10 เป็นค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.12 โดยค่า อัตราส่วนคลื่นนิ่งนี้จะต้องไม่เกิน 1.5 และรูปที่ 4.11 เป็นค่าอินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับ $49.22\ \Omega$ ซึ่งใกล้เคียง $50\ \Omega$

4.3.2 การแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน (Wilkinson) [2]

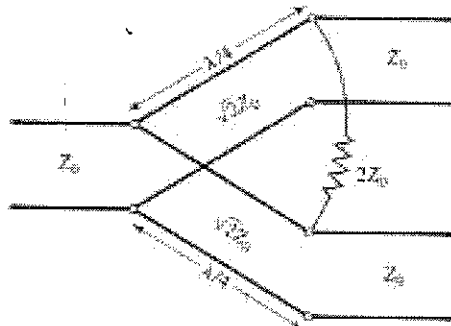
การแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน สามารถทำการแบ่งกำลังได้ตามที่ต้องการแต่จะพิจารณาที่ Equal -Split ($3\ \text{dB}$) เป็นอันดับแรก การแบ่งนี้มักจะทำในรูปแบบของไมโครสตริปหรือเส้นสตริป ดังแสดงในรูป 4.12 (ก) ทำการวิเคราะห์วงจรนี้โดยการชวยวงจรเป็น 2 วงจรง่าย ๆ คือ แบบสมมาตร (Symmetric) และไม่สมมาตร (Antisymmetric) ที่พอร์ตเอาต์พุต เทคนิคการวิเคราะห์โหมดคู่-คี่ นี้จะนำไปใช้วิเคราะห์สำหรับโครงข่ายการป้อนสัญญาณให้กับไมโครสตริป

1) วิเคราะห์โหมดคู่-คี่ (Even-Odd Mode Analysis)

วิเคราะห์ได้ โดยการนำออร์มอลไลซ์อิมพีแดนซ์ทั้งหมดเข้าไปในอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance: Z_0) และเขียนวงจรใหม่ได้ดังรูป 4.12(ข) เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแบ่งแรงดันที่พอร์ตเอาต์พุต แสดงได้ดังรูป 4.13 ระบบนี้มีการเขียนในรูปแบบสมมาตรตรงข้ามกับกลางระนาบ แหล่งกำเนิดความต้านทาน 2 แหล่งที่ถูกออร์มอลไลซ์แล้ว 2 ค่ารวมกันในแนวขนานเข้ากับความต้านทานที่ถูกออร์มอลไลซ์ 1 ค่าแสดงถึงอิมพีแดนซ์แมตซ์กับแหล่งกำเนิด สายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$ มีการนอร์มอลไลซ์อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Z_0) และต่ออนุกรมกับตัวต้านทานที่มีการนอร์มอลไลซ์ค่าแล้วคือ r จะเห็นได้ดังรูป สำหรับการแบ่งกำลังแบบ Equal-Split ควรจะใช้ค่า $Z = \sqrt{2}$ และ $r=2$ ดังรูปที่ 4.12



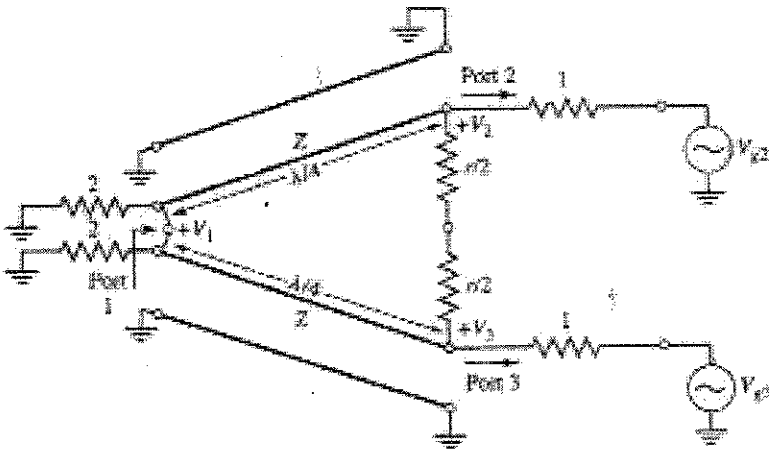
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 การแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน (ก) การแบ่งกำลังแบบ Equal-Split ในรูปแบบไมโครสตริป (ข) วงจรสมมูลย์สายส่ง

นิยาม 2 โหมดแยกกันสำหรับวงจรในรูป 4.13 โหมดคู่ ที่ $V_{g2} = V_{g3} = 2V$ และเพิ่มโหมดที่ $V_{g2} = -V_{g3} = 2V$ เมื่อใช้วิธีพิจารณาที่แหล่งจ่าย (Superposition) ที่ 2 โหมดนี้ จะมีประสิทธิภาพอย่างมากจะได้ $V_{g2} = 4v, V_{g3} = 0V$ จากแต่ละอัน สามารถหา S พารามิเตอร์ของระบบได้



รูปที่ 4.13 วงจรการแบ่งกำลังแบบวิลคินสันในรูปแบบนอร์มอลไลซ์และสมมาตรกัน

โหมดคู่: สำหรับโหมดคู่ $V_{g2} = V_{g3} = 2V$ และดังนั้น $V_2^e = V_3^e$ และจะไม่มีกระแสไหลผ่านความต้านทาน $r/2$ หรือวงจรปิดระหว่างอินพุตของสายนำสัญญาณทั้งสองที่พอร์ต 1 ดังนั้นสามารถแบ่งครึ่งวงจรดังรูป 4.13 กับวงจรเปิดที่จุดนี้จะมีวงจрдังรูป 4.14(ก) (กราวด์ด้านข้างของสาย $\lambda/4$ จะไม่แสดงไว้) เมื่อมองเข้าไปที่พอร์ต 2 จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์

$$Z_m^e = \frac{Z^2}{Z} \tag{4.1}$$

จะเห็นว่าลักษณะของสายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$ เปลี่ยนไป ดังนั้นถ้า $Z = \sqrt{2}$ พอร์ต 2 จะแมตช์สำหรับโหมดคู่ เมื่อ $V_2^e = V$ ตั้งแต่ $Z_m^e = 1$ ความต้านทาน $r/2$ คือส่วนที่เกินความต้องการในกรณีนี้ เรียกว่าวงจรเปิด ถัดมาทำการหา V_1^e จากสมการสายนำสัญญาณ ถ้าให้ $X = 0$ ที่พอร์ต 1 และ $X = -\lambda/4$ ที่พอร์ต 2 แรงดันที่สายนำสัญญาณสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V(x) = V^+(e^{-j\beta x} + \Gamma e^{j\beta x}) \tag{4.2}$$

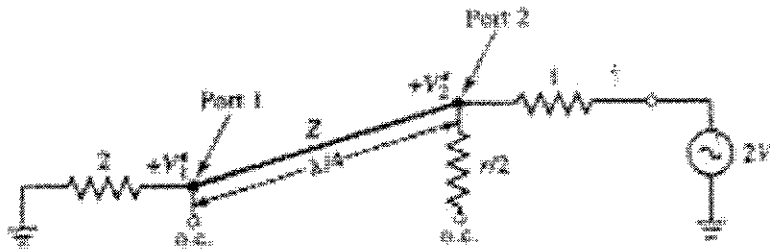
เมื่อ

$$\begin{aligned} V_2^e &= V(-\lambda/4) = jV^+(1 - \Gamma) = V \\ V_1^e &= V(0) = V^+(1 + \Gamma) = jV \frac{\Gamma + 1}{\Gamma - 1} \end{aligned}$$

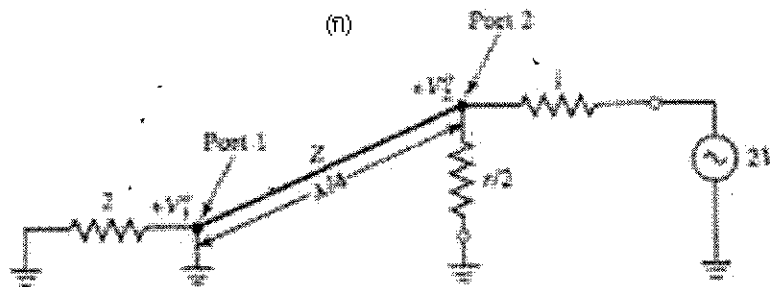
สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) จะเห็นที่พอร์ต 1 มองเข้าไปความต้านทานที่ถูคนอร์มอลไลซ์แล้ว 2 ค่า ดังนั้น

$$\Gamma = \frac{2 - \sqrt{2}}{2 + \sqrt{2}} \quad (4.3)$$

$$V_1^e = -jV\sqrt{2} \quad (4.4)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 วงจรถูกแบ่งเป็นสองส่วนสำหรับรูปที่ 4.13 (ก) สำหรับโหมดคู่
(ข) สำหรับโหมดคี่

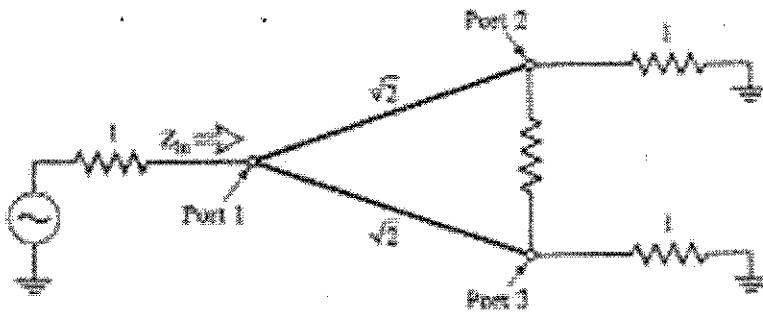
โหมดคี่ $V_{g2} = -V_{g3} = 2V$ และดังนั้น $V_2^0 = -V_3^0$ และที่แรงดันเป็นศูนย์กลางตรงกลางของวงจรในรูป 4.13 ดังนั้นสามารถแบ่งครึ่งวงจรนี้โดยใช้กรวดที่ 2 จุดบนกลางระนาบ จะได้วงจรดังรูป 4.14(ข) มองเข้าไปที่พอร์ต 2 จะเห็นอิมพีแดนซ์ $r/2$ ตั้งแต่เชื่อมต่อแบบขนานสายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$ และวงจรปิดที่พอร์ต 1 จะมีลักษณะวงจรเปิดที่พอร์ต 2 ดังนั้นพอร์ต 2 จะแมตช์ สำหรับโหมดคี่ ถ้าเลือก $r/2$ เมื่อ $V_2^0 = V$ และ $V_1^0 = V$ สำหรับในโหมดนี้กำลังทั้งหมดจะถูกนำส่งไปที่ความต้านทาน $r/2$ ไม่ไปที่พอร์ต 1

สุดท้ายจะหาอินพุทอิมพีแดนซ์ที่พอร์ต 1 ของการแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน เมื่อพอร์ต 2 และ 3 ยুক্তในโหนดแมตช์ ผลจากวงจรจะแสดงดังรูป 4.15(ก) ที่วงจรจะเห็นว่าคล้ายกับโหมดคู่ตั้งแต่ $V_2 = V_3$ ดังนั้นจะไม่มีกระแสไหลไปที่ตัวต้านทานที่ถูกลบออกทั้งสองค่า ดังนั้นสามารถถอดหรือออกจากวงจรดังรูป 4.15(ข) จะมี

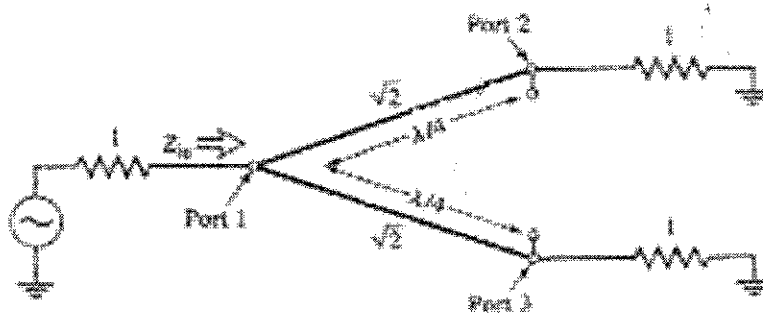
$$Z_{in}^e = \frac{1}{2}(\sqrt{2})^2 = 1 \tag{4.5}$$

สรุป สามารถกำหนดตาม S พารามิเตอร์สำหรับการแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= 0 && (Z_{in} = 1 \text{ ที่พอร์ต 1}) \\
 S_{22} = S_{33} &= 0 && (\text{พอร์ต 2 และ 3 แมตช์กันสำหรับโหมคคู่ และโหมคคี่}) \\
 S_{12} = S_{21} &= \frac{v_1^e + v_1^0}{v_2^e + v_2^0} = -j/\sqrt{2} && (\text{สมมาตรโดยตรงแบบแลกเปลี่ยนกัน}) \\
 S_{13} = S_{31} &= -j/\sqrt{2} && (\text{สมมาตรที่พอร์ต 2 และ 3}) \\
 S_{23} = S_{32} &= 0 && (\text{ลัดวงจรหรือวงจรเปิดที่รอยแยก})
 \end{aligned}$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์การแบ่งแบบวิลคินสัน เพื่อหา S_{11} (ก) การแบ่งแบบวิลคินสันสั้นสุด (ข) แบ่งเป็นสองส่วนสำหรับวงจรในข้อ (ก)

สูตรที่มีอยู่ก่อนแล้วสำหรับ S_{12} จะเกี่ยวข้องเพราะทุกพอร์ตแมตซ์กันเมื่อเทอร์มิเนท (Terminate) กับแมตซ์โหลด หมายเหตุ เมื่อแบ่งให้ที่พอร์ต 1 และเอาต์พุตแมตซ์กันจะไม่มีกำลังที่หายไปในตัวต้านทาน ดังนั้นการแบ่งจะไม่มี การสูญเสียเมื่อเอาต์พุตแมตซ์กัน กำลังสะท้อนกลับจากพอร์ต 2 หรือ 3 อย่างเดียว ก็จะหายไปในตัวต้านทานตั้งแต่ $S_{23} = S_{32} = 0$ พอร์ต 2 และ 3 คือ ไอโซเลท

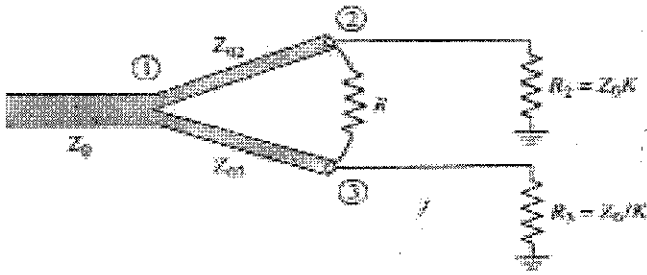
2) การแบ่งกำลังแบบไม่เท่ากันและการแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน N-Way

การแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน สามารถแบ่งแบบไม่เท่ากันไมโครสตริปแสดงดังรูป 4.16 ถ้าอัตราส่วนระหว่างพอร์ต 2 และ 3 คือ $K^2 = P_3/P_2$ เมื่อออกแบบตามสมการได้ดังนี้

$$Z_{03} = Z_0 \sqrt{\frac{1+K^2}{K^3}} \tag{4.6}$$

$$Z_{02} = K^2 Z_{03} = Z_0 \sqrt{K(1+K^2)} \tag{4.7}$$

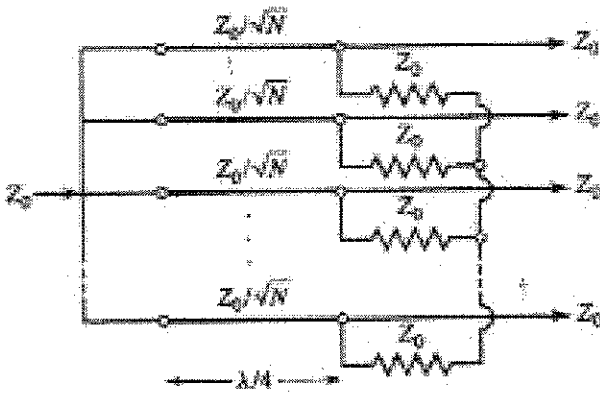
$$R = Z_0 \left(K + \frac{1}{K} \right) \tag{4.8}$$



รูปที่ 4.16 การแบ่งกำลังแบบวิลคินสันในรูปแบบไมโครสตริป มีการแบ่งกำลังแบบไม่เท่ากัน

หมายเหตุเกี่ยวกับผลของการลดทอนต่อ Equal-Split กรณี $K=1$ สังเกตที่สายของเอาต์พุตจะแมตซ์กับอิมพีแดนซ์ $R_2 = Z_0 K$ และ $R_3 = Z_0 / K$ ที่ตรงข้ามกับอิมพีแดนซ์ Z_0 การเปลี่ยนแปลงแมตซ์ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เหล่านั้น

การแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน สามารถเป็นพื้นฐานของ การแบ่งแบบ N-Way หรือการรวมสัญญาณ ดังรูป 4.17 วงจรนี้สามารถแมตซ์ที่ทุกพอร์ตกับ ไอโซเลทระหว่างทุกพอร์ต



รูปที่ 4.17 N-Way, การแบ่งกำลังแบบวิลดินสัน Equal-Split

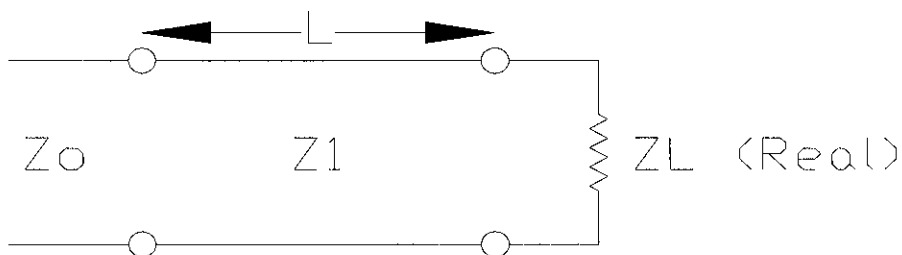
ดังนั้นเราสามารถออกแบบตัวรวมสัญญาณได้ โดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแมตซ์สายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$ ซึ่งใช้ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์โดยกำหนดหาอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายขนาด $\lambda/4$ เป็นสมการได้ดังนี้

$$Z_0 = Z_1^2 / Z_L \quad (4.9)$$

หรือ

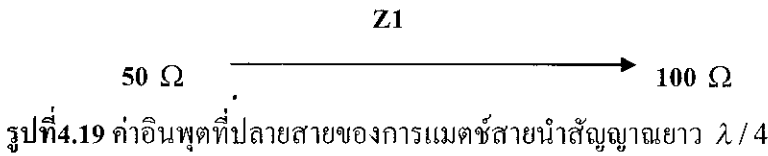
$$Z_1 = \sqrt{Z_0 Z_L}$$

- เมื่อ Z_L คือ เอาต์พุทอิมพีแดนซ์
 Z_0 คือ อินพุทอิมพีแดนซ์
 Z_1 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ



รูปที่ 4.18 แสดงถึงการแมตซ์สายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$

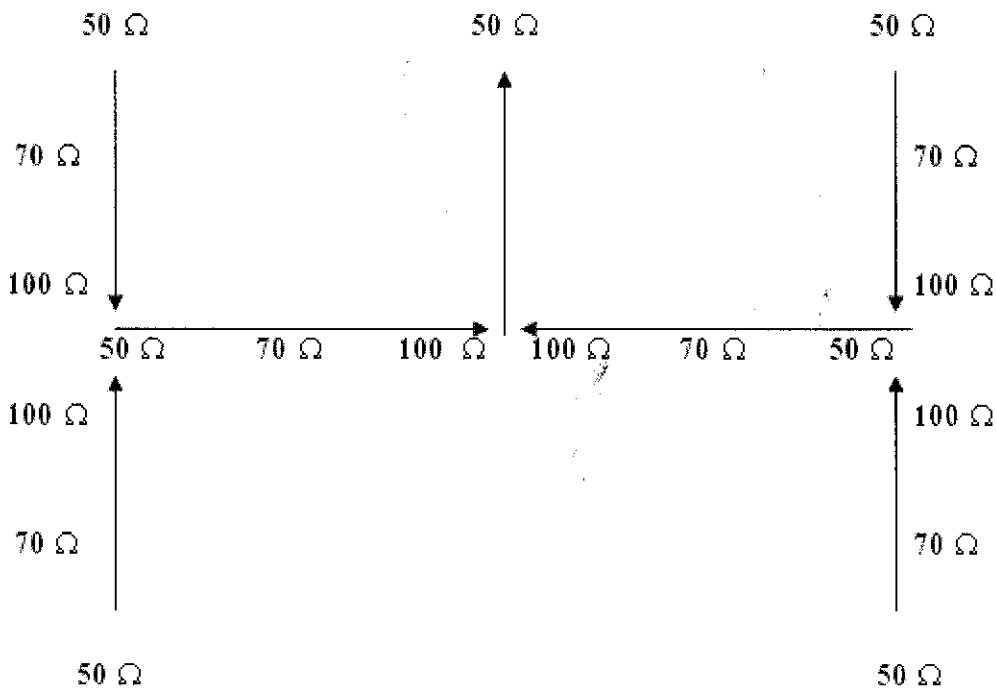
การประยุกต์ใช้งานในโครงงาน นี้ คือการออกแบบตัวรวมสัญญาณ ดังรูป 4.19

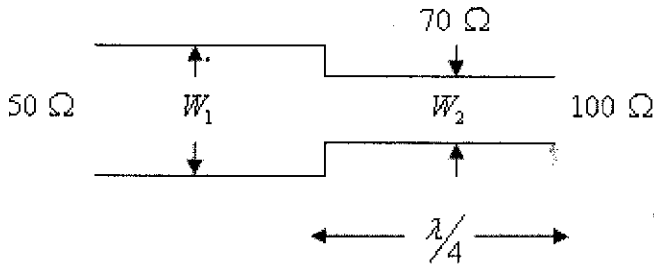


ซึ่งเราสามารถหา Z_1 โดยใช้สมการ

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 Z_L} = \sqrt{50 \times 100} \approx 70 \quad (4.10)$$

โดยสมการ (4.10) สามารถนำมาออกแบบสายอากาศแถวลำดับ 4 องค์ประกอบที่แต่ละองค์ประกอบมีอินพุตอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม เพื่อให้ได้อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ปลายสายนำสัญญาณเท่ากับ 50 โอห์ม ดังรูปที่ 4.20



4.3.3 สายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$ รูปที่ 4.21 การออกแบบสายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$

การออกแบบตัวป้อนสัญญาณโดยการใช้ ทรานสฟอร์มเมอร์ความยาวคลื่นส่วนสี่ (Quarter-wavelength transformer) ซึ่งพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับใช้ในการออกแบบได้แก่

1. ความถี่ปฏิบัติงานของสายอากาศ (f_o) หรือ ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ซึ่งสายอากาศไมโครสตริปที่ได้ออกแบบมานี้มีความถี่ปฏิบัติงานคือ 3.5 GHz
2. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของฉนวน (ϵ_r) ซึ่งไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบเป็นแผ่นปรินต์ซึ่งมีค่า ϵ_r เท่ากับ 4.5
3. ความสูงของไดอิเล็กตริกฉนวน (h) สำหรับในการออกแบบนี้ให้มีความสูง h เท่ากับ 1.6 มม.

- กำหนดหา W_1 โดยแทน $Z_0 = 50$ โอห์ม และ $h = 1.6$ มม. และ $\epsilon_r = 4.5$

$$H' = \frac{Z_0 \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right) \quad (4.11)$$

$$H' = \frac{50 \sqrt{2(4.5 + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{4.5 - 1}{4.5 + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.5} \ln \frac{4}{\pi} \right)$$

$$H' = 1.383 + (0.318)(0.505)$$

$$H' = 1.544$$

$$\frac{W_1}{h} = \left(\frac{(\exp H')}{8} - \frac{1}{4 \exp H'} \right)^{-1} \quad (4.12)$$

$$\frac{W_1}{h} = \left(\frac{(\exp 1.544)}{8} - \frac{1}{4 \exp 1.544} \right)^{-1}$$

$$\frac{W_1}{h} = (0.585 - 0.0534)^{-1}$$

$$\frac{W_1}{h} = 1.88$$

ดังนั้น $W_1 = 1.88 \times 1.6$ มม.
 $= 3.01$ มม.

- การคำนวณหา W_2 โดยแทน $Z_0 = 70$ โอห์ม, $h = 1.6$ มม. และ $\epsilon_r = 4.5$

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

$$H' = \frac{70 \sqrt{2(4.5 + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{4.5 - 1}{4.5 + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.5} \ln \frac{4}{\pi} \right)$$

$$H' = 1.936 + (0.318)(0.505)$$

$$H' = 2.097$$

$$\frac{W_2}{h} = \left(\frac{(\exp H')}{8} - \frac{1}{4 \exp H'} \right)^{-1}$$

$$\frac{W_2}{h} = \left(\frac{(\exp 2.097)}{8} - \frac{1}{4 \exp 2.097} \right)^{-1}$$

$$\frac{W_2}{h} = (1.0177 - 0.0307)^{-1}$$

$$\frac{W_2}{h} = 1.013$$

ดังนั้น $W_2 = 1.013 \times 1.6$ มม.
 $= 1.62$ มม.

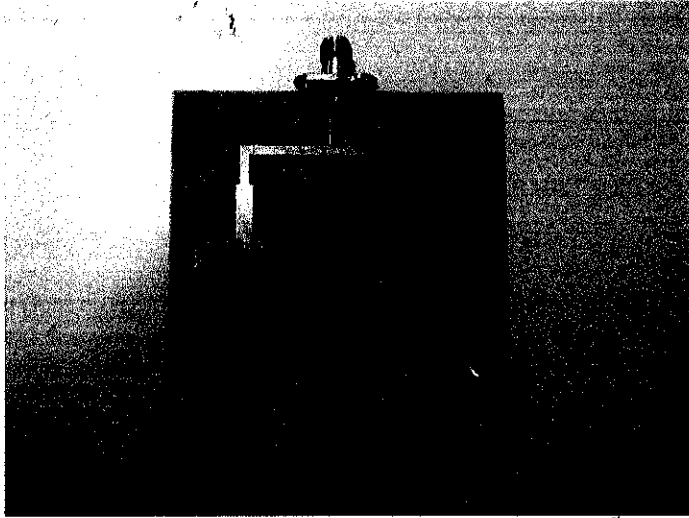
ดังนั้น

ที่ $Z_0 = 50$ จะได้ขนาด เท่ากับ $= 3.01$ มม.

ที่ $Z_0 = 70$ จะได้ขนาด เท่ากับ $= 1.62$ มม.

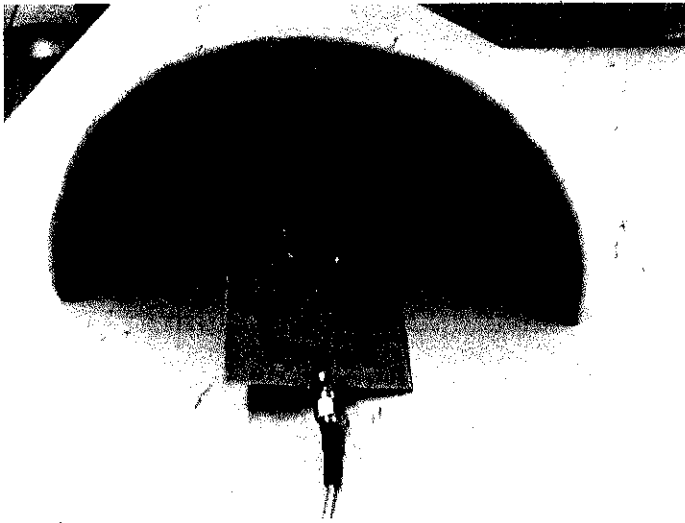
นอกจากใช้สูตรในการคำนวณแล้ว เรายังสามารถใช้โปรแกรม IE3D หาขนาดได้
 (ภาคผนวก ข.)

ดังนั้นจะได้ขนาดความกว้างของเส้นสตริปของตัวรวมสัญญาณดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ตัวรวมสัญญาณที่ได้จากการออกแบบเมื่อต่อเข้ากับหัวต่อแบบ SMA

เมื่อได้ตัวรวมสัญญาณตามที่ได้ออกแบบแล้ว ต่อปลายสายเข้ากับ connector หลังจากนั้น นำตัวรวมสัญญาณที่ได้ไปต่อเข้ากับสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบไว้แล้ว จะได้ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 สายอากาศไมโครสตริปเมื่อต่อเข้ากับตัวรวมสัญญาณ

4.4 สรุป

สำหรับการออกแบบสายเฟส เมื่อทำการหาจุดป้อนสัญญาณบนแผ่นทองแดง จะได้จุดป้อนสัญญาณที่ห่างจากจุดศูนย์กลางไปตามแกน X เป็นระยะ 16.5 มม. เพื่อให้ได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น 200 โอห์ม ความยาวสายที่ใช้ทำสายเฟสเท่ากับ 91.28 มม. ซึ่งได้จากการคำนวณในทางปฏิบัตินั้นเราสามารถตัดสายให้สั้นลงได้เพื่อการแมทซ์ของสาย เมื่อได้สายเฟสตามที่ได้ออกแบบไว้ แล้วทำการชิลด์ด้วยแผ่นทองแดง ต่อปลายสายเข้ากับขั้วต่อ หลังจากนั้นก็นำสายเฟสที่ได้ไปต่อเข้ากับสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบไว้แล้ว ส่วนการออกแบบตัวรวมสัญญาณ เมื่อทำการหาจุดป้อนสัญญาณ จะได้จุดป้อนสัญญาณที่ห่างจากจุดศูนย์กลางไปตามแกน X เป็นระยะ 10.5 มม. เพื่อให้ได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น 50 โอห์ม ในการออกแบบนี้ใช้การแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน และการหาขนาดโดยใช้ทรานสฟอร์มเมอร์ความยาวคลื่นส่วนสี่ จะได้ขนาดของเส้นสตริปที่ $Z_0 = 50 \Omega$ มีขนาดเท่ากับ 3.01 มม. และที่ $Z_0 = 70 \Omega$ จะได้ขนาดเท่ากับ 1.62 มม.

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 กล่าวนำ

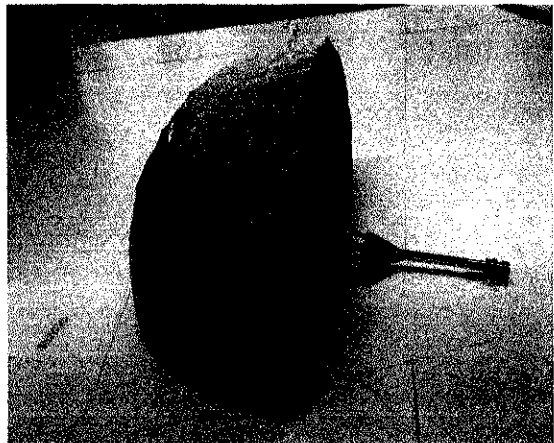
การทดลองสร้างสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนเสี้ยวของพื้นผิวโค้งทรงกลมที่ทำจากอะลูมิเนียม โดยมีตัวแผ่กระจายคลื่นเป็นแผ่นตัวนำทองแดงวางซ้อนกันอยู่บนแผ่นไดอิเล็กทริกชั้นสเตรตแบบโพมียัดหยุ่น ซึ่งมีค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก $\epsilon_r = 1.2$ แล้วนำไปติดตั้งบนผิวอะลูมิเนียม ซึ่งในบทนี้ จะเป็นการสร้างสายอากาศขึ้นมาโดยใช้ขนาดของส่วนต่างๆของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม IE3D แต่เพื่อยืนยันความถูกต้อง และให้สายอากาศสามารถนำไปใช้งานได้จริงนั้น จึงต้องมีการทดสอบเพื่อยืนยันผล ซึ่งการทดสอบนี้เป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โทรคมนาคม โดยมีขั้นตอนการออกแบบและทดสอบ พร้อมแสดงผลการทดสอบ

5.2 วิธีการทดลอง

การทดสอบสายอากาศ ก็คือ การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของสายอากาศ เนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศนั้นขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นเอง ในโครงการนี้ได้สร้างสายอากาศไมโครสตริปจำนวน 4 องค์ประกอบ โดยชุดแรกแถวลำดับแบบสายเฟส และชุดที่ 2 แถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณ ดังรูปที่ 5.1



(ก) แบบตัวรวมสัญญาณ



(ข) แบบสายเฟส

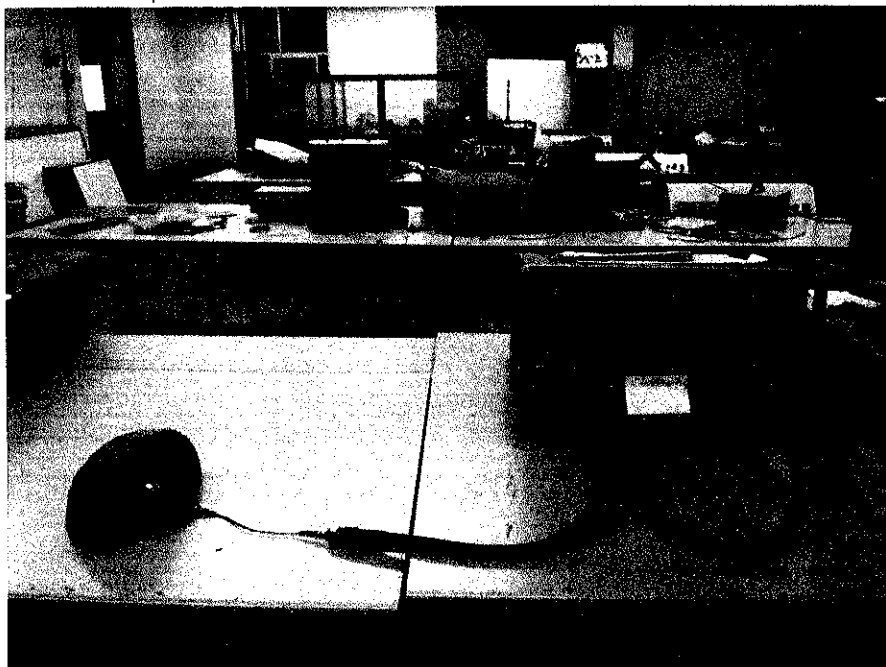
รูปที่ 5.1 แสดงสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ

5.2.1 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss)

ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ แสดงถึงประสิทธิภาพการส่งผ่าน ซึ่งแสดงได้ว่าถ้าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับน้อยๆจะยิ่งดี เนื่องจากจะมีประสิทธิภาพการส่งผ่านที่ดีนั่นเอง

ขั้นตอนการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

- 1) ทำการปรับเทียบ (Calibrate) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ที่ความถี่ตั้งแต่ 3 GHz ถึง 4 GHz
- 2) เลือกคำสั่งบันทึก เพื่อจะได้ไม่ต้องทำการตั้งค่านับเครื่องใหม่ เมื่อมาใช้งานตอนหลังอีก
- 3) ต่อสายอากาศไมโครสตริป เข้าที่ พอร์ต 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ดังรูปที่ 5.2
- 4) เปลี่ยน Format เป็น LOG MAG



รูปที่ 5.2 แสดงการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

5.2.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

อัตราส่วนคลื่นนิ่ง คืออัตราส่วนของค่าแรงดันไฟฟ้ามากที่สุดต่อค่าน้อยที่สุดที่ปรากฏบนสายนำสัญญาณ หรือแทนด้วยอัตราส่วนของ E_{\max} / E_{\min} เราเรียกว่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าคลื่นนิ่ง (Voltage-Standing Wave Ratio: VSWR) หรือใช้ SWR ก็ได้

ในทำนองเดียวกัน ค่ากระแสมากที่สุดต่อค่าน้อยที่สุด (I_{\max} / I_{\min}) ก็หาเช่นเดียวกับ VSWR โดยคิดจากกำลังคลื่นที่สะท้อนและส่วนมาหาโหลด

นอกจากนี้ค่า SWR ยังใช้บอกคุณสมบัติต่างๆ ของสายที่ไม่แมตช์ได้ด้วย หรือใช้บอกประสิทธิภาพของสายได้ โดยถ้าโหลดไม่มีค่ารีแอ็กแตนซ์อยู่เลย ค่า SWR จึงคิดได้จากอัตราส่วนระหว่างความต้านทานของโหลดกับอิมพีแดนซ์ประจำสาย

ขั้นตอนการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

- 1) ต่อสายอากาศไมโครสตริป เข้าที่พอร์ต 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ดังรูปที่ 5.2
- 2) ทำการเลือก Format แบบ SWR

5.2.3 อิมพีแดนซ์อินพุต

อิมพีแดนซ์อินพุตเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเป็นอันดับแรก เพราะว่าหากสายอากาศไม่แมตช์กับสายนำสัญญาณแล้ว สายอากาศก็ไม่สามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงๆ ได้ ดังนั้นสายอากาศ ที่สร้างจะต้องมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ หรือใกล้เคียง 50 โอห์ม มากที่สุด

ขั้นตอนการวัดค่าอิมพีแดนซ์

- 1) ต่อสายอากาศไมโครสตริป เข้าที่ พอร์ต 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ดังรูปที่ 5.2
- 2) ทำการเลือก Format แบบ Smith Chart

5.2.4 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายพลังงานออกไปตามฟังก์ชัน ของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับความสัมพันธ์ของกำลังงานที่ส่งออกไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การแผ่กระจายคลื่น” กับแบบรูปที่ใช้กับสายอากาศส่ง แต่ความจริงมันจะเป็นแบบรูปเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็นสายอากาศรับด้วยตามทฤษฎีบทภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem)

ถึงแม้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานเพียง 2 มิติก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้ การวัดในแต่ละมิติจะ

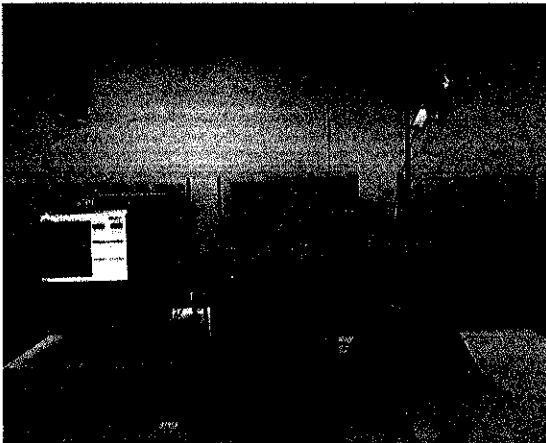
วัดในแต่ละระนาบที่ตั้งฉากกัน คือระนาบที่ขนานกับสนามไฟฟ้าและระนาบที่ขนานกับสนามแม่เหล็ก โดยเรียกว่า E-Plane และ H-Plane ตามลำดับ

การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ จะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) โดยสามารถคำนวณจากสมการ

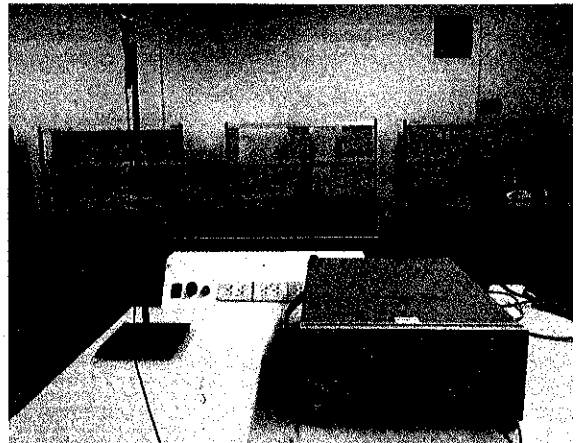
$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (5.1)$$

เมื่อ R คือ ระยะของสนามระยะไกล
D คือ ความยาวสูงสุดของสายอากาศ
 λ คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ

ขั้นตอนการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน



(ก) การติดตั้งสายอากาศภาครับ

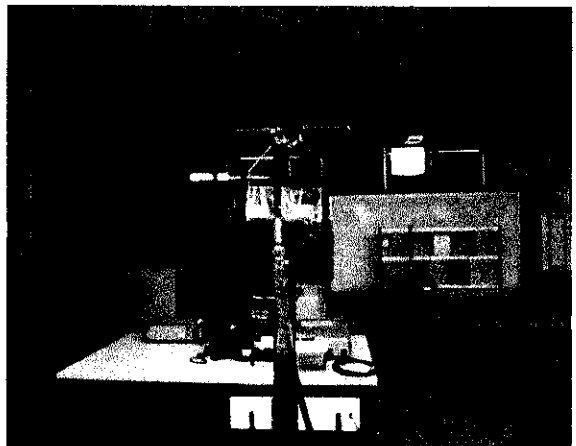
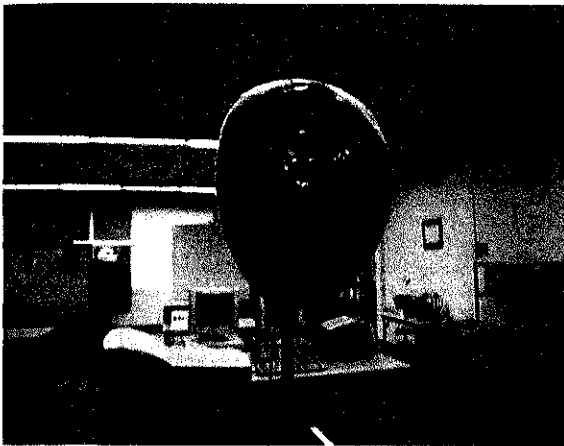


(ข) การติดตั้งสายอากาศภาคส่ง

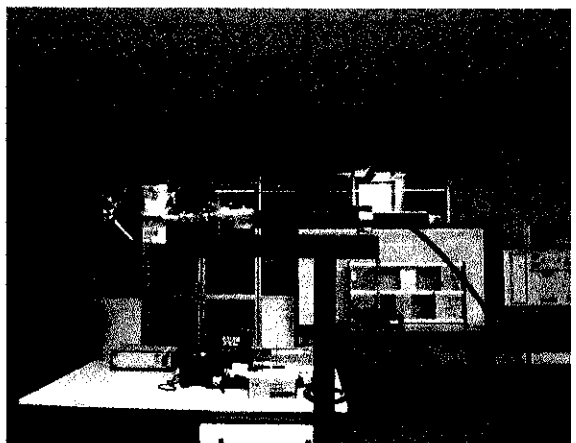
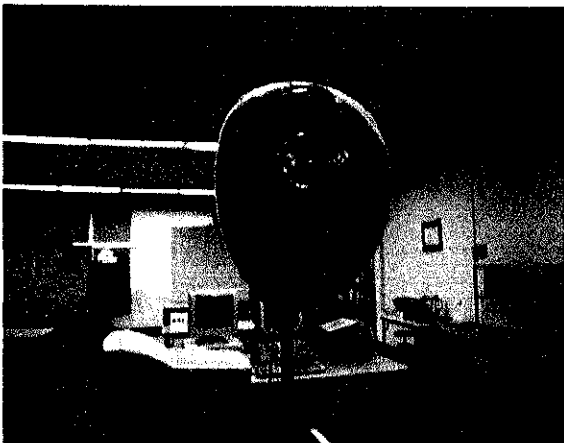
รูปที่ 5.3 แสดงการติดตั้งสายอากาศเข้ากับอุปกรณ์วัด

- 1) ทำการตั้งค่าบนเครื่องกำเนิดความถี่ (Frequency Generator) ดังนี้ Power Level: 5 dBm, Center Frequency: 3.5 GHz
- 2) ทำการมอดูเลต (Modulate) แบบ AM ด้วยความถี่ 1 kHz
- 3) สายอากาศโคโพลเป็นสายอากาศภาคส่ง ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดความถี่ ดังรูปที่ 5.3(ข)
- 4) สายอากาศที่ทำกรทดสอบในภาครับ ต่อเข้ากับ Antenna Positioner ดังรูปที่ 5.3(ก)

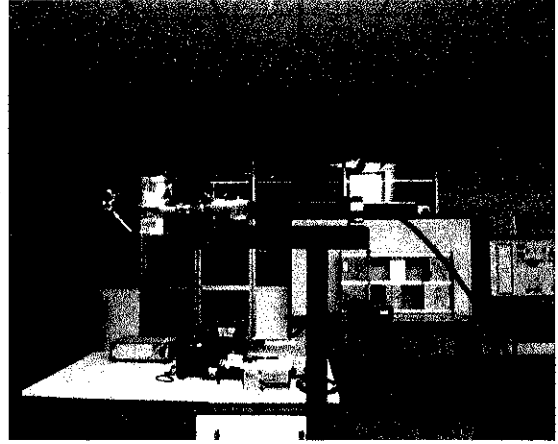
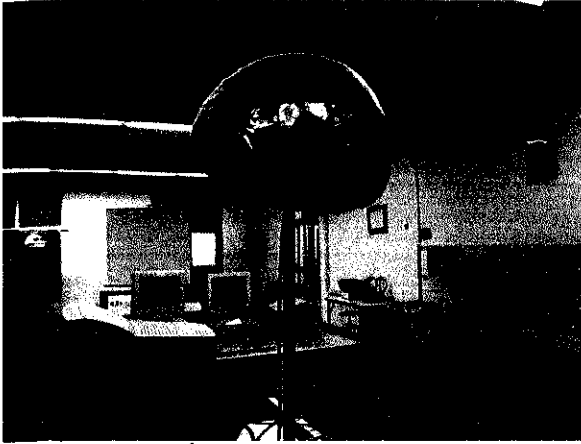
โดยการทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปในโครงการนี้ ใช้สายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศไมโครสตริปในภาครับ และทำการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็ก ในการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานนั้น จะต้องทำการหมุนสายอากาศรอบตัว 360 องศา โดยให้สายอากาศภาคส่งอยู่นิ่ง และเพื่อทดสอบว่าสายอากาศสามารถให้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานได้ทั้ง Vertical และ Horizontal จึงต้องมีการปรับการวางตัวของสายอากาศไดโพล ทั้งสองแบบด้วย ดังรูปที่ 5.2-5.5



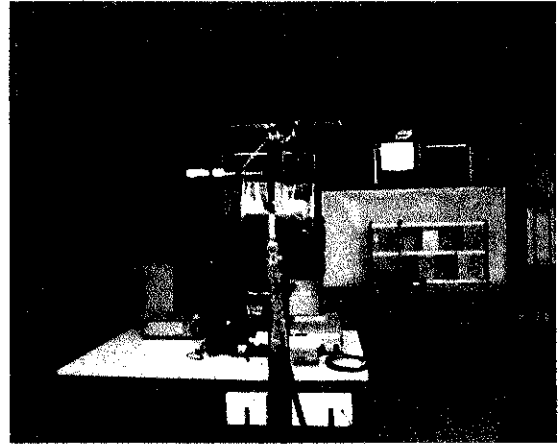
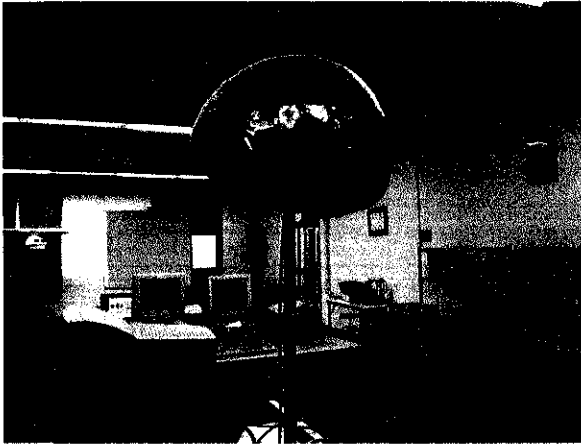
รูปที่ 5.4 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
โดยให้สายอากาศไดโพลวางตัวขนานกับพื้น



รูปที่ 5.5 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าแบบไขว้
โดยให้สายอากาศไดโพลวางตัวตั้งฉากกับพื้น



รูปที่ 5.6 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก
โดยให้สายอากาศโคโพลวาทตั้งฉากกับพื้น



รูปที่ 5.7 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กแบบไขว้
โดยให้สายอากาศโคโพลวาทตั้งขนานกับพื้น

5.2.5 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth)

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง คือ “ในระนาบหนึ่งๆ ที่มีทิศทางที่มีการแผ่คลื่นสูงสุดและมีมุมซึ่งอยู่ระหว่างสองทิศทาง ซึ่งความเข้มของการแผ่กำลังงานมีค่ากำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุดของมัน” และคำว่า ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง มักจะใช้อธิบายถึงความกว้างของลำคลื่นที่มีค่าลดลง 3 dB (3-dB Beamwidth) จากตำแหน่งที่มีทิศทางของการแผ่กระจายคลื่นสูงสุดเสมอ

นอกจากนี้ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศยังถูกนำมาใช้ในการอธิบายถึงความสามารถในการแยกแยะ (Resolution Capacity) ของสายอากาศ เพื่อแยกแยะระหว่างแหล่งกำเนิดสองตัวซึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความกว้างลำคลื่นซึ่งมีค่าเป็นศูนย์จุดแรก (First Null Beamwidth: FNBW/2)

ซึ่งมักจะนำไปใช้ในการประมาณค่าของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) นั่นคือแหล่งกำเนิดสองจุด ที่แยกออกจากกันด้วยระยะเชิงมุมเท่ากับหรือมากกว่า $FNBW/2 \cong HPBW$

5.2.6 อัตราขยาย

ค่านี้ไม่ใช่ค่าอัตราส่วนระหว่างพลังงานเอาต์พุตต่ออินพุต แต่เป็นอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้วัดคุณสมบัติไดเรกทิวิตี และสามารถระบุถึงปริมาณของการแผ่คลื่นที่มีมากในทิศทางใด

การคิดค่าอัตราขยายของสายอากาศจะวัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิง

โดยอัตราขยายของสายส่งคือ กำลังสองของค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศที่มีการแผ่คลื่นมากที่สุด เทียบกับค่าความเข้มสนามที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิง หรืออาจแสดงในรูปอัตราส่วนของค่าพลังงานที่ต้องใช้ส่งของสายอากาศทั้งสองเพื่อให้เกิดความเข้มสนามขนาดเท่ากัน (ณ จุดเดียวกัน) ในทิศทางที่มีการแผ่คลื่นมากที่สุด หรืออัตราขยายของสายรับคือ อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มสนามของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

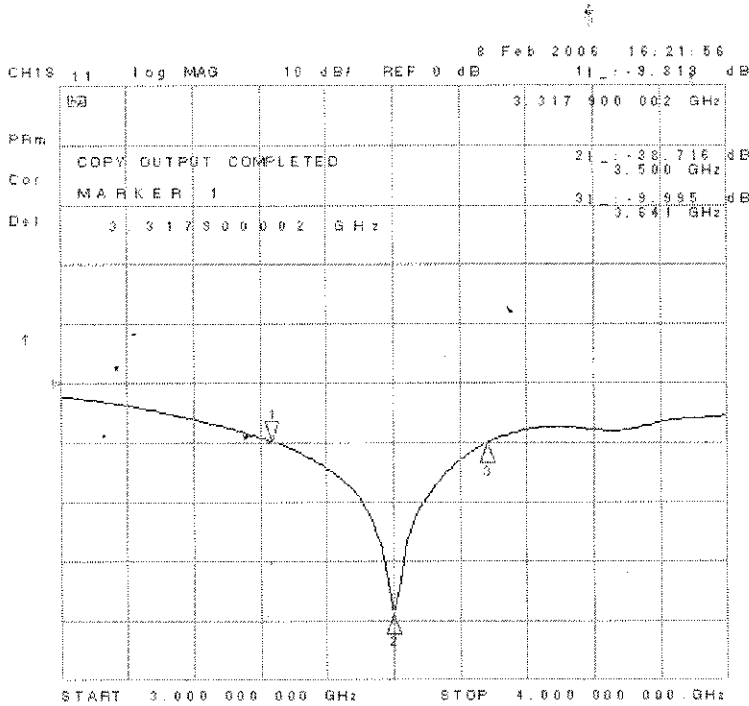
ขั้นตอนการวัดอัตราขยาย

- 1) ทำการตั้งค่าบนเครื่องกำเนิดความถี่ ดังนี้ Power Level: 5 dBm, Center Frequency: 3.5 GHz
- 2) ทำการมอดูเลตแบบ AM ด้วยความถี่ 1 kHz
- 3) ต่อสายอากาศไดโพลตัวที่ 1 เข้ากับเครื่องกำเนิดความถี่ และต่อสายอากาศไดโพลตัวที่ 2 เข้ากับเครื่องวัดสเปกตรัม (Spectrum Analyzer) เพื่อวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศไดโพล
- 4) ต่อสายอากาศไดโพลที่ทราบอัตราขยายเป็นสายอากาศภาคส่ง เข้ากับเครื่องกำเนิดความถี่
- 5) ต่อสายอากาศไมโครสตริปที่ทำการทดสอบในภาครับเข้ากับเครื่องวัดสเปกตรัม
- 6) ทำการวัดค่ากำลังงานของตัวรับและตัวส่งเพื่อนำไปคำนวณหาค่าอัตราขยาย

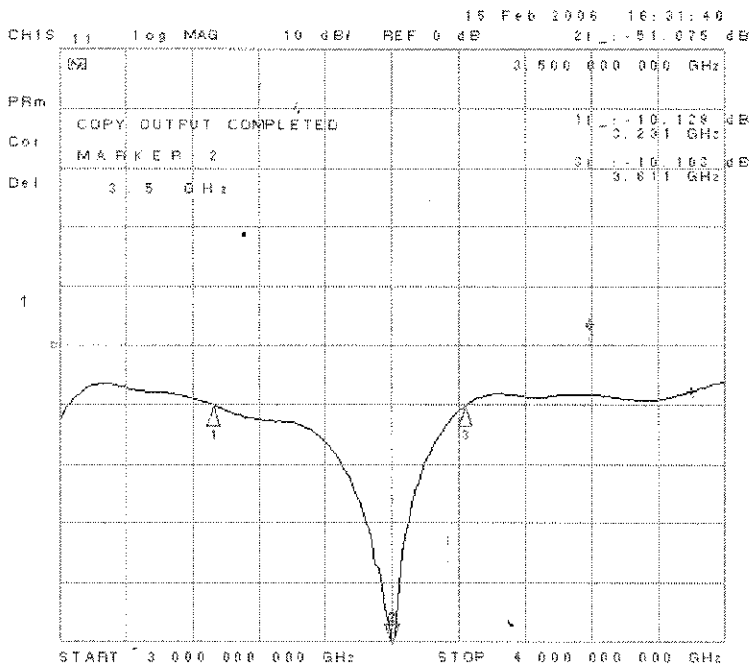
5.3 ผลการทดลอง

5.3.1 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

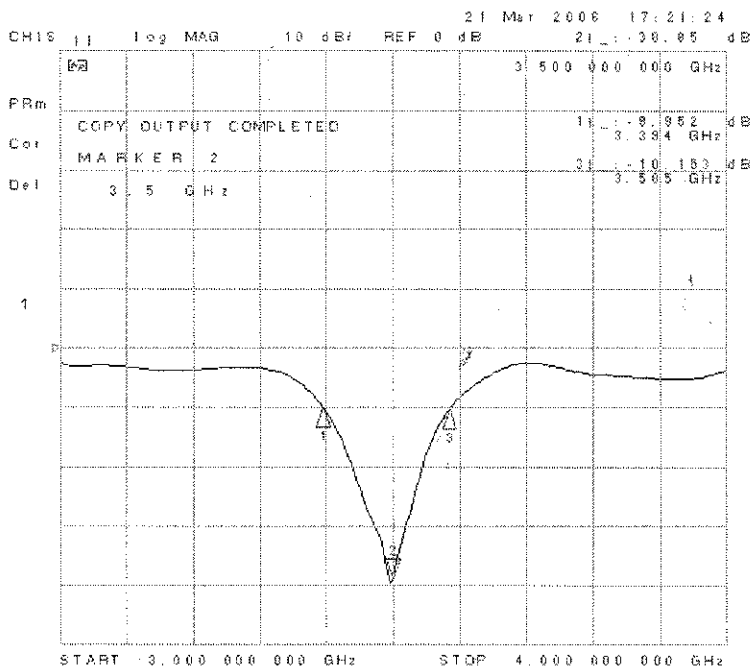
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ แสดงถึงประสิทธิภาพการส่งผ่านของคลื่น ซึ่งแสดงได้ว่า ถ้าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับน้อยๆ จะยิ่งดี เนื่องจากจะมีประสิทธิภาพการส่งผ่านที่ดีและไม่มีคลื่นสะท้อนกลับไปยังเครื่องส่งซึ่งทำให้เครื่องส่งเสียหายได้



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ
ของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศ ไมโครสตริปแถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณ

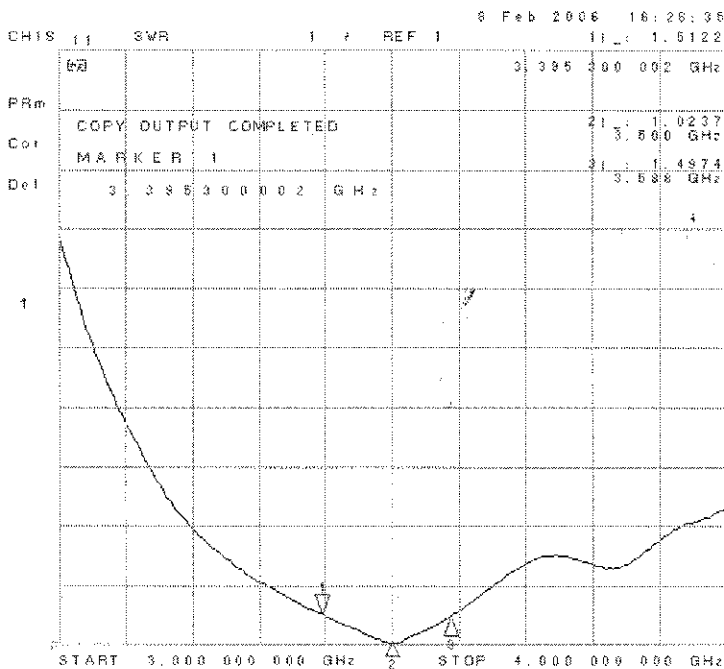


รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบสายเฟส

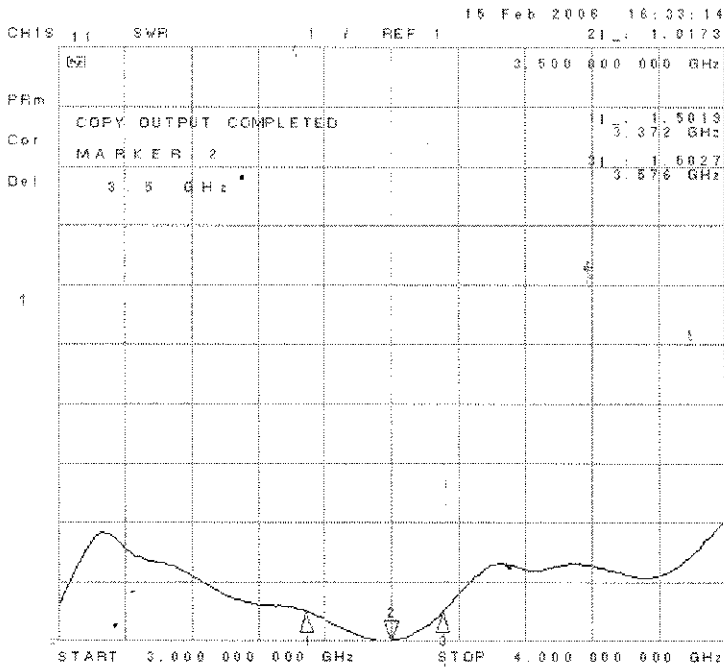
จากรูปที่ 5.8 เป็นการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบองค์ประกอบเดียวได้ -38.716 dB ซึ่งมีความกว้างแถบของสายอากาศเท่ากับ 314 MHz โดยค่าความกว้างแถบของสายอากาศนี้วัดได้โดยที่ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต้องไม่เกิน -10 dB ซึ่งมาตรฐานของ Wireless LAN ได้กำหนดให้มีความกว้างแถบเท่ากับ 83.5 MHz รูปที่ 5.9 เป็นการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปที่แวลวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณมีค่า -51.075 dB ซึ่งมีความกว้างแถบของสายอากาศเท่ากับ 380 MHz จากรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบแวลวลำดับมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่น้อยกว่าและความกว้างแถบที่กว้างกว่าสายอากาศองค์ประกอบเดียว ส่วนรูปที่ 5.10 เป็นการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปที่แวลวลำดับแบบสายเฟสมีค่า -38.85 dB และมีความกว้างแถบของสายอากาศเท่ากับ 199 MHz

5.3.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

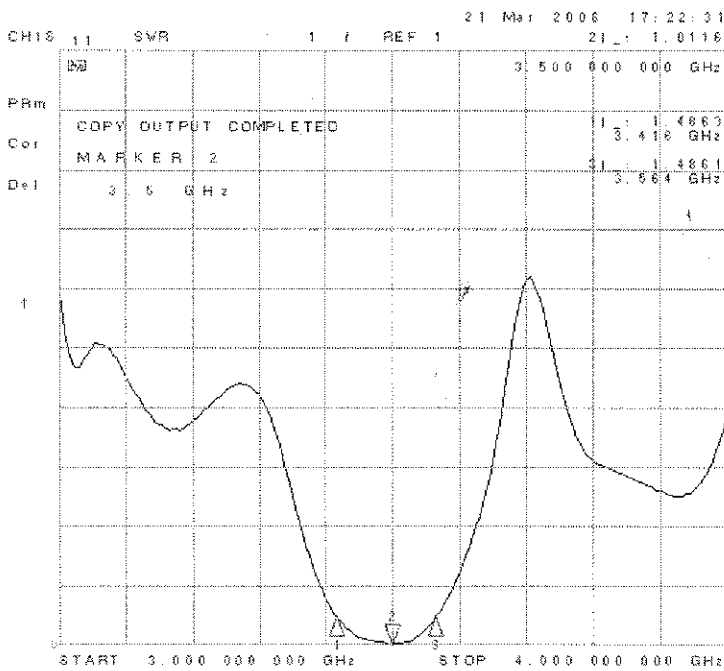
ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ หมายถึง ช่วงความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้ดีในสายอากาศไมโครสตริป คุณสมบัติที่จำเป็นต้องพิจารณา คือ สายอากาศจะต้องแมตช์อย่างดี ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต้องไม่เกิน 1.5



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ
ไมโครสตริปแฉวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณ

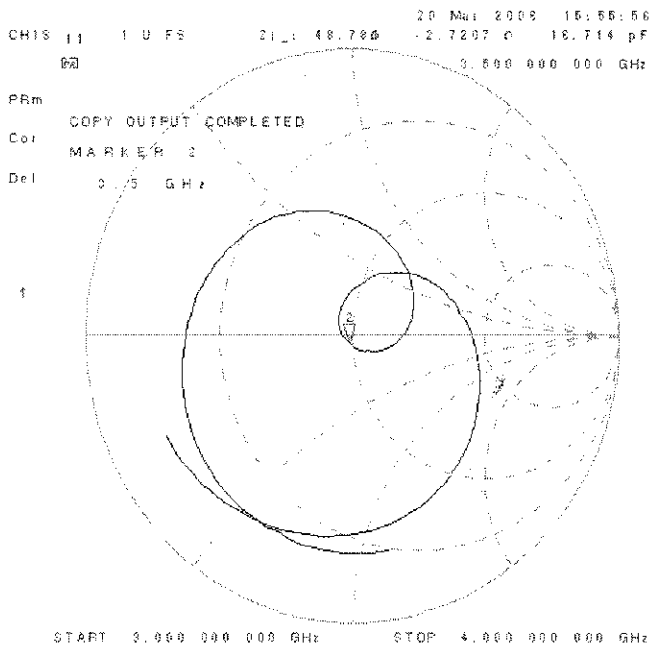


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ
ไมโครสตริปแฉวลำดับแบบสายเฟส

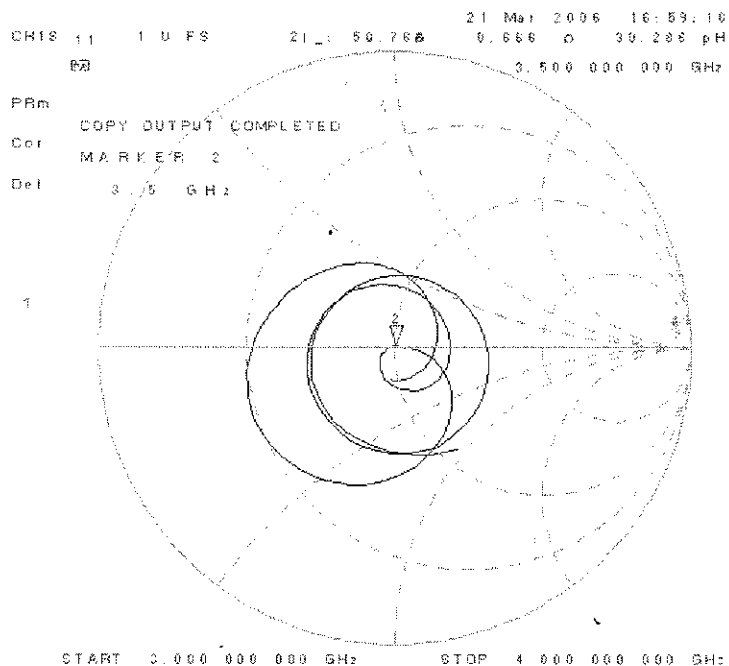
จากรูปที่ 5.11 เป็นการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบองค์ประกอบเดียวได้ 1.0237 โดยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ค่านั้นต้องไม่เกิน 1.5 ส่วน รูปที่ 5.12 เป็นการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปที่แถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณมีค่า 1.0173 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบแถวลำดับมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่น้อยกว่าสายอากาศอิมพีแดนซ์เดี่ยว นั่นก็แสดงว่า สายอากาศไมโครสตริปที่แถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณมีประสิทธิภาพดีกว่าสายอากาศองค์ประกอบเดียว ส่วนรูปที่ 5.13 เป็นการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปที่แถวลำดับแบบสายเฟสมีค่า 1.0116

5.3.3 อิมพีแดนซ์อินพุต

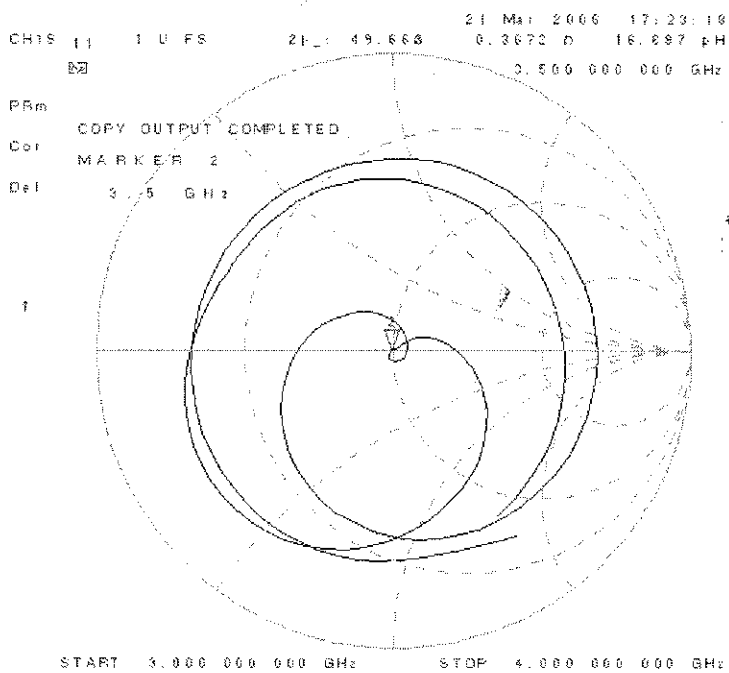
อิมพีแดนซ์อินพุตเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเป็นอันดับแรก เพราะว่าหากสายอากาศไม่แมตช์กับสายนำสัญญาณแล้ว สายอากาศก็ไม่สามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงๆ ได้ ดังนั้นสายอากาศที่สร้างจะต้องมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ หรือใกล้เคียง 50 โอห์ม มากที่สุด



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป
 แถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณ



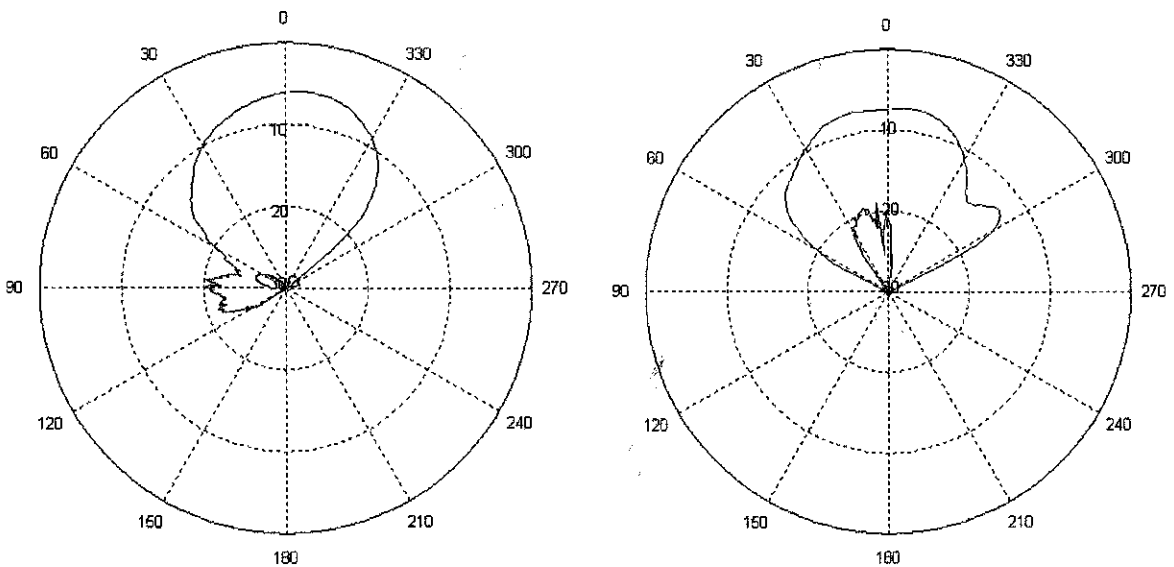
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป
 แถวลำดับแบบสายเฟส

จากรูปที่ 5.14 แสดงแผนภาพสมิธของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว พบว่าสายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz เท่ากับ $48.55 - j222.66 \text{ m}\Omega$ รูปที่ 5.15 แสดงแผนภาพสมิธของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณ พบว่าสายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz เท่ากับ $50.76 + j0.666 \Omega$ และรูปที่ 5.16 แสดงแผนภาพสมิธของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบสายเฟส พบว่าสายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz เท่ากับ $49.66 + j0.3672 \Omega$ ซึ่งสายอากาศทั้งสายนี้มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50Ω มาก

5.3.4 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามทั้งสองแบบไขว้ จะแสดงให้เห็นดังนี้

- สายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวนิเวระนาบเรียบ



(ก) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามไฟฟ้า (E-Plane)

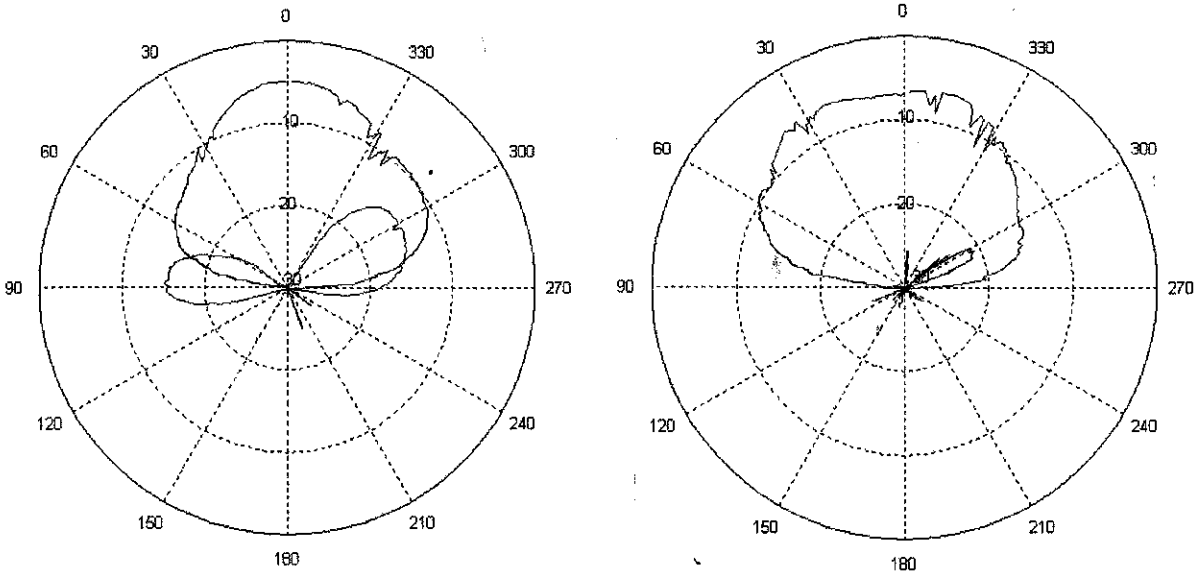
(ข) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-Plane)

_____ E-Plane
 _____ Cross-Polarize

_____ H-Plane
 _____ Cross-Polarize

รูปที่ 5.17 กราฟแสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวนิเวระนาบเรียบ

- สายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม



(ก) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามไฟฟ้า (E-Plane)

(ข) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-Plane)

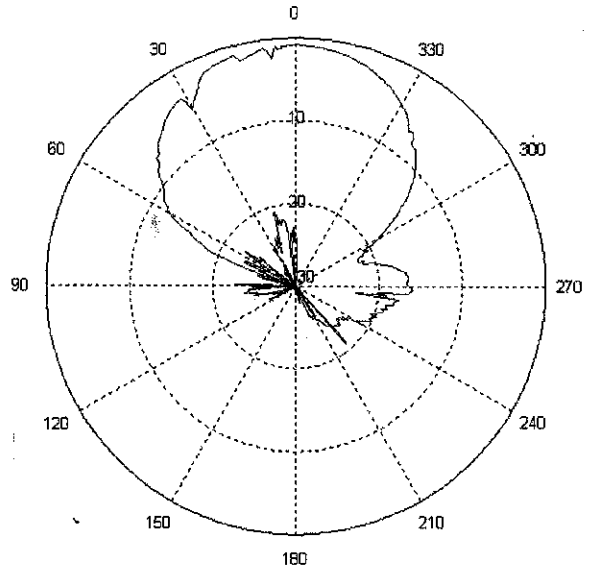
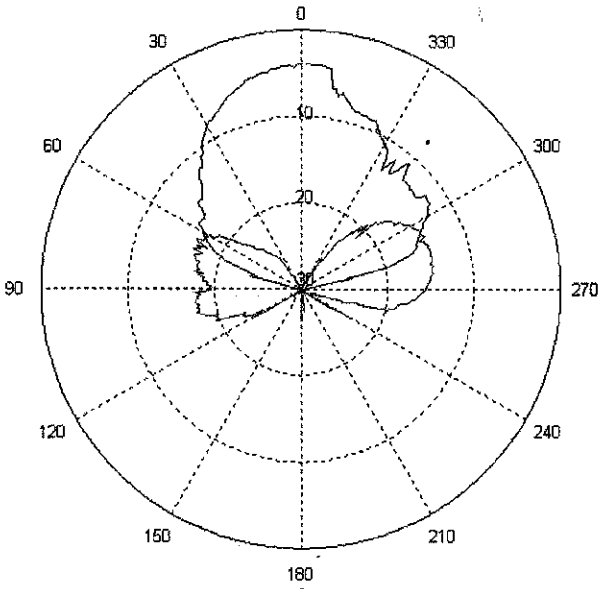
_____ E-Plane
 _____ Cross-Polarize

_____ H-Plane
 _____ Cross-Polarize

รูปที่ 5.18 กราฟแสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม

จากรูปที่ 5.17 และรูปที่ 5.18 แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวบนผิวระนาบเรียบและบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลมตามลำดับ (ก) แสดงในระนาบของสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับการโพลาไรซ์แบบไขว้ และ(ข) ในระนาบของสนามแม่เหล็กเปรียบเทียบกับการโพลาไรซ์แบบไขว้ โดยมีการจัดอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 5.4, 5.5, 5.6, และ 5.7 ตามลำดับ ทั้งสองรูปให้ผลที่มีลักษณะคล้ายกัน คือมีลักษณะเกือบเป็นครึ่งวงกลม นั่นคือสายอากาศสามารถแผ่กระจายคลื่นออกมาได้ในทิศทางหน้า แต่ด้านหลังของสายอากาศจะให้การแผ่กระจายน้อยมากหรือเกือบไม่มีเมื่อเทียบกับด้านหน้าของสายอากาศ จากรูป สังเกตตั้งแต่มุม 90-270 องศา สายอากาศสามารถแผ่กระจายได้น้อยมาก และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 5.17 กับ 5.18 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลมมีความกว้างลำคลื่นกว้างกว่าของสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวบนผิวระนาบเรียบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลมมีประสิทธิภาพมากกว่าบนผิวระนาบเรียบ

- สายอากาศแถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณ



(ก) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานใน
ระนาบของสนามไฟฟ้า (E-Plane)

_____ E-Plane
_____ Cross-Polarize

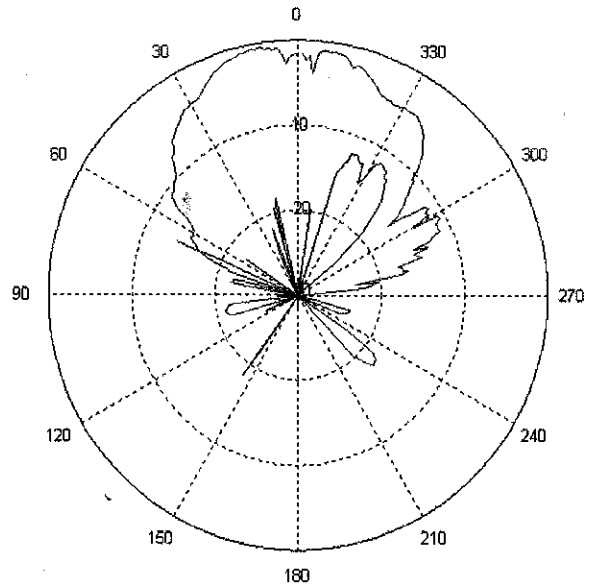
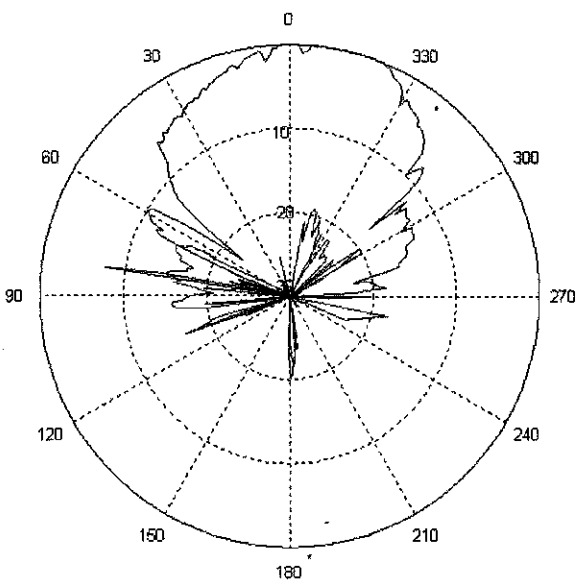
(ข) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานใน
ระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-Plane)

_____ H-Plane
_____ Cross-Polarize

รูปที่ 5.19 กราฟแสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ
ไมโครสตริปแถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณ

จากรูปที่ 5.18 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณ (ก) ในระนาบของสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับกรโพลาริซ์แบบไขว้ และ(ข) ในระนาบของสนามแม่เหล็กเปรียบเทียบกับกรโพลาริซ์แบบไขว้ สำหรับรูป (ก) นั้นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามไฟฟ้าจะมีการแผ่กระจายกำลังงานทางด้านหลังของสายอากาศน้อยกว่าในระนาบของสนามแม่เหล็ก

- สายอากาศแถวลำดับแบบสายเฟส



(ก) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานใน
ระนาบของสนามไฟฟ้า (E-Plane)

(ข) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานใน
ระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-Plane)

_____ E-Plane

_____ H-Plane

_____ Cross-Polarize

_____ Cross-Polarize

รูปที่ 5.20 กราฟแสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ
ไมโครสตริปแถวลำดับแบบสายเฟส

จากรูป 5.18, 5.19 และ 5.20 จะเห็นได้ว่า แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากมีความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) แคบที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้มีอัตราขยายมากที่สุดเช่นกัน รองลงมาคือ สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบสายเฟส เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วเห็นได้ชัดเจนว่าสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับมีประสิทธิภาพมากกว่าสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียว

5.3.5 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

จากรูปที่ 5.17 เมื่อทำการหาความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามไฟฟ้าสำหรับสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวบนผิวระนาบเรียบตามรูป (ก) จะได้เท่ากับ 55° และของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามแม่เหล็กตามรูป (ข) จะได้เท่ากับ 60° ส่วนความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน

ในระนาบของสนามไฟฟ้าสำหรับสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดี่ยวบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลมตามรูปที่ 5.18 (ก) จะได้เท่ากับ 52° และของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามแม่เหล็กตามรูปที่ 5.18 (ข) จะได้เท่ากับ 78° โดยเราจะทำการเปรียบเทียบความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดี่ยวบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลมมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมากกว่า นั่นคือ สายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดี่ยวที่ทำการติดตั้งบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลมจะมีประสิทธิภาพมากกว่าสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดี่ยวที่ทำการติดตั้งบนผิวระนาบเรียบอย่างเห็นได้ชัด

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศองค์ประกอบเดียวกับสายอากาศแฉวลำดับบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม จากรูปที่ 5.19 (ก) จะได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปแฉวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณเท่ากับ 37° และในระนาบสนามแม่เหล็กตามรูปที่ 5.19 (ข) ได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 54° จะเห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปแฉวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังน้อยกว่าสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวทั้งในระนาบของสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็ก นั่นคือ มีอัตราการขยายมากกว่าและมีสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีกว่า และจากรูปที่ 5.20 (ก) สายอากาศไมโครสตริปแฉวลำดับแบบสายเฟสมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบของสนามไฟฟ้าเท่ากับ 48° ส่วนแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 5.20 (ข) จะมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 47° จะเห็นได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปแฉวลำดับแบบสายเฟสมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังน้อยกว่าสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลมด้วยเช่นกัน นั่นก็แสดงให้เห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปแฉวลำดับทั้งสองแบบมีประสิทธิภาพมากกว่าสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม

5.3.6 อัตราการขยาย

การวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน วิธีที่ง่ายที่สุด ก็คือวิธีที่เรียกว่า วิธีแบบใช้สายอากาศอ้างอิง (Reference Antenna Method) หรือ วิธีการเปรียบเทียบ (Comparison Method) หรือวิธีการแทนที่ (Substitution Method) ซึ่งสามารถหาได้โดยการเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้รับด้วยสายอากาศอ้างอิง (P_{ref}) กับกำลังงานที่รับได้จากสายอากาศที่ทำการทดสอบ (P_{test}) ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ต้องการทราบจะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$G_{test} = \frac{P_{test}}{P_{ref}} G_{ref} \quad (4.13)$$

เมื่อต้องการคำตอบ ให้มีหน่วยเป็น dB ก็จะหาได้จากสมการ

$$G_{test} (dB) = P_{test} (dB) - P_{ref} (dB) + G_{ref} (dB) \quad (4.14)$$

ก่อนที่จะนำวิธีการแทนที่มาใช้ นั่น เราจะต้องเปรียบเทียบเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ในการอ้างอิงเสียก่อน โดยการใส่สายอากาศสองตัวที่เหมือนกันทุกประการมาเป็นสายอากาศรับและส่ง จากนั้นวัดค่ากำลังงานที่ส่งออกไปและค่าของกำลังงานที่รับได้ นำมาคำนวณหาค่าอัตราขยาย ซึ่งจะเป็นอัตราขยายของสายอากาศอ้างอิง ดังสมการ

$$G = \frac{4\pi r}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{rec}}{P_0}} \quad (4.15)$$

เมื่อ G คือ ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่จะใช้เป็นตัวอ้างอิง

r คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศทั้งสอง

P_{rec} และ P_0 คือ กำลังงานที่รับได้และกำลังงานที่ส่งออกไป ตามลำดับ

λ คือ ความยาวคลื่นในอากาศ (หน่วยเดียวกันกับระยะทาง)

สำหรับการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริป ทำการวัดทดสอบโดยใช้สายอากาศไดโพล เป็นสายอากาศอ้างอิง ค่าที่ได้จึงมีหน่วยเป็นเดซิเบลไดโพล (dBd)

สำหรับอัตราการขยายที่วัดได้มีดังนี้

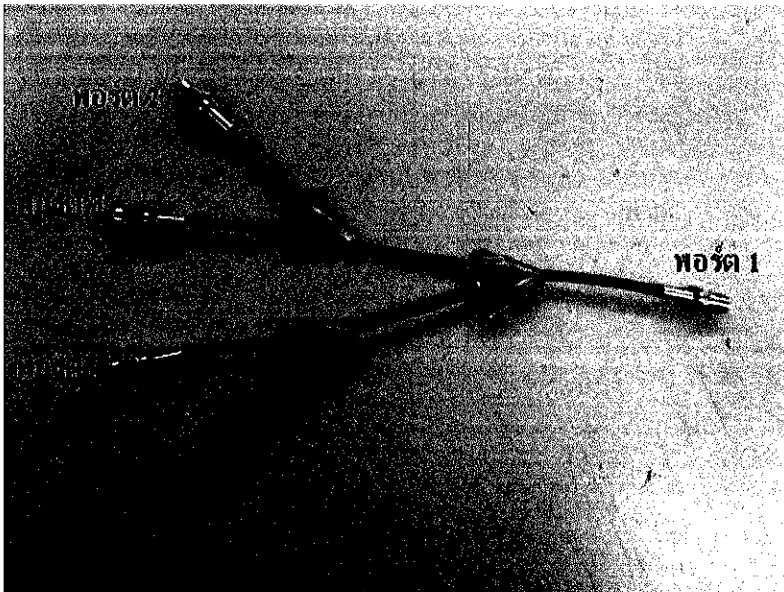
ชนิดของสายอากาศ	อัตราขยาย (dBd)
ไดโพลอ้างอิง	1
ไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวบนผิวระนาบเรียบ	2.5
ไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวบนผิวโค้ง	3
ไมโครสตริปแถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณ	5
ไมโครสตริปแถวลำดับแบบสายเฟส	4

จากค่าอัตราขยายที่วัดได้ จะเห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบตัวรวมสัญญาณมีค่าอัตราขยายมากที่สุดเท่ากับ 5 รองลงมาคือ สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบสายเฟสมีค่า

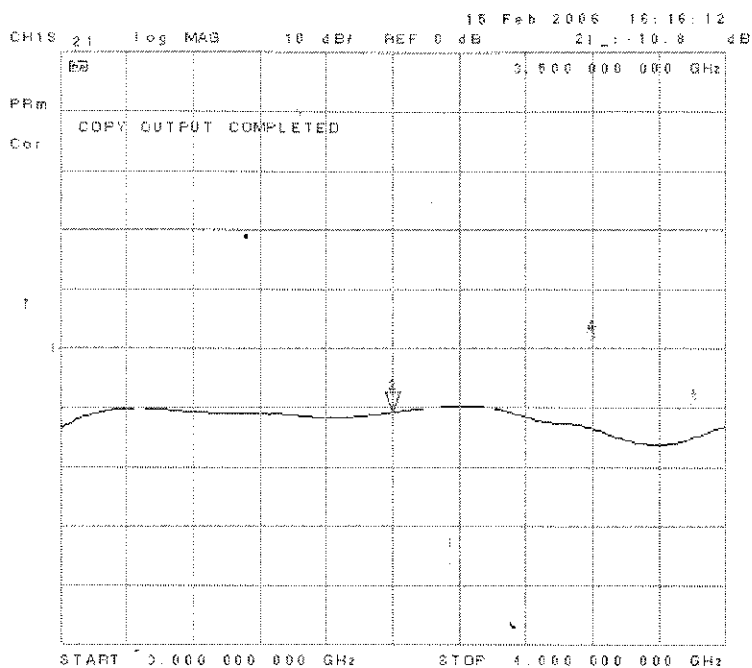
อัตราขยายเท่ากับ 4 ส่วนสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 3 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศไมโครสตริป 4 องค์ประกอบจะให้ค่าอัตราขยายมากกว่าสายอากาศไมโครสตริปองค์ประกอบเดียวเท่ากับ 2 dBd

5.4 ผลการทดลองการสูญเสียภายใน

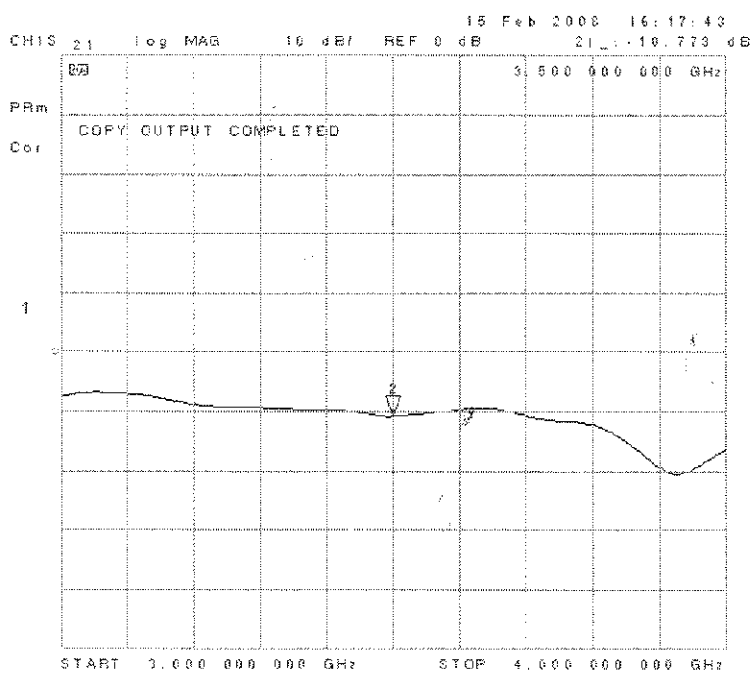
5.4.1 ผลการทดลองจากการออกแบบสายเฟส



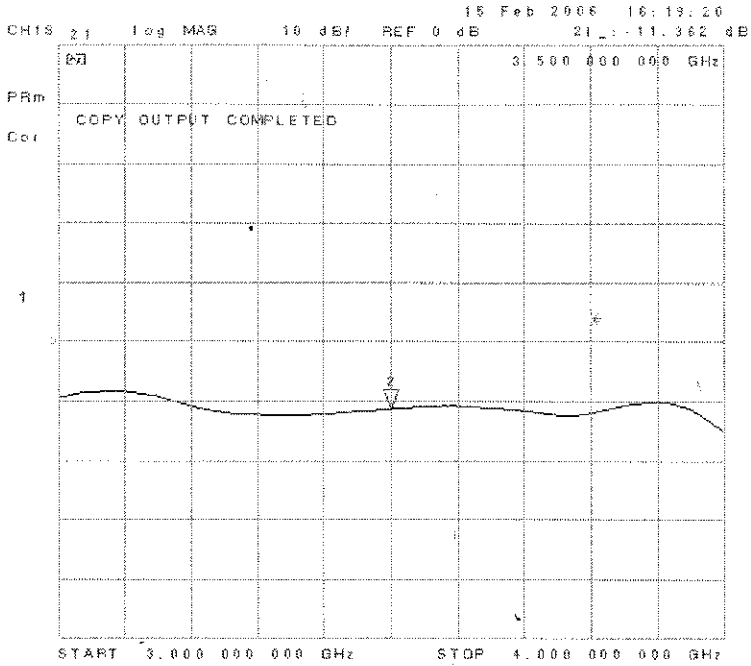
รูปที่ 5.21 แสดงพอร์ตของสายเฟส โดย พอร์ต 1 ของสายเฟส
คือ เอ้าท์พุท ส่วนพอร์ต 2, 3, 4, 5 คือ อินพุท



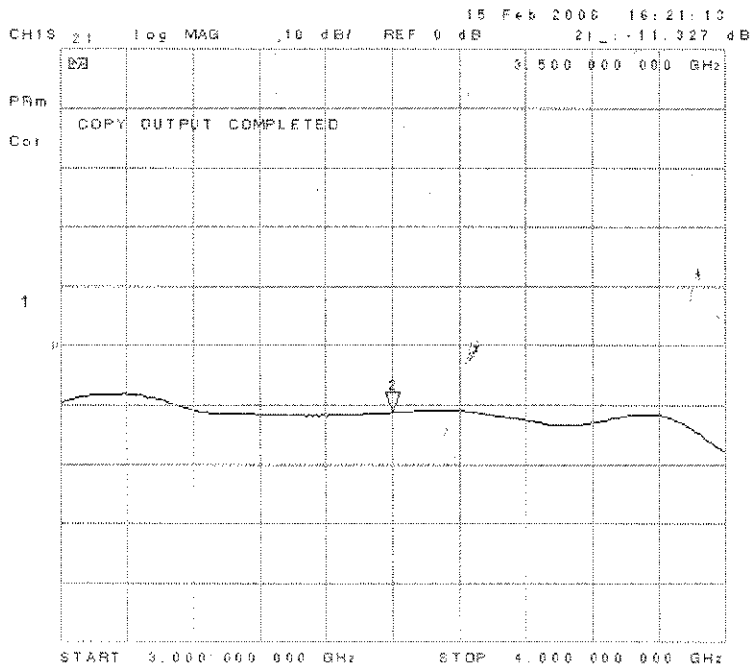
รูปที่ 5.22 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 1 ของสายเฟส



รูปที่ 5.23 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 2 ของสายเฟส



รูปที่ 5.24 แสดงค่าการสูญเสียสัญญาณภายในพอร์ต 3 ของสายเฟส



รูปที่ 5.25 แสดงค่าการสูญเสียสัญญาณภายในพอร์ต 4 ของสายเฟส

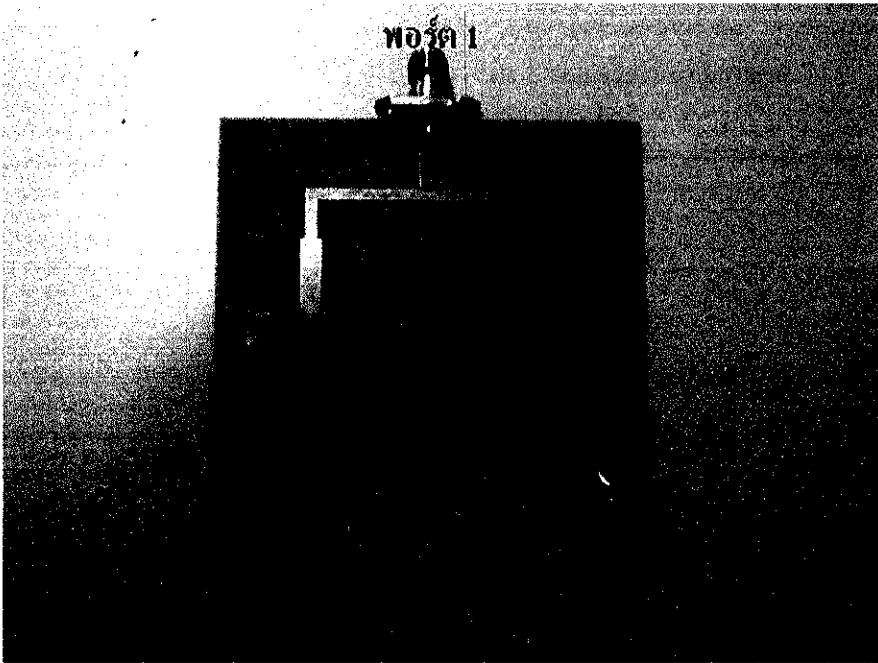
เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ที่ใช้วัดการสูญเสียภายในสาย จ่ายกำลังออกไปเท่ากับ -15 dBm หรือ -45 dB จากรูปที่ 5.22-5.25 ทั้ง 4 พอร์ตมีการสูญเสียรวมกัน

$$(-10.8\text{dB})+(-10.773\text{ dB})+(-11.362\text{ dB})+(-11.327\text{dB})= -44.262\text{ dB}$$

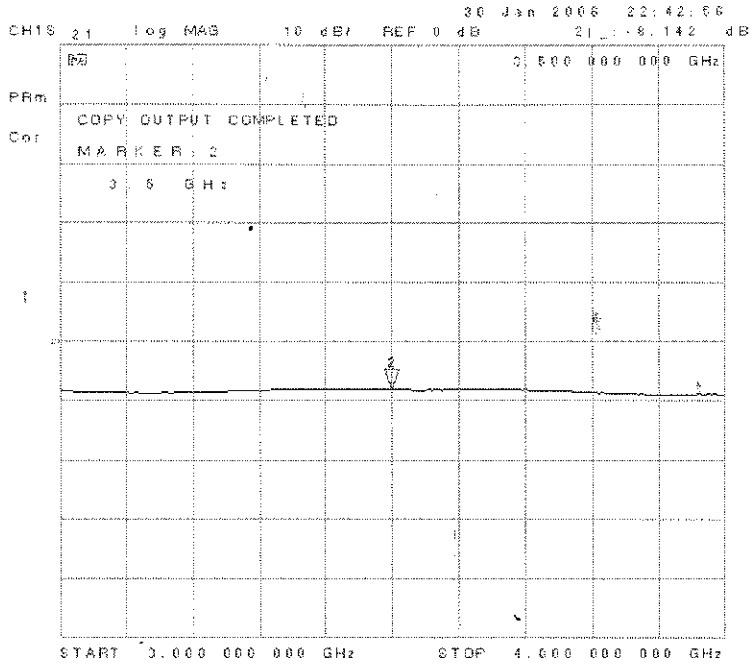
ดังนั้นจะสามารถหาการสูญเสียภายในสายเฟสได้โดยนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ได้เท่ากับ $-45\text{ dB} - (-44.262\text{ dB}) = -0.738\text{ dB}$

จะเห็นได้ว่าสายเฟสมีการสูญเสียภายในสายน้อยแสดงว่ามีประสิทธิภาพพอเหมาะที่จะเป็นสายนำสัญญาณ

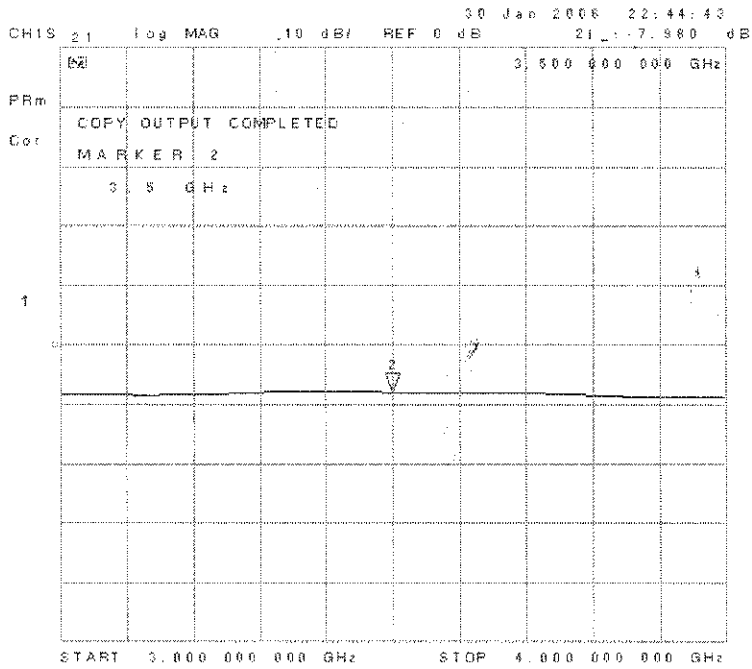
5.4.2 ผลการทดลองจากการออกแบบตัวรวมสัญญาณ



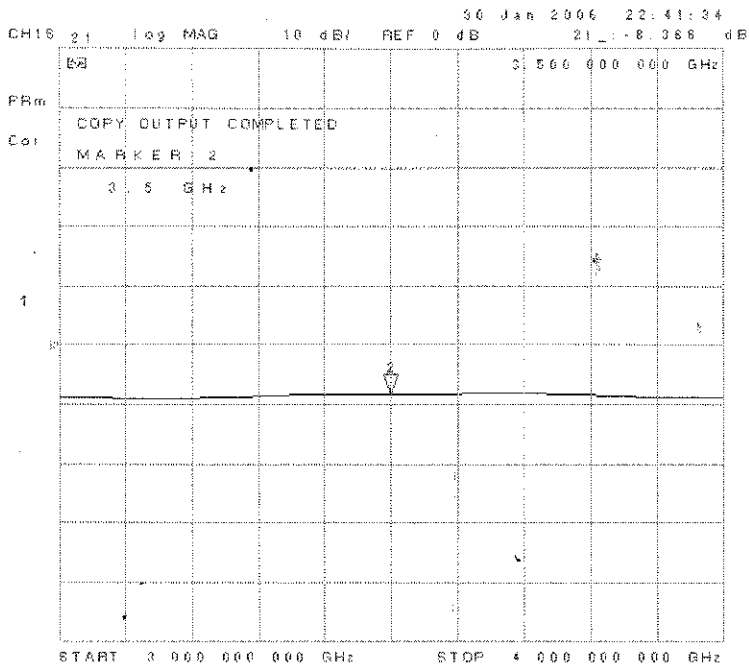
รูปที่ 5.26 แสดงพอร์ตของตัวรวมสัญญาณ



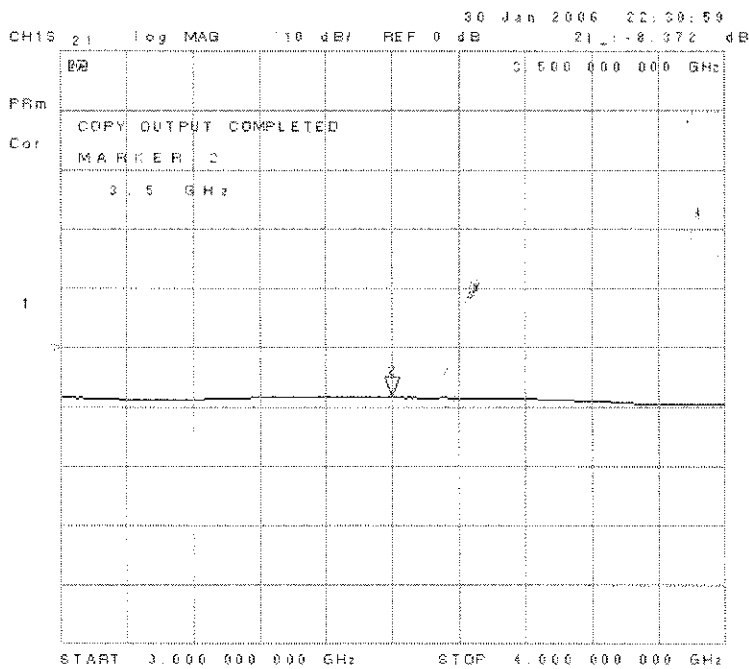
รูปที่ 5.27 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 1 ของตัวรวมสัญญาณ



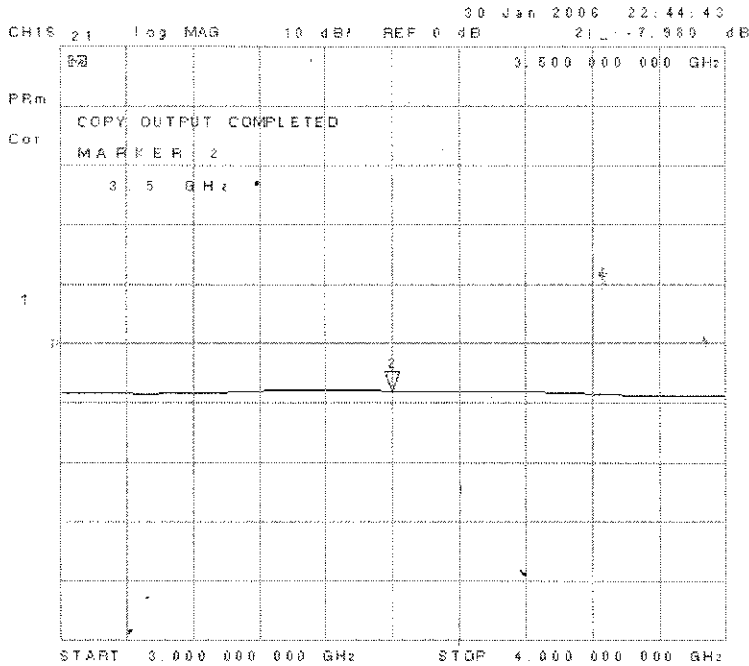
รูปที่ 5.28 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 2 ของตัวรวมสัญญาณ



รูปที่ 5.29 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 3 ของตัวรวมสัญญาณ



รูปที่ 5.30 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 4 ของตัวรวมสัญญาณ



รูปที่ 5.31 แสดงค่าการสูญเสียภายในพอร์ต 5 ของตัวรวมสัญญาณ

จากรูป 5.27-5.31 จะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียภายในแต่ละพอร์ตของตัวรวมสัญญาณมีค่าไม่เกิน -10 dB ตรงตามทฤษฎี คือการแบ่งกำลังในวงจรแบบขนานเมื่อจ่ายกำลังเข้าไปเท่าไร ทุกพอร์ตจะแบ่งกำลังออกเท่า ๆ กัน ศึกษาได้จากการแบ่งกำลังแบบวิลคินสันในบทที่ 4 นั่นก็แสดงให้เห็นว่า ตัวรวมสัญญาณมีประสิทธิภาพพอสมควร

5.5 สรุป

จากรูปแบบทางโครงสร้างและขนาดของสายอากาศไมโครสตริปที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม IE3D ในบทนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ อินพุตอิมพีแดนซ์ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ความกว้างแถบ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน และอัตรายาย ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบค่อนข้างเป็นไปตามทฤษฎี แสดงให้เห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปบนเสี้ยวของผิวโค้งทรงกลมมีประสิทธิภาพมากกว่าบนผิวระนาบเรียบ และสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปมีประสิทธิภาพมากกว่าสายอากาศแบบองค์ประกอบเดี่ยว อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองทำให้สายอากาศไมโครสตริปนี้ มีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ สามารถใช้งานกับเครือข่ายแบบไร้ท้องถิ่นที่ความถี่ 3.5 GHz ได้

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทสรุป

โครงงานฉบับนี้เป็นการศึกษาสายอากาศสำหรับเครือข่ายมอร์ด์แบนด์ไร้สายระยะไกล (Wireless MAN) ที่ใช้ติดตั้งที่ผนังของตัวอาคาร โดยได้ทำการศึกษารามิเตอร์ของสายอากาศ สำหรับใช้งานในเครือข่ายไร้สาย ได้แก่ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing-Wave Ratio หรือ SWR) อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern) และอัตราขยาย (Gain)

ในการออกแบบสายอากาศได้ใช้โปรแกรม IE3D ในการออกแบบ โดยตัวโปรแกรม สามารถใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง อินพุตอิมพีแดนซ์ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน และอัตราขยาย

การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศในโครงงานฉบับนี้จะเริ่มจากอินพุตอิมพีแดนซ์ และแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมบน เสี้ยวของผิวโค้งทรงกลม ซึ่งทำให้มีความรู้และเข้าใจในพื้นฐานของอิทธิพลจากค่าพารามิเตอร์ ต่างๆ ของสายอากาศที่มีต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานและอินพุตอิมพีแดนซ์ ในส่วนของการ ออกแบบเพื่อจะนำสายอากาศไปใช้งาน สิ่งสำคัญนั้นคือจะต้องทำให้สายอากาศมีความเหมาะสม ที่สุดสำหรับระบบนั้นๆ และเงื่อนไขที่ได้นำมาพิจารณาในการออกแบบสายอากาศนั้นก็คือแบบ รูปการแผ่กระจายกำลังงาน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ การวิเคราะห์ เิงทฤษฎีทั้งหมดทำโดยโปรแกรม IE3D

จากบทที่ 5 ได้แสดงผลการทดลอง ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ อัตราส่วนคลื่น นิ่ง อินพุตอิมพีแดนซ์ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน และอัตราขยาย ของสายอากาศที่ได้ ศึกษาและสร้าง จะพบว่าผลการทดลองนั้นเป็นที่ยอมรับได้ คือค่อนข้างตรงตามทฤษฎี และตาม ความต้องการของสายอากาศที่จะใช้งานจริง อย่างไรก็ตามยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง อัน เนื่องจากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของโฟม ซึ่งทำให้การคำนวณคลาดเคลื่อน และความไม่พร้อม ของเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างและการทดสอบ ดังนั้นจึงเกิดความไม่สะดวกอย่างมากในการ ทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานและความไม่สมบูรณ์ของสถานที่ทดสอบ

ข้อเสนอแนะ

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่ได้ทำการทดสอบนี้ มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลที่คำนวณได้จากโปรแกรม IE3D อยู่พอสมควร ทั้งนี้เป็นผลมาจากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของโฟม ซึ่งทำให้การคำนวณคลาดเคลื่อน ผลจากสภาพแวดล้อมและอุปกรณ์ในการทดสอบ สำหรับกรณีแรก การทดสอบสายอากาศที่ติดตั้งบนพื้นโล่งและกว้างพอสมควร หรือห้องที่ไม่มีสัญญาณรบกวนเพื่อลดปัญหาการบ่งหรือสะท้อนของคลื่นระหว่างสายอากาศและเพื่อให้ได้ค่าที่แท้จริงมากที่สุด สายอากาศที่ได้ออกแบบในโครงการนี้ เนื่องจากในส่วนของ การจำลองด้วยโปรแกรม IE3D ไม่มีการจำลองแบบผิวโค้ง และไม่มีส่วนของตัวป้อนสัญญาณแต่เมื่อทำการสร้างสายอากาศต้นแบบที่นำมาวัดทดสอบจำเป็นต้องมีตัวป้อนสัญญาณ ปรากฏว่าส่วนของตัวป้อนสัญญาณนี้มีผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ทำให้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่วัดได้ มีค่าผิดเพี้ยนไปบ้างเล็กน้อย จึงควรจะมีการปรับปรุงและพัฒนาต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] G. Ramesh, B. Prakash, B. Inder, and I. Apisak, Microstrip Antenna Design Handbook, Artech House, INC.
- [2] M. P. David, Microwave Engineering 2nd Edition, John Wiley & Sons, INC.
- [3] A. B. Constantine, Antenna Theory Analysis And Design 2nd Edition, John Wiley & Sons, INC.
- [4] บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, วิศวกรรมไมโครเวฟ, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536
- [5] Microstrip Antenna On A Spherical Surface, from <http://www.ieee.com>
- [6] Y.T. Lo, D. Solomon, and W.F. Richards, "Theory and Experiment on Microstrip Antennas," IEEE AP-S Int. Symp, Digest, Vol. 1, 1982, pp. 171-174.
- [7] Thailand Wi-Fi Hotspot List, from <http://www.thaiwirelesslan.com>

ประวัติผู้เขียน

1. นางสาวสุภัทรา บุญลาด เกิดเมื่อวันจันทร์ที่ 10 ตุลาคม พ.ศ.2526 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลหนองฝือ อำเภอดุสิต กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนดุสิตวิทยานานาชาติ กรุงเทพมหานคร อำเภอดุสิต กรุงเทพมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โทร. 0-6727-3066

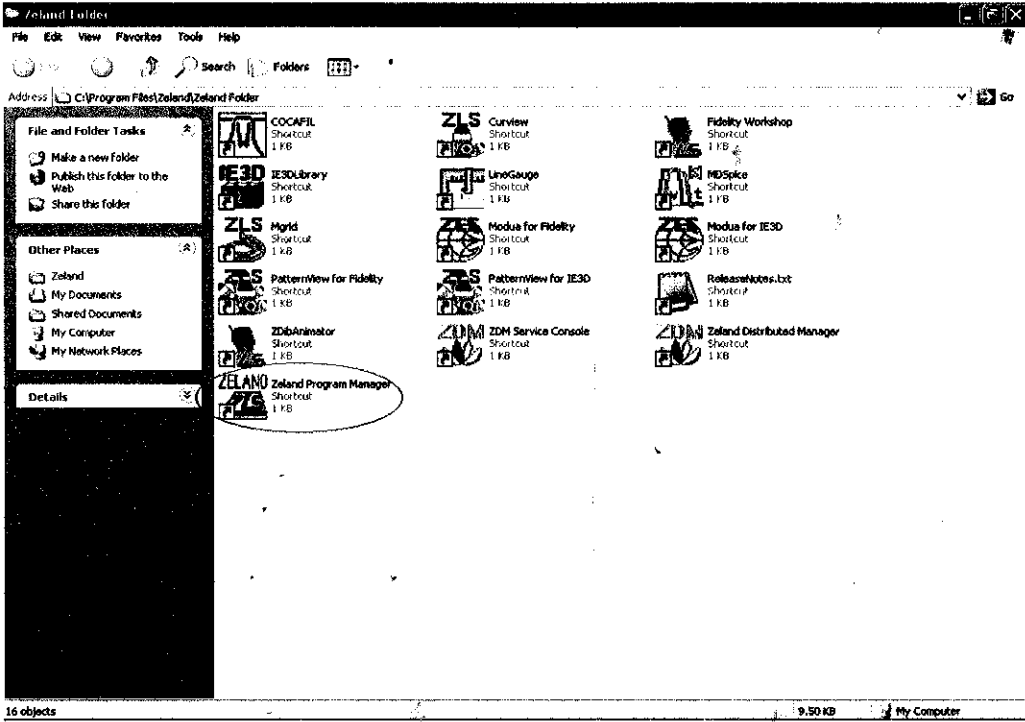
2. นางสาวรัชฎา อ่อน मुख เกิดเมื่อวันศุกร์ที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ.2527 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลสลู อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดชุมพร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนท่าแซะรัชมงคลวิทยาลัย อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดชุมพร เมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โทร.0-6582-2897

3. นางสาวกิริตา รัตนนที เกิดเมื่อวันจันทร์ที่ 31 ตุลาคม พ.ศ.2526 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลห้วยหิน อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสุรนารีวิทยา 2 อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โทร. 0-7877-1965

ภาคผนวก ก

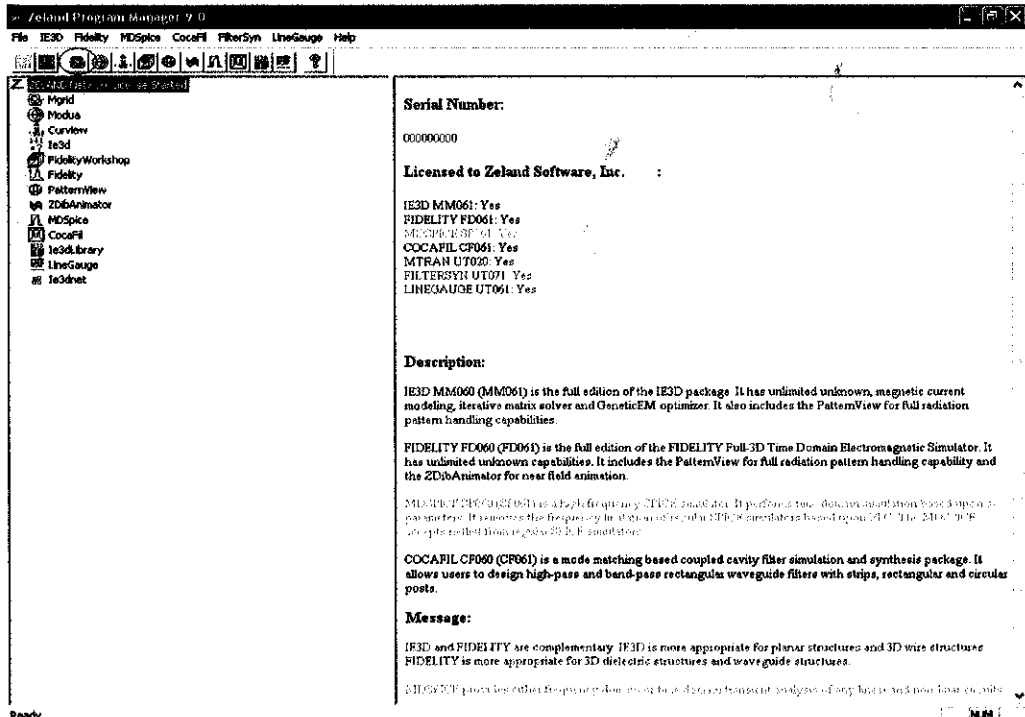
การจำลองสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม IE3D

1. เริ่มการเข้าโปรแกรมด้วยการดับเบิลคลิกที่ ZELAND ซึ่งเป็นไอคอนของโปรแกรม IE3D จะเห็นหน้าจอโปรแกรม ดังรูปที่ 1



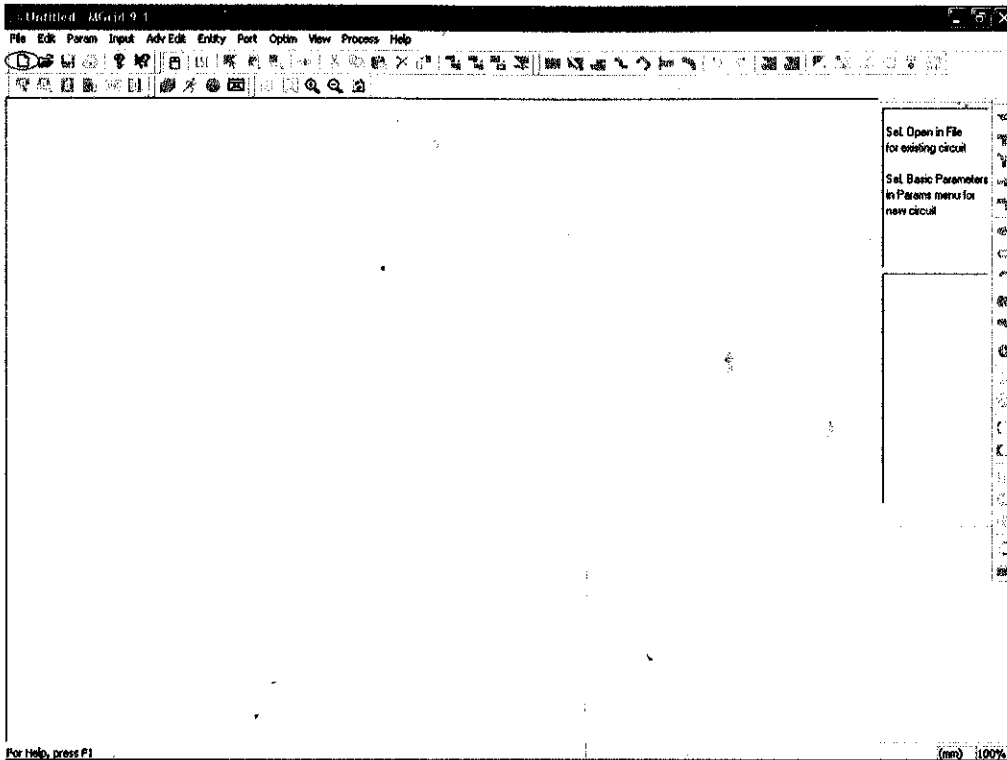
รูปที่ 1

2. คลิกที่ไอคอนดังรูปที่ 2



รูปที่ 2

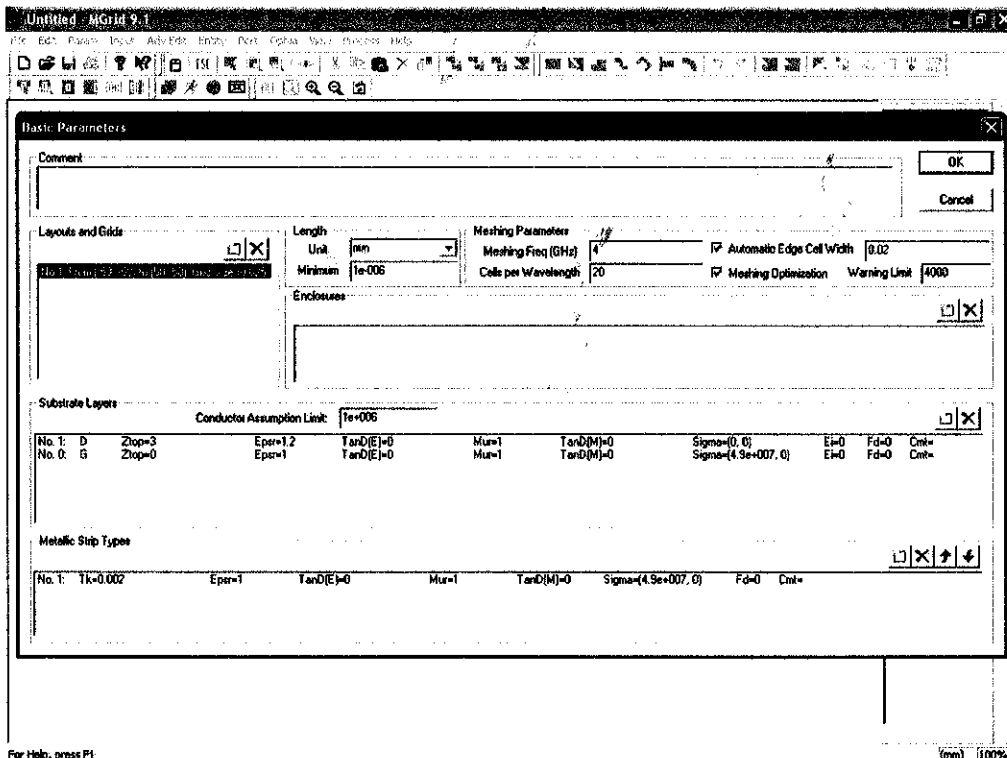
3.คลิกที่ไอคอนดังรูปที่3 หรือไปที่ File → New เพื่อตั้งค่า Basic Parameter



รูปที่3

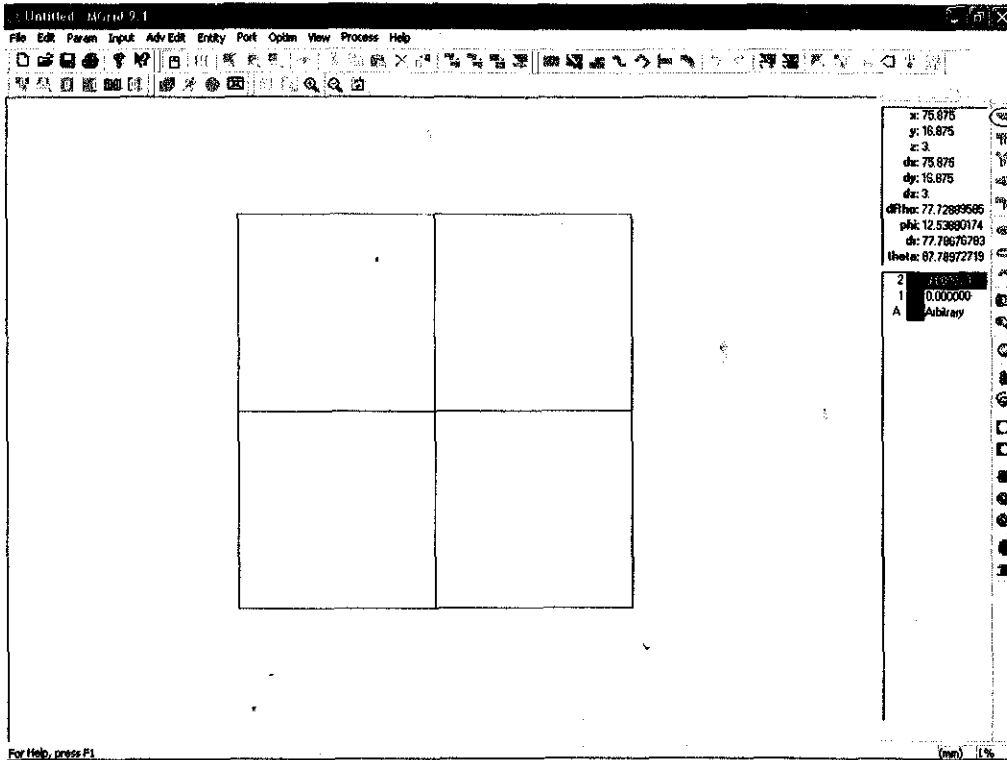
4. ทำการตั้งค่า Basic Parameter โดยตั้งค่า Grid, Substrate layer และ Metallic layer แล้วกด

OK



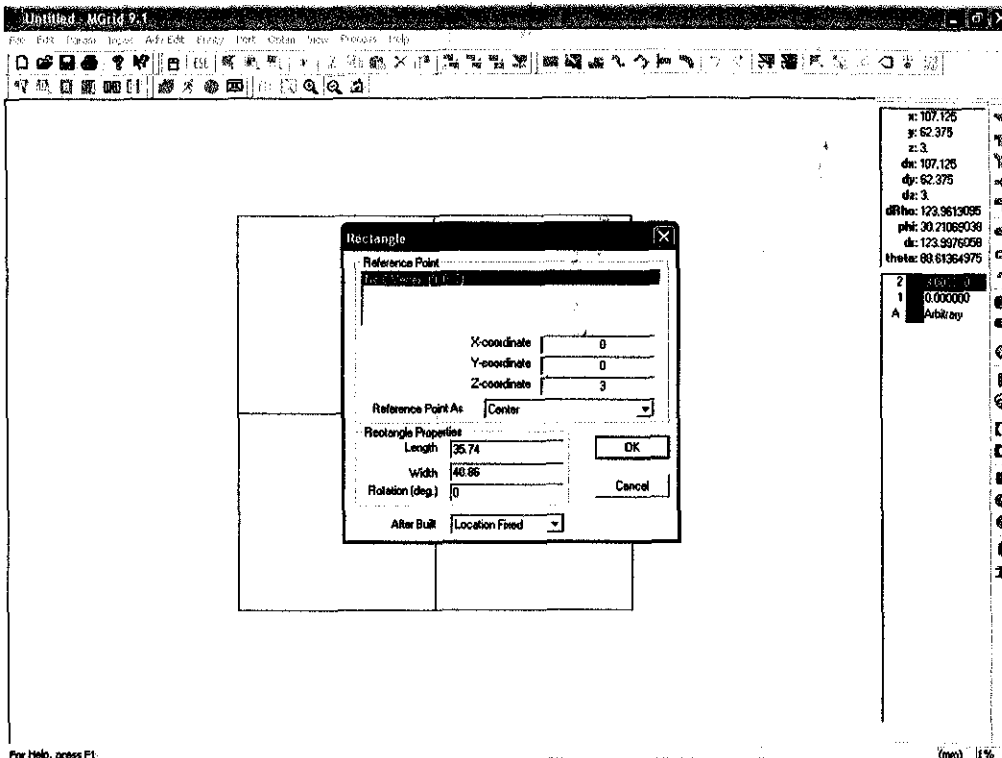
รูปที่4

5.คลิก Rectangle ที่มีมุมขวาด้านบนสุด



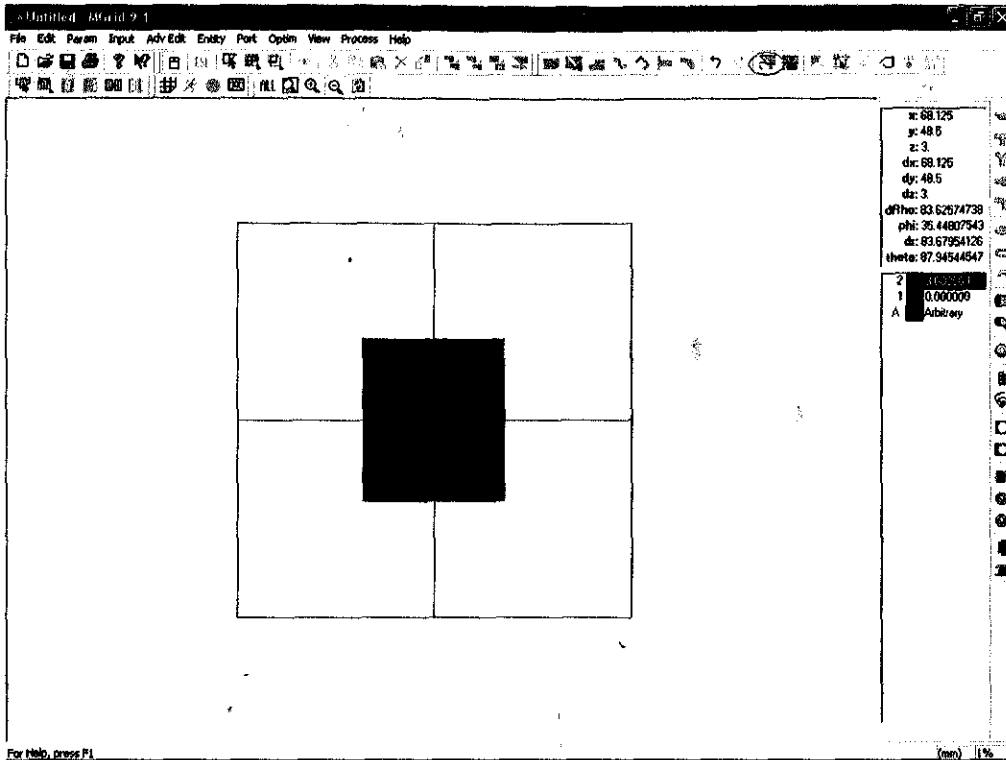
รูปที่ 5

6. ตั้งค่า Rectangular โดยตั้งค่าจุด X, Y, Z Coordinate และค่า Length, Width ตามที่ได้ ออกแบบมา ในกรณีนี้ตั้งค่า Length, Width เท่ากับ 35.74, 40.86 ตามลำดับ แล้วกด OK



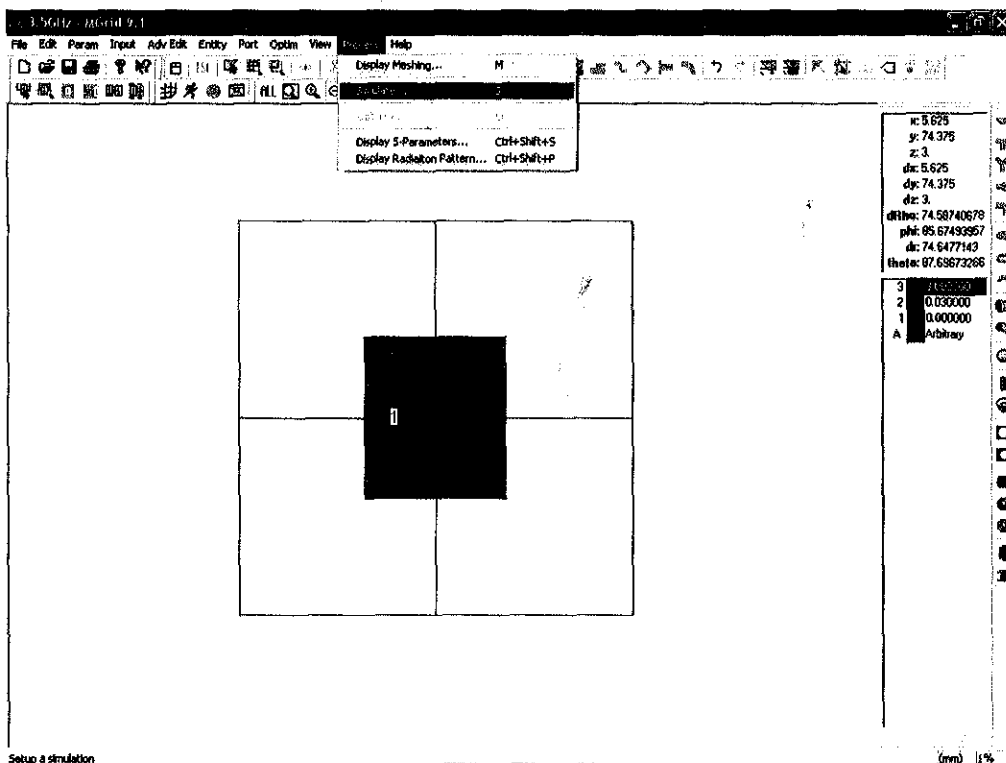
รูปที่ 6

7.คลิกที่ Probe-Feed to Patch เพื่อทำการ feed แบบ Coaxial feed



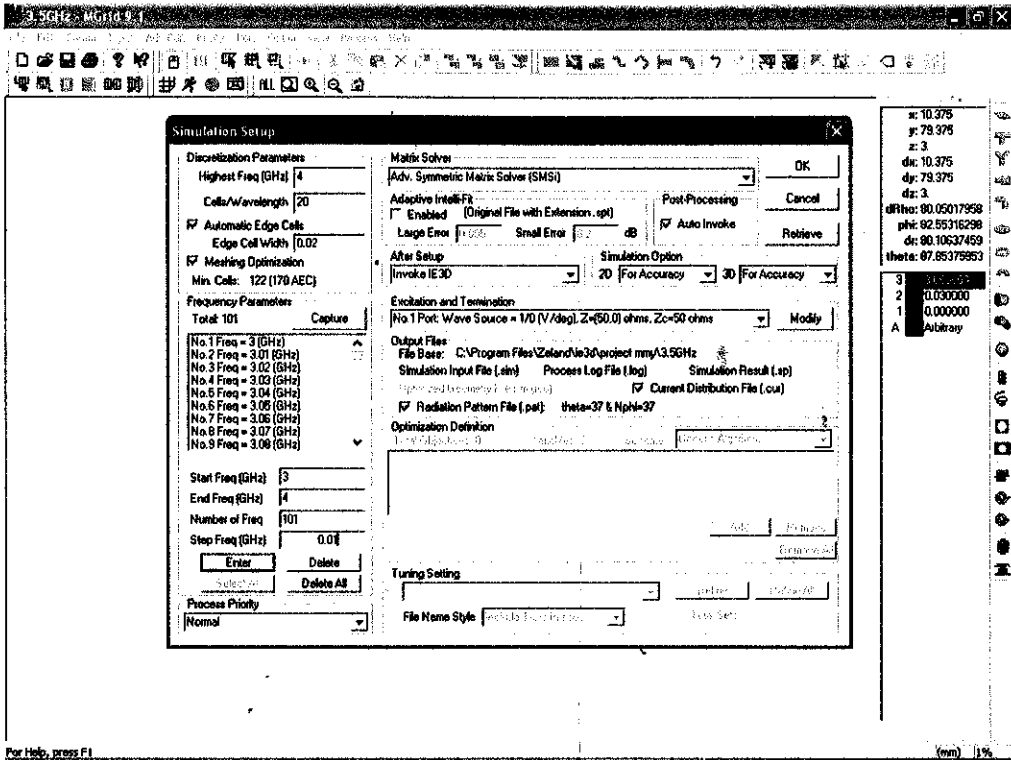
รูปที่ 7

8. Save file แล้วทำการ Simulate โดยไปที่คำสั่ง Process → Simulate



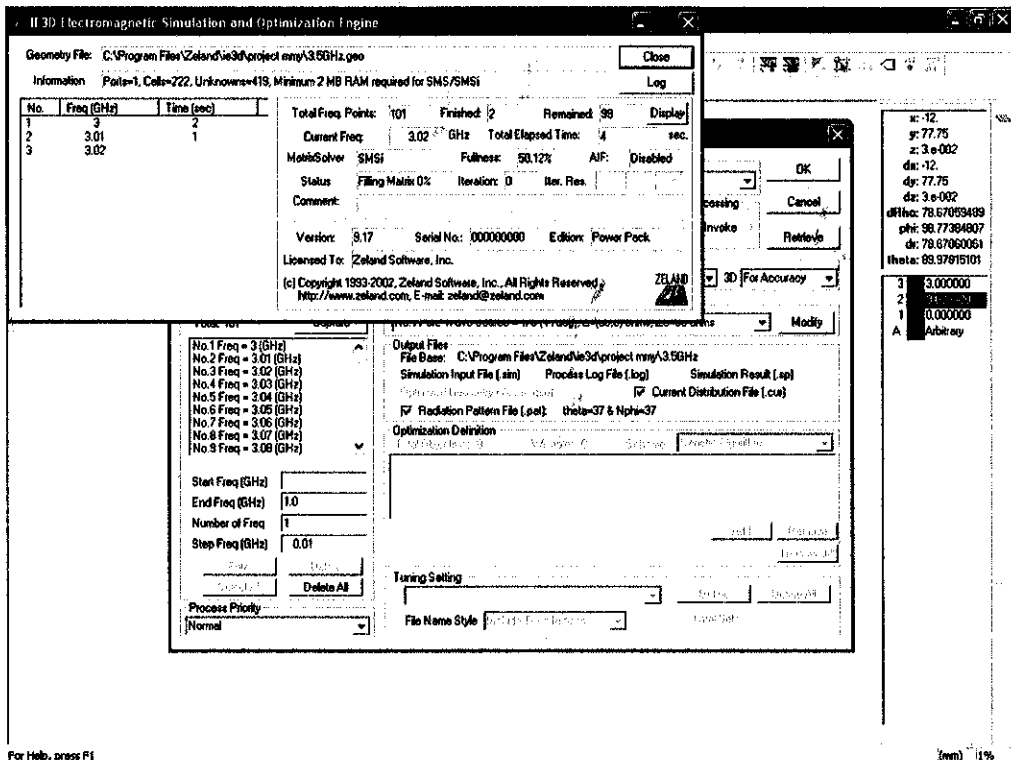
รูปที่ 8

9. ตั้งค่าในการ Simulate จากนั้นกด OK



รูปที่ 9

10. โปรแกรมเริ่มทำการ Simulate

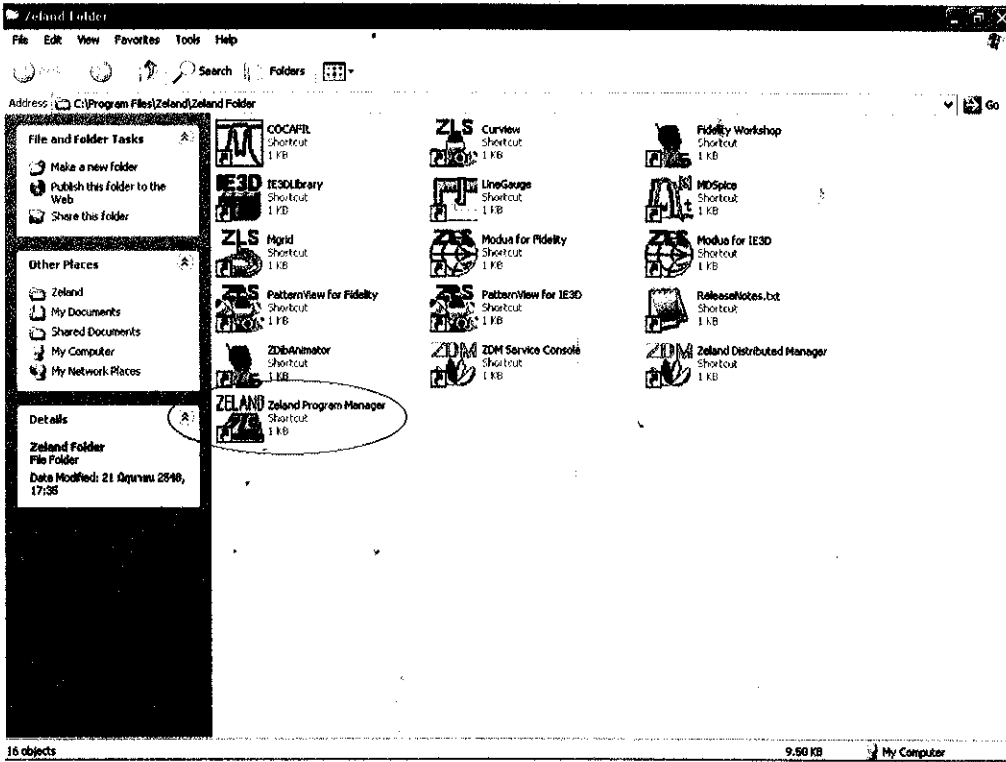


รูปที่ 10

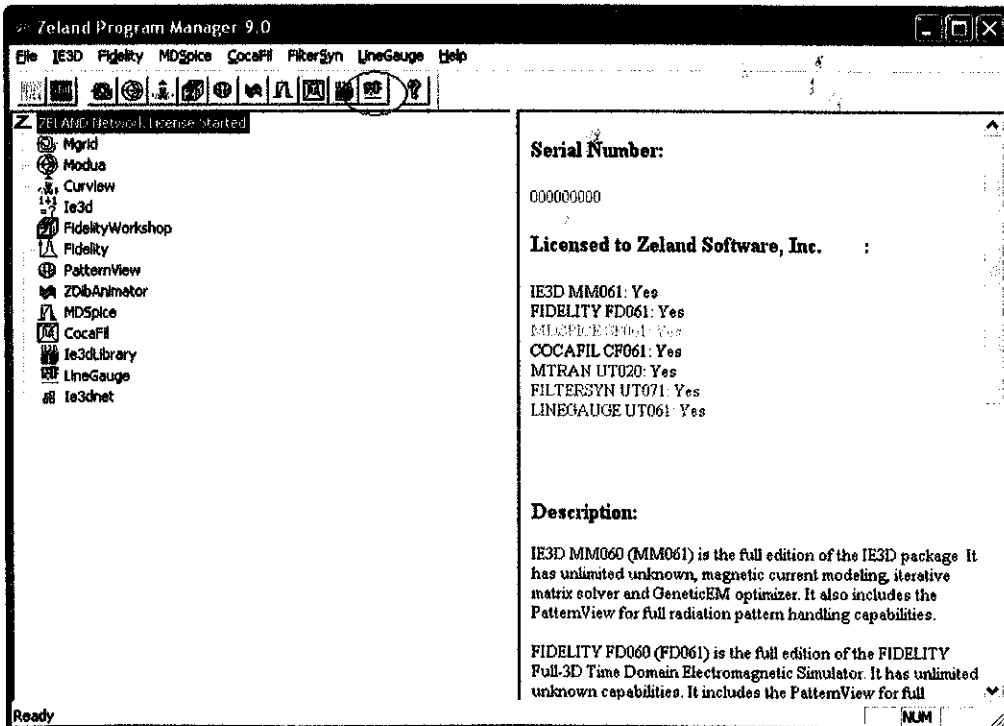
ภาคผนวก ข

การออกแบบตัวป้อนสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม IE3D

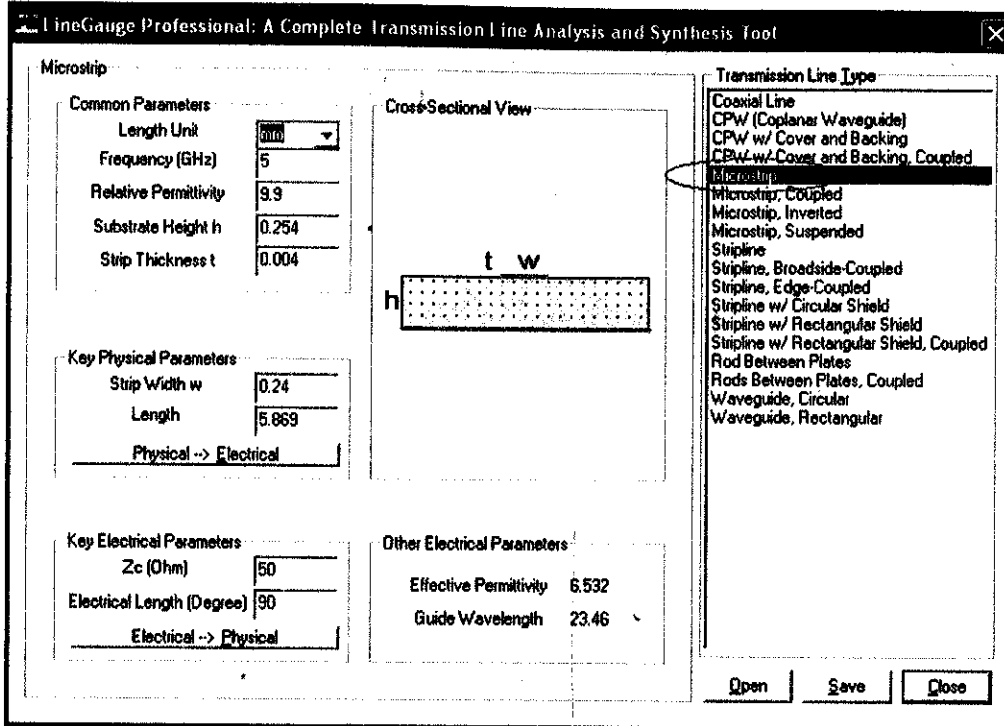
1. เริ่มการเข้าโปรแกรมโดยดับเบิลคลิกที่ ZELAND ซึ่งเป็นไอคอนโปรแกรม IE3D จะเห็นหน้าจอโปรแกรม ดังรูป



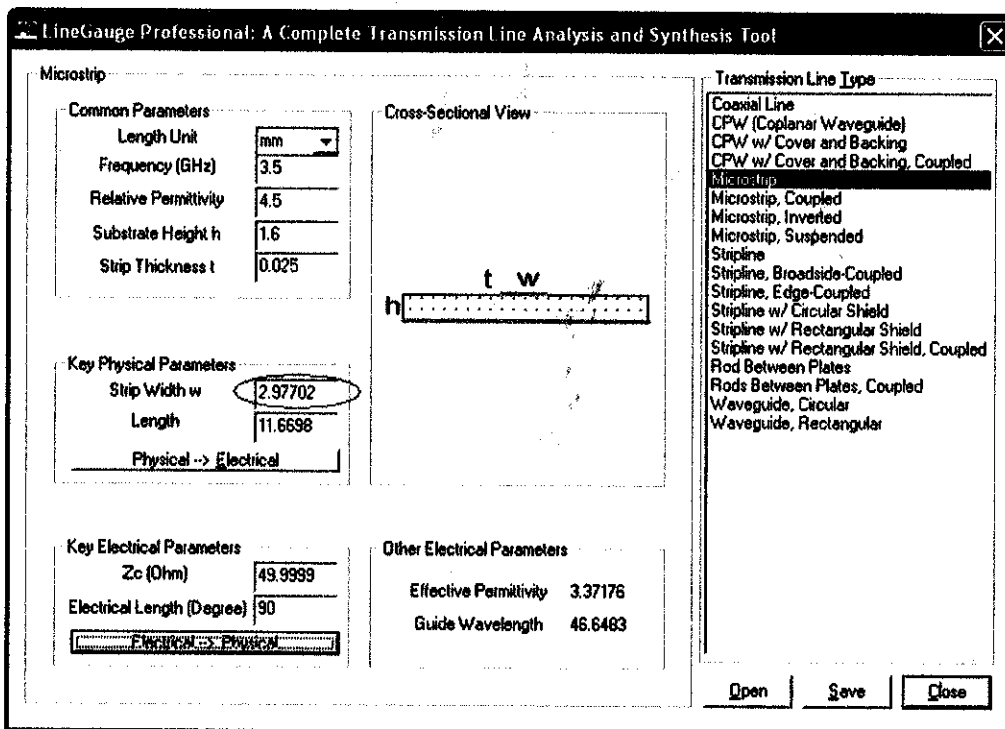
2. คลิกที่ไอคอนดังรูปหรือไปที่ Line gauge → Line gauge



3. ที่แถบ Transmission line type เลือกเป็น Microstrip



4. ทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงใน Common Parameter จากนั้นคลิกที่ไอคอน Electrical -> Physical จะแสดงค่า Strip Width ที่ได้เท่ากับ 2.97702 ที่ Zc = 50 โอห์ม



6. แสดงค่า Strip Width ที่ได้เท่ากับ 1.582 mm ที่ $Z_c = 70$ โอห์ม

LineGauge Professional: A Complete Transmission Line Analysis and Synthesis Tool

Microstrip

Common Parameters

Length Unit	mm
Frequency (GHz)	3.5
Relative Permittivity	4.5
Substrate Height h	1.6
Strip Thickness t	0.025

Key Physical Parameters

Strip Width w	1.582
Length	11.9773

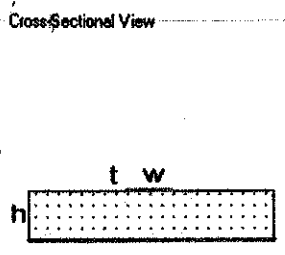
Physical → Electrical

Key Electrical Parameters

Z_c (Ohm)	69.9998
Electrical Length (Degree)	90

Electrical → Physical

Cross-Sectional View



Transmission Line Type

- Coaxial Line
- CPW (Coplanar Waveguide)
- CPW w/ Cover and Backing
- CPW w/ Cover and Backing, Coupled
- Microstrip**
- Microstrip, Coupled
- Microstrip, Inverted
- Microstrip, Suspended
- Stripline
- Stripline, Broadside-Coupled
- Stripline, Edge-Coupled
- Stripline w/ Circular Shield
- Stripline w/ Rectangular Shield
- Stripline w/ Rectangular Shield, Coupled
- Rod Between Plates
- Rods Between Plates, Coupled
- Waveguide, Circular
- Waveguide, Rectangular

Open

Save

Close

ภาคผนวก ค
การทดสอบแผ่นซับสเตรต

Measurement: 2 time for each simple.

C_p + D Measurement from Precision LCR HP4284A

Level 1.00V Frequency: 10 kHz, 100kHz, 1 MHz

Foam: size $2 \times 2 \times 0.5 \text{ cm}^3$

test	frequency	C_p (pF)	Dissipation factor	K'
1	10	1.0153	0.0415	1.43
	100	1.0016	0.0090	1.41
	1000	0.9978	0.0029	1.41
2	10	1.0576	0.0412	1.49
	100	1.0388	0.0095	1.47
	1000	1.0299	0.0033	1.45

Problem: Thickness of each side is not equal.

Foam: size $2 \times 2 \times 0.3 \text{ cm}^3$

test	frequency	C_p (pF)	Dissipation factor	K'
1	10	1.5750	0.3548	1.34
	100	1.5565	0.0078	1.32
	1000	1.5504	0.0031	1.31
2	10	1.5781	0.0352	1.34
	100	1.5592	0.0079	1.32
	1000	1.5521	0.0036	1.31

June 29, 2005