

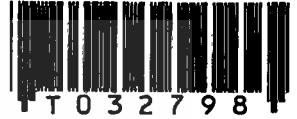


ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญาโท



T 0 3 2 7 9 8

ชื่อหัวข้อ ชุติฝึกสายอากาศไมโครสตริป

Demonstration of Microstrip Antennas

- ชื่อนักศึกษา
- นายณเรงค์ เครือคันทา รหัสประจำตัว 40031207
 - นายธีระพล ทวีพรพิบูลย์ รหัสประจำตัว 40031212
 - นายเสกสิทธิ์ เกียรติธรรม รหัสประจำตัว 40031237
 - นายอานันต์ คำเรียงวงศ์ รหัสประจำตัว 40031240

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.วิสุทธิ์ อธิไพฑูริย์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ปิยะ ศุภวาราศูวณีย์

คณะกรรมการสอบปริญญาโท	ลายมือชื่อ
1. ผศ.วิสุทธิ์ อธิไพฑูริย์	
2. อาจารย์ปิยะ ศุภวาราศูวณีย์	
3. อาจารย์โกศล ตราชู	
4. อาจารย์อมรรักษ์ ชัยชนะ	
5. อาจารย์สุระชัย พิมพ์สวัสดิ์	

วัน/เดือน/ปีที่สอบ วันศุกร์ที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2542 เวลา 16.30 น.

สถานที่สอบ ห้อง ค.310 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.

z/พ.

๒๖ ๒/๑๑ ๒๕

2541

เลขหมึก 32798

เลขทะเบียน 32798

วัน, เดือน, ปี 10 ส.ย. 2542



ภาควิชารับรองแล้ว

ผ.ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม (ดำเนินการค้า

วันที่ /...เดือน...พ.ศ. 4

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง...

ปริญญานิพนธ์

ชุดฝึกสายอากาศไมโครสตริป

DEMONSTRATION OF MICROSTRIP ANTENNAS



ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปีการศึกษา 2541

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อหัวข้อ	ชุดฝึกสายอากาศไมโครสตริป
นักศึกษา	นายณรงค์ เครือกันทา นายธีรพล ทรัพย์บุญ นายเสกสรรค์ เจียรสุวรรณ นายอานัติ คำรงเวชศักดิ์ ผศ.วิสุทธิ อธิพรธรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ปิยะ สุภวราสุวัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต
หลักสูตร	วิศวกรรมโทรคมนาคม
สาขาวิชา	2541
ปีการศึกษา	

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอชุดฝึกสายอากาศไมโครสตริป แสดงถึงการออกแบบสร้าง และทดลองหาคุณสมบัติ เปรียบเทียบวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศ ของสายอากาศไมโครสตริปแบบ สี่เหลี่ยม และแบบวงกลม โดยการสร้างสายอากาศแบบแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีขนาดเล็กบนวัสดุ 2 ชนิด คือ อีพ็อกซี่ และดูรอยด์ ย่านความถี่ใช้งาน 1-3 กิกะเฮิรตซ์ และความต้านทานอินพุต 50 โอห์ม ปฏิญานิพนธ์นี้เสนอการทดลองใช้วัสดุสารไดอิเล็กตริกต่างๆ มาวางอยู่บนสายอากาศไมโคร สตริปที่สร้างขึ้น- วัสดุที่ใช้ได้แก่ แก้ว กระดาษ และพลาสติก ซึ่งพบว่าเมื่อผลการเปลี่ยนแปลงค่า อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป

Thesis Title	Demonstration of Microstrip Antennas	
Students	Mr.Narong	Khruakanta
	Mr.Theeraphol	Sapboon
	Mr.Seksan	Jiarasuwan
	Mr. Arnut	Damrongwedchsak
Advisor	Assist.Prof.Wisuit	Atipornatum
Co-Advisor	Mr.Piya	Supavarasuwat
Education Level	Bachelor of Science in Industrial Education	
Program in	Telecommunication Engineering	
Academic Year	1998	

ABSTRACT

This thesis presents the Demonstration of Microstrip Antennas. The project show implementation and quality testing of a rectangular and circular microstrip antennas difference material by construction the antenna on the small print circuit board on two type are epoxy and duroid. The frequency bandwidth are 1-3 GHz and input impedance are 50 Ω . The thesis also propose to put material on construction antennas, the material are glass, paper and plastic which found that have effect to the microstrip impedance .

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ถูกลงไปด้วยดี เนื่องจากความร่วมมือของสมาชิกภายในกลุ่มทุกท่าน ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรมที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการวัดและทดสอบ รวมทั้งยังให้คำแนะนำ แนวความคิด แนวทางการแก้ไขปัญหา และความรู้ต่างๆ ในการจัดทำปริญญานิพนธ์ ขอขอบคุณ ดร.ทองทอด วานิชศรี ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้คำแนะนำความรู้แหล่งข้อมูลอุปกรณ์ ขอขอบคุณห้องสมุดคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ ห้องสมุดมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการค้นคว้าข้อมูล สุดท้ายที่ควรระลึกถึงอย่างยิ่ง บิดาและมารดา ที่เป็นผู้ให้ความสนับสนุนด้านการศึกษา และเป็นผู้ให้กำลังใจด้วยดีตลอดเวลา ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปริญญาานิพนธ์	1
1.2 ชี้ความสามารถของโครงการ	1
1.3 เนื้อหาโดยสังเขป	1
บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ	3
2.1 กล่าวนำ	3
2.1.1 ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	3
2.1.2 คุณสมบัติของคลื่น	3
2.1.3 สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	10
2.1.4 อินพุตอิมพีแดนซ์	16
2.2 ทฤษฎีสายนำสัญญาณ	17
2.2.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อน	19
2.2.2 คลื่นนิ่ง	21
2.2.3 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง	21
2.2.4 การสูญเสียของสายนำสัญญาณ	22
2.2.5 การลดทอนสัญญาณ	24
2.3 ทฤษฎีสายอากาศในย่านความถี่ไมโครเวฟ	25
2.3.1 หลักการของสายอากาศ	25
2.3.2 ชนิดของสายอากาศ	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.4 สายอากาศไมโครสตริป	30
2.4.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป	30
2.4.2 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	35
2.4.3 วัสดุพื้นรองที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริป	36
2.4.4 รูปร่างลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศไมโครสตริป	39
2.4.5 การป้องกันพลังงานไฟฟ้าให้กับสายอากาศไมโครสตริป	40
2.4.6 หลักการกระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป	43
2.4.7 การส่งผ่านคลื่นในสายอากาศไมโครสตริป	51
2.4.8 การลดทอนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริป	55
บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน	58
3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป	58
3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	58
3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	58
3.2.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมโดยใช้สารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี	61
3.2.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมโดยใช้สารตัวกลางเป็นคูรอยด์	62
3.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	63
3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	63
3.3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมโดยใช้สารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี	68
3.3.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมโดยใช้สารตัวกลางเป็นคูรอยด์	68
3.4 การสร้างสายอากาศไมโครสตริป	70
3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศไมโครสตริป	70
3.4.2 ขั้นตอนการสร้างสายอากาศไมโครสตริป	70
3.5 คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป	75

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง	79
4.1 กล่าวนำ	79
4.2 การวัด และทดสอบ หาค่าการสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบ สี่เหลี่ยม และสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	80
4.2.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง	80
4.2.2 ผลการทดลอง	81
4.3 การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมและ สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	85
4.3.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง	85
4.3.2 ผลการทดลอง	86
4.4 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมและสายอากาศ ไมโครสตริปแบบวงกลม	90
4.4.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง	90
4.4.2 ผลการทดลอง	91
4.5 การทดสอบวางวัสดุต่าง ๆ บนสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมและสาย อากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	94
4.5.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง	95
4.5.2 ผลการทดลอง	97
4.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารสารตัวกลางที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริป แบบสี่เหลี่ยม และสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	103
4.6.1 ค่าตัวแปรคุณภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	103
4.6.2 ค่าตัวแปรคุณภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	104
4.7 การเปรียบเทียบผลของควาวิตีต่อสายอากาศไมโครสตริป	106
บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไข และพัฒนา	111
5.1 บทสรุป	111
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการจัดทำโครงการ	111
5.3 ปัญหา และแนวทางแก้ไข	112

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
5.4 แนวทางการพัฒนาโครงการ	113
ภาคผนวก ก รูปต้นแบบของชุดฝึกสายอากาศไมโครสตริป	122
ภาคผนวก ข ตารางค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวน	114
ภาคผนวก ค ใบงานการทดลอง	129
บรรณานุกรม	191
ประวัติผู้แต่ง	192



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 คำอุปสรรค	3
ตารางที่ 2.2 ค่าความต้านทานของวัสดุชนิดต่างๆ	24
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวัสดุฐานรองชนิดต่างๆ	37
ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของวิธีการป้อนสัญญาณแบบต่างๆ	42
ตารางที่ 2.4(ต่อ) ข้อดีและข้อเสียของวิธีการป้อนสัญญาณแบบต่างๆ	43
ตารางที่ 4.1 ลักษณะของสายอากาศ	79
ตารางที่ 4.2 ขนาดของสายอากาศ	80
ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มี สารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี	82
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มี สารตัวกลางเป็นดูรอยด์	83
ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มี สารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี	84
ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มี สารตัวกลางเป็นดูรอยด์	85
ตารางที่ 4.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลาง เป็นอีพ็อกซี	87
ตารางที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลาง เป็นดูรอยด์	88
ตารางที่ 4.9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลาง เป็นอีพ็อกซี	89
ตารางที่ 4.10 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลาง เป็นดูรอยด์	90
ตารางที่ 4.11 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็น อีพ็อกซี	91
ตารางที่ 4.12 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็น ดูรอยด์	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.13 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี	93
ตารางที่ 4.14 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์	94
ตารางที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ	97
ตารางที่ 4.16 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ	97
ตารางที่ 4.17 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ	98
ตารางที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ	98
ตารางที่ 4.19 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ	99
ตารางที่ 4.20 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ	99
ตารางที่ 4.21 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ	100
ตารางที่ 4.22 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ	100
ตารางที่ 4.23 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ	101
ตารางที่ 4.24 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ	101
ตารางที่ 4.25 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ	102

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.26 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็น คูรอยด์ต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ	102
ตารางที่ 4.27 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็น อีพ็อกซีใส่ในควิตี	106
ตารางที่ 4.28 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็น คูรอยด์ใส่ในควิตี	107
ตารางที่ 4.29 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็น อีพ็อกซีใส่ในควิตี	107
ตารางที่ 4.30 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมมีสารตัวกลางเป็น คูรอยด์ใส่ในควิตี	108
ตารางที่ 4.31 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็น อีพ็อกซีไม่ใส่ในควิตี	108
ตารางที่ 4.32 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็น คูรอยด์ไม่ใส่ในควิตี	109
ตารางที่ 4.33 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็น อีพ็อกซีไม่ใส่ในควิตี	109
ตารางที่ 4.34 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมมีสารตัวกลางเป็น คูรอยด์ไม่ใส่ในควิตี	111
ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	135
ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	142
ตารางที่ 3 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	148
ตารางที่ 4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	154
ตารางที่ 5 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	161
ตารางที่ 6 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	167
ตารางที่ 7 ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบ สี่เหลี่ยม	171
ตารางที่ 8 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 9 ผลการทดลองค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	172
ตารางที่ 10 ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	176
ตารางที่ 11 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	177
ตารางที่ 12 ผลการทดลองค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	177
ตารางที่ 13 คุณสมบัติของสารตัวกลาง	181
ตารางที่ 14 ผลการทดลองสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากอีพ็อกซี	183
ตารางที่ 15 ผลการทดลองสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากคูรอยด์	183
ตารางที่ 16 คุณสมบัติของสารตัวกลาง	187
ตารางที่ 17 ผลการทดลองสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากอีพ็อกซี	189
ตารางที่ 18 ผลการทดลองสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากคูรอยด์	189

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 สเปคตรัมของสัญญาณ	4
รูปที่ 2.2 รูปแบบการแพร่พลังงาน	5
รูปที่ 2.3 รูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามทิศทางการแพร่กระจายคลื่น	12
รูปที่ 2.4 การใช้กฎมือขวาหาทิศทางของคลื่น	13
รูปที่ 2.5 ทิศทางกำลังของคลื่น	14
รูปที่ 2.6 โพลาริเซชันของคลื่น	14
รูปที่ 2.7 การส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ	15
รูปที่ 2.8 สายอากาศและวงจรสมมูลย์	16
รูปที่ 2.9 รูปแบบของสายนำสัญญาณแบบต่างๆ	18
รูปที่ 2.10 จุดแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของคลื่น	21
รูปที่ 2.11 การลดทอนของคลื่นแรงดันเนื่องจากการสูญเสียในสาย	22
รูปที่ 2.12 การลดลงของความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากการสูญเสียเนื่องจากผิวตัวนำ	23
รูปที่ 2.13 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศชนิดลวดตัวนำ	26
รูปที่ 2.14 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์	27
รูปที่ 2.15 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศแบบแฉวลำดับ	28
รูปที่ 2.16 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศชนิดตัวสะท้อน	29
รูปที่ 2.17 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศแบบเลนส์	29
รูปที่ 2.18 แบบจำลองสายส่งสำหรับสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	31
รูปที่ 2.19 แกนประสานร่วมของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	33
รูปที่ 2.20 สนามบริเวณขอบพื้นผิว S	34
รูปที่ 2.21 ค่าคงที่อิสระของ Polytafluoroethylene (PTFE) ต่ออุณหภูมิ	38
รูปที่ 2.22 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น	39
รูปที่ 2.23 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสล็อต	39
รูปที่ 2.24 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบ Travelling Wave	40
รูปที่ 2.25 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีสายส่งไมโครสตริป	40
รูปที่ 2.26 การป้อนสัญญาณด้วยโคแอกเซียล	41
รูปที่ 2.27 การป้อนด้วยวิธีผ่านช่องเปิด	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 2.28 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีวางไว้ใกล้กัน	41
รูปที่ 2.29 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	44
รูปที่ 2.30 ลักษณะของสนามไฟฟ้าภายใต้แผ่นและบริเวณขอบของสายอากาศไมโครสตริป	44
รูปที่ 2.31 ลักษณะการเกิดสล็อต	44
รูปที่ 2.32 แหล่งจ่ายกระแสแบบที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าแบบระยะไกลเหมือนกัน	46
รูปที่ 2.33 แหล่งจ่ายกระแสเชิงผิวอีกแบบหนึ่งที่ทำให้เกิดสนามในระยะไกลเหมือนกัน	47
รูปที่ 2.34 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและสนามที่แพร่กระจายบริเวณขอบของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป	48
รูปที่ 2.35 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริป	51
รูปที่ 2.36 ไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$ และ $w/h \ll 1$	54
รูปที่ 2.37 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าสารตัวกลางสัมพัทธ์ประสิทธิภาพ	55
รูปที่ 2.38 การส่งผ่านของคลื่น TEM ในไมโครสตริป	56
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	59
รูปที่ 3.2 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	61
รูปที่ 3.3 ดันแบบของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี	62
รูปที่ 3.4 ดันแบบของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์	63
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	64
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการคำนวณรัศมีของแผ่นตัวนำรูปวงกลม	64
รูปที่ 3.7 การป้อนสัญญาณโดยสายส่งไมโครสตริปสามส่วน	66
รูปที่ 3.8 ขนาดของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากอีพ็อกซี	69
รูปที่ 3.9 ขนาดของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากดูรอยด์	69
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการสร้างสายอากาศไมโครสตริป	70
รูปที่ 3.11 โปรแกรม L-Edit	71
รูปที่ 3.12 โปรแกรม Adobe Acrobat Exchange	72
รูปที่ 3.13 แผ่นฟิล์มอาร์ทเวิร์ค	73
รูปที่ 3.14 แผ่นวงจรพิมพ์ที่ติดครายฟิล์มแล้ว	74
รูปที่ 3.15 แผ่นวงจรพิมพ์ที่เหลืแต่ละายทองแดงที่ต้องการ	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 3.16 การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศ ไมโครสตริป	76
รูปที่ 3.17 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป	77
รูปที่ 4.1 สัญญาณสัมพันธ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม ที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี	81
รูปที่ 4.2 สัญญาณสัมพันธ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม ที่มีสารตัวกลางเป็นคูรอยด์	82
รูปที่ 4.3 สัญญาณสัมพันธ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม ที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี	83
รูปที่ 4.4 สัญญาณสัมพันธ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม ที่มีสารตัวกลางเป็นคูรอยด์	84
รูปที่ 4.5 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลาง เป็นอีพ็อกซี	86
รูปที่ 4.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลาง เป็นคูรอยด์	87
รูปที่ 4.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลาง เป็นอีพ็อกซี	88
รูปที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลาง เป็นคูรอยด์	89
รูปที่ 4.9 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มี สารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี	92
รูปที่ 4.10 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม ที่มีสารตัวกลางเป็นคูรอยด์	92
รูปที่ 4.11 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มี สารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี	93
รูปที่ 4.12 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มี สารตัวกลางเป็นคูรอยด์	94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.13 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปเมื่อนำไปใส่ในควาวิตี้	106
รูปที่ ก.1 เครื่องวิเคราะห์เครือข่าย	115
รูปที่ ก.2 แทนปรับสำหรับเลื่อนปรับวัสดุ	115
รูปที่ ก.3 ขั้วต่อ SMA	116
รูปที่ ก.4 สายต่อเครื่องวัด	116
รูปที่ ก.5 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีที่ยังไม่ใส่ควาวิตี้	117
รูปที่ ก.6 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีที่ใส่ควาวิตี้	117
รูปที่ ก.7 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ที่ยังไม่ใส่ควาวิตี้	118
รูปที่ ก.8 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ที่ใส่ควาวิตี้	118
รูปที่ ก.9 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีที่ยังไม่ใส่ควาวิตี้	119
รูปที่ ก.10 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีที่ใส่ควาวิตี้	119
รูปที่ ก.11 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ที่ยังไม่ใส่ควาวิตี้	120
รูปที่ ก.12 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ที่ใส่ควาวิตี้	120
รูปที่ 1 การต่อตัวภาวะความต้านทาน	132
รูปที่ 2 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องวัด	134
รูปที่ 3 สัญญาณสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	135
รูปที่ 4 การต่อตัวภาวะความต้านทาน	139
รูปที่ 5 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องวัด	141
รูปที่ 6 สัญญาณสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	142
รูปที่ 7 การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาวะที่ไม่เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	145
รูปที่ 8 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องวัด	147
รูปที่ 9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	148
รูปที่ 10 การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาวะที่ไม่เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	151
รูปที่ 11 การต่อสายอากาศกับเครื่องมือวัด	153
รูปที่ 12 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	154
รูปที่ 13 ความกว้างโดยรวมของสายอากาศด้านที่มีการป้อนสัญญาณ	158

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 14 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องวัด	159
รูปที่ 15 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	160
รูปที่ 16 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องวัด	166
รูปที่ 17 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม	167
รูปที่ 18 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องวัด	170
รูปที่ 19 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องวัด	175
รูปที่ 20 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องวัด	181
รูปที่ 21 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องวัด	188



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ปัจจุบันการสื่อสารในย่านความถี่ไมโครเวฟมีบทบาทสำคัญมาก การศึกษาและทดลองจะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองอย่างครบถ้วน จึงจะได้ผลการศึกษาการทดลองและวิเคราะห์อย่างถูกต้องแน่นอน ซึ่งอุปกรณ์แต่ละชิ้นมีราคาสูงทำให้มีปัญหาในการจัดซื้อ ดังนั้น ถ้าสามารถออกแบบ สร้าง และทดลองสายอากาศไมโครสตริปมาใช้งานเองได้จะสามารถประหยัดต้นทุนในการสร้าง และนำสายอากาศไมโครสตริปที่ได้จากการทดลองไปเป็นแบบอย่างในการศึกษา และทดลองต่อไป

1.2 ขีดความสามารถของโครงการ

โครงการนี้มีขีดความสามารถดังต่อไปนี้

1. สายอากาศไมโครสตริป สามารถใช้งานในย่านความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์
2. สายอากาศไมโครสตริป ที่ใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยม และแบบวงกลม
3. สายอากาศไมโครสตริป สามารถนำมาใช้เป็นชุดฝึก และใบงานทดลองของนักศึกษา ระดับปริญญาตรี
4. มีใบงานปฏิบัติการทดลอง จำนวน 10 ใบงาน
5. วัสดุที่ใช้ในการทำสายอากาศไมโครสตริปมีค่าคงตัวฉนวนสัมพัทธ์ต่ำโดยใช้ดูรอยด์ มีค่าคงตัวสารตัวกลางสัมพัทธ์เท่ากับ 2.2

1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

เนื้อหาในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็นบทต่าง ๆ ดังนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของคลื่น คุณสมบัติต่างๆ ของคลื่น ทฤษฎีสายนำสัญญาณ ทฤษฎีสายอากาศในย่านความถี่ไมโครเวฟ และลักษณะโครงสร้างการทำงานของสายอากาศไมโครสตริป

บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการทำงานของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และแบบวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปเผยแพร่เป็นการค้า หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต อีกรหัสห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง กล่าวถึงขั้นการทดลอง การทดสอบประสิทธิภาพ และคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไข และการพัฒนา เป็นการสรุปผลการทำงาน และประสิทธิภาพ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา และนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางมากขึ้น

ภาคผนวก ก รูปต้นแบบของชุดฝึกสายอากาศไมโครสตริป

ภาคผนวก ข ตารางค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวน

ภาคผนวก ค ใบงานการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 กล่าวนำ

2.1.1 ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ระบบ MKS มีหน่วยต่างๆ เช่น โวลต์, แอมแปร์, โอห์ม, คูอมป์, ฟารัด, เฮนรี, วัตต์, แอมแปร์-รอบ, จูล (วัตต์-วินาที) เป็นต้น

สำหรับคำอุปสรรค (คำที่เติมหน้าคำอื่น) ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์นี้ได้รวบรวมไว้ใน ตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงตั้งแต่ย่าน 10^{-15} (femto) ถึง 10^{18} (exa)

ตารางที่ 2.1 คำอุปสรรค

ชื่อคำอุปสรรค	ค่ายกกำลังของเลขสิบ	ชื่อคำอุปสรรค	ค่ายกกำลังของเลขสิบ
Exa	10^{18}	Basic unit	1
Peta	10^{15}	Milli	10^{-3}
Tera	10^{12}	Micro	10^{-6}
Giga	10^9	Nano	10^{-9}
Mega	10^6	Pico	10^{-12}
Kilo	10^3	Femto	10^{-15}

เนื่องจากความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถสร้างขึ้นและนำมาใช้งานได้นั้นมีช่วงที่กว้างมาก ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการใช้งานจึงมีการแบ่งสเปกตรัมช่วงความถี่ดังนี้ แถบสเปกตรัมความถี่เริ่มต้นตั้งแต่ 30 เฮิร์ตซ์ (Hz) ในย่านต่ำกว่าความถี่เสียงขึ้นไปถึง 1×10^{28} เฮิร์ตซ์ ในย่านรังสีคอสมิก ซึ่งได้แสดงให้เห็นการจัดแถบสเปกตรัมความถี่ดังรูปที่ 2.1

2.1.2 คุณสมบัติของคลื่น

1) รูปแบบการแพร่พลังงาน (Radiation Pattern)

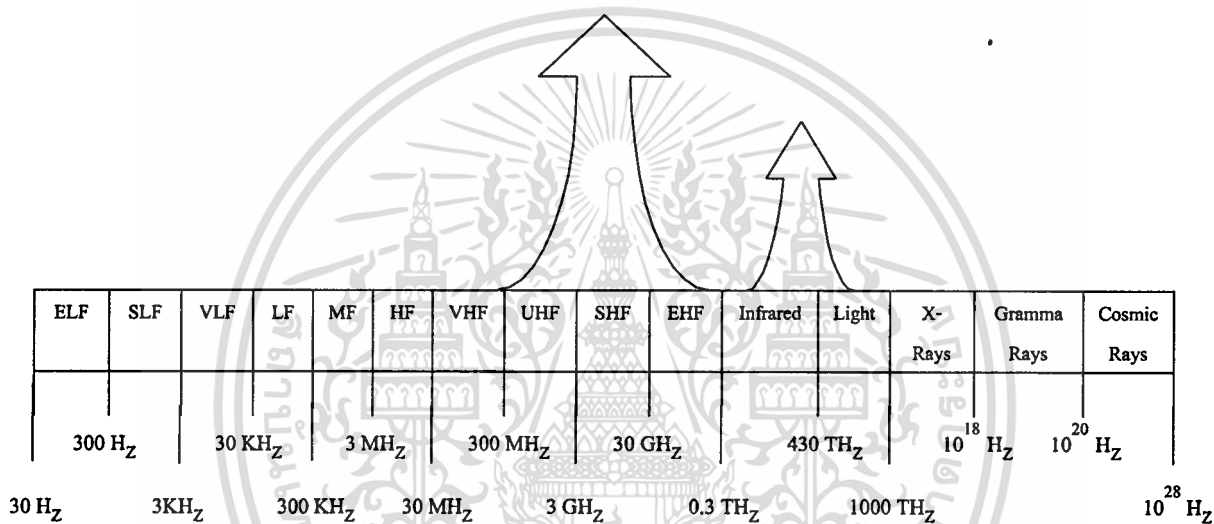
เป็นรูปแบบที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่พลังงานของสายอากาศนั้น โดยที่รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ประการใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Microwave Bands							Millimeter	Submillimeter
L	S	C	X	KU	K	KA		
1 GHz	2 GHz	4 GHz	8 GHz	12 GHz	18 GHz	27 GHz	40 GHz	0.3 THz

Laser	
Infrared	Visible
5 THz	300 THz - 1000 THz



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของสัญญาณ

การแพร่พลังงานสนามมีค่า γ ตามสัดส่วนของความเข้มสนาม โดยมีระยะทางจากสายอากาศในทิศทางของ θ, ϕ ดังรูปที่ 2.2 ในแต่ละส่วนของพลังงานเรียกว่าพู (Lobe) ลักษณะจะมีพูหลัก (Main Lobe) ซึ่งมีค่าสูงสุดในทิศทางของ z ($\theta = 0$) กับพูย่อย (Minor lobe) ระหว่างพูจะมีช่องว่าง (Null) อยู่

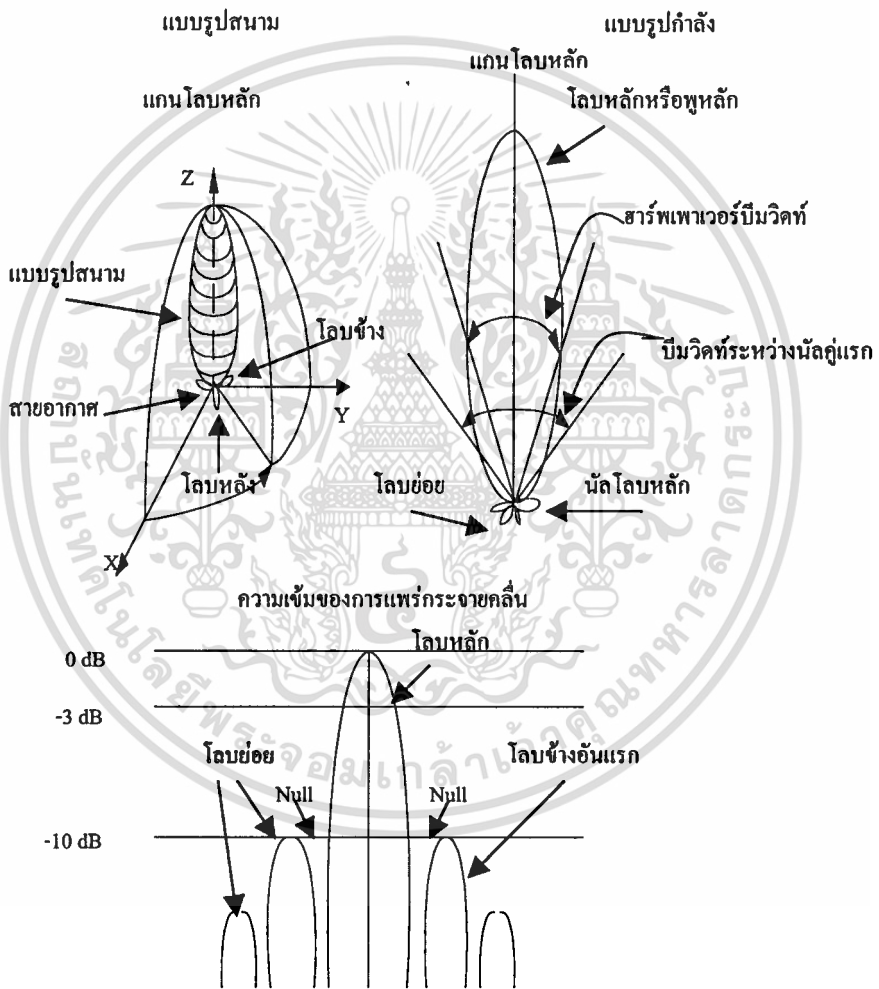
2) ความหนาแน่นของกำลังการแผ่พลังงาน (Radiation Power Density)

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลางนั้นได้ถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงาน และกำลังไฟฟ้า โดยตัวความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้แก่ พอยน์ติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (Instantaneous Poynting Vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\psi = \xi \times H \tag{2.1}$$

- เมื่อ ψ คือ พอยน์ติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น, (W/m^2)
 ξ คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลานั้น, (V/m^2)
 H คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กชั่วขณะเวลานั้น, (A/m^2)



รูปที่ 2.2 รูปแบบการแพร่พลังงาน

กำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นที่ผิวปิด สามารถหาได้โดยการอินทิเกรตส่วนของ
 เอกซโพยน์ติงเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นที่ผิวทั้งหมด เนื่องจากพอยน์ติงเวกเตอร์มีความหมายแสดงถึงการ
 ไปด้วยกันเป็นหนึ่งซึ่งกำลังงานทำให้สามารถเขียนสมการได้ดังนี้ ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \iint_S \psi \cdot \bar{n} da \quad (2.2)$$

เมื่อ T คือ กำลังงานทั้งหมดชั่วขณะเวลานั้น, (W)
 da คือ พื้นที่เล็กๆ บนพื้นที่ปิด, (m^2)

สำหรับในกรณีของสนามที่แปรผันกับเวลา สามารถหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของกำลังงานได้โดยการอินทิเกรตค่าของพอยน์ติงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้นตลอด 1 คาบ แล้วหารด้วยคาบเวลานั้น ส่วนสนามที่แปรผันกับเวลาซึ่งกระจายอยู่ในรูป $e^{j\omega t}$ สนามไฟฟ้า \bar{E} และสนามแม่เหล็ก \bar{H} แล้วทำการหาค่าความสัมพันธ์กับค่า ξ และ H ชั่วขณะเวลาใดๆ ได้จาก

$$\xi(x, y, z; t) = \text{Re}[\bar{E}(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.3)$$

$$H(x, y, z; t) = \text{Re}[\bar{H}(x, y, z)e^{j\omega t}] \quad (2.4)$$

จากสมการ $\text{Re}[\bar{E}e^{j\omega t}] = \frac{1}{2}[\bar{E}e^{j\omega t} + \bar{E}e^{-j\omega t}]$ ทำให้สามารถเขียน สมการที่ 2.3 ได้ใหม่เป็น

$$\psi = \xi \times H = \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{E} \times \bar{H}^*] + \frac{1}{2} [\bar{E} \times \bar{H}e^{j2\omega t}] \quad (2.5)$$

จะเห็นได้ว่าในเทอมที่สองของสมการที่ 2.5 เป็นฟังก์ชันของคาบเวลา ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้ ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของพอยน์ติงเวกเตอร์จึงหาได้เป็น

$$\bar{W}_{av}(x, y, z) = [W(x, y, z; t)]_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{E} \times \bar{H}] \quad (W/m^2) \quad (2.6)$$

กำลังงานเฉลี่ยที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{rad} &= P_{av} = \iint_S \bar{W}_{rad} \cdot \bar{d}s \\ &= \iint_S \bar{W}_{av} \cdot \bar{d}s \\ &= \frac{1}{2} \iint_S \text{Re}(\bar{E} \times \bar{H}^*) \cdot \bar{d}s \end{aligned} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.7) การค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเป็นค่าตัวเลข ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการชี้ทิศทางของสายอากาศทางด้านส่งหรือด้านรับ ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนของค่าความเข้มของการแพร่กระจายสูงสุด ต่อค่าความเข้มการแพร่กระจายของแหล่งจ่ายแบบไอโซโทรปิกซอร์ส (Isotropic Source) สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D = \frac{U(\theta, \phi)_{\max}}{U(\theta, \phi)_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \quad (2.8)$$

4) อัตราขยาย (Gain)

เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากอีกตัวหนึ่งของสายอากาศ อัตราขยายของสายอากาศจะขึ้นอยู่กับสภาพเจาะจงทิศทาง และค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ แต่สภาพเจาะจงทิศทางเป็นค่าที่อธิบายถึงคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น และถ้าค่าประสิทธิภาพไม่ถึง 100% อัตราขยายจะน้อยกว่าสภาพเจาะจงทิศทาง ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์ที่สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G = kD \quad (2.9)$$

เมื่อ G คือ อัตราขยาย

k คือ แฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (Efficiency Factor) ของสายอากาศ

D คือ สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

โดยส่วนใหญ่ในการคิดค่าอัตราขยายจะคิดเทียบกับสายอากาศอ้างอิง ซึ่งคิดจากกำลังสองของค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศที่มีการแพร่คลื่นมากที่สุด เทียบกับค่าความเข้มของสนามที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิง หรืออาจแสดงในรูปอัตราส่วนของค่ากำลังงานที่ต้องใช้ส่งออกอากาศของสายอากาศทั้งสอง เพื่อให้เกิดความเข้มสนามขนาดเท่ากัน ณ จุดเดียวกันในทิศทางที่มีการแพร่คลื่นมากที่สุด หรืออัตราขยายของสายอากาศรับคืออัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มสนามของสายอากาศทดสอบ กับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน สายอากาศอ้างอิงที่นิยมส่วนใหญ่เป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศไอโซโทรปิก ซึ่งต้องมีคุณสมบัติที่สามารถแพร่กระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศทางในปริมาณเท่ากัน ส่วนมากจะใช้สายอากาศไอโซโทรปิกพอยน์ซอร์ส (Isotropic Point Source) เพราะว่ามีารสูญเสียน้อย ไม่ว้ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศ (e_r) นั้น ต้องการใช้เมื่อคำนึงถึงค่าการสูญเสียต่างๆ ที่ขั้ว และใน โครงสร้างของสายอากาศด้วย การสูญเสียต่าง ๆ อาจมีสาเหตุมาจาก

1. การสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมตช์ (Mismatch) ระหว่างสายนำสัญญาณ (Transmission Line) กับสายอากาศ
2. การสูญเสียทั้งในตัวนำ และฉนวน (I^2R) โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$e_r = e_r \cdot e_c \cdot e_d \quad (2.10)$$

เมื่อ e_r คือ ประสิทธิภาพทั้งหมด
 e_r คือ ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ
 e_c คือ ประสิทธิภาพของตัวนำ
 e_d คือ ประสิทธิภาพของฉนวน

$$\Gamma = \frac{(Z_m - Z_0)}{(Z_m + Z_0)} \quad (2.11)$$

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของศักดาไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศ
 Z_m คือ อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ
 Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของสายส่ง

สำหรับประสิทธิภาพของตัวนำและฉนวน ($e_c e_d = e_{cd}$) เป็นอัตราส่วนของกำลังงาน ที่ถูกนำมายังความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น R_r ต่อกำลังงานที่ถูกนำมาสู่ R_r และความต้านทาน การสูญเสีย R_L

$$P_r = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_r = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_r}{(R_r + R_L + R_g) + (X_A + X_B)^2} \right] \quad (2.12)$$

$$P_L = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L = \frac{|V_g|^2}{2} \left[\frac{R_L}{(R_r + R_L + R_g) + (X_A + X_B)^2} \right] \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หน้าไปใช้ประโยชน์ (2.13) การค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (2.14)$$

ในกรณีของท่อโลหะซึ่งยาว λ และมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอมีค่าเท่ากับ A ความต้านทานกระแสดตรง R_{dc} จะมีค่าเท่ากับ

$$R_{dc} = \frac{\lambda}{\sigma A} \quad (2.15)$$

ถ้าความลึกของผิว (Skin Depth) $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}}$ มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเส้นแรงแม่เหล็กที่สั้นที่สุดของพื้นที่หน้าตัด กระแสจะไหลอยู่เฉพาะบริเวณชั้นบางๆ ที่ผิวของตัวนำเท่านั้น ดังนั้น ความต้านทานที่สูงจะมีค่าดังนี้คือ

$$R_H = \frac{\lambda R_s}{P} = \frac{\lambda}{P} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \quad (2.16)$$

เมื่อ P คือ เส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัดของท่อโลหะ ($P = 2\pi b$ สำหรับหลอดวงกลมรัศมี b)

R_s คือ ความต้านทานที่ผิวของตัวนำ

ω คือ ความถี่เชิงมุม

μ_0 คือ สภาพยอมของสภาพอากาศว่าง (Permeability of Free Space)

σ คือ ความนำโลหะ

6) แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศในมาตรฐานที่กำหนดให้อาจคิดว่าเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพของการแพร่พลังงาน อัตราขยาย อิมพีแดนซ์ รูปแบบการแพร่พลังงาน ความกว้างลำ (Beamwidth) โพลาริเซชัน และระดับของพู้อย (Side Lobe) เป็นต้น ให้อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่กำหนด โดยที่ไม่แตกต่างจากคุณสมบัติที่ความถี่ที่ออกแบบไว้ จนทำให้คุณสมบัติเหล่านั้นผิดไปจากข้อกำหนด หรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้าง มักจะคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่ใช้งานได้ในทางด้านสูงต่อความถี่ใช้งานทางด้านต่ำ แบนด์วิดท์มักจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ

ความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ)หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้นดังสมการที่ 2.17

$$\% BW = \left(\frac{f_H - f_L}{f_r} \right) \times 100 \quad (2.17)$$

เมื่อ	BW	คือ แบนด์วิดท์ของสายอากาศ
	f_H	คือ ความถี่ที่ใช้งานได้ทางด้านสูง
	f_L	คือ ความถี่ที่ใช้งานได้ทางด้านต่ำ
	f_r	คือ ความถี่กลางของแบนด์วิดท์

7) โพลาริเซชัน

โพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายเป็นรูปซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปในทิศทาง และขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งผันแปรตามเวลา สำหรับโพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพลาริเซชันที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น ถ้าเป็นสายอากาศส่ง หรือถ้าเป็นสายอากาศทางด้านรับจะมีโพลาริเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นมาแทน ในทิศทางที่สายอากาศมีอัตราขยายมากที่สุด ดังนั้น โพลาริเซชันของสายอากาศในทิศทางที่แตกต่างกัน ก็จะแตกต่างกันออกไปด้วย

ในการแบ่งชนิดของโพลาริเซชันอาจแบ่งตามลักษณะการหมุนของยอดเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็นแบบ

1. โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) มีเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในอวกาศเป็นเส้นตรงเสมอ เช่น โพลาริเซชันแบบเวอร์ติคัล (Vertical) และฮอริซอลคัล (Horizontal)

2. โพลาริเซชันแบบวงกลม (Circularly Polarization) มีเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆ ในอวกาศ หมุนเป็นรูปวงกลม

3. โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptically Polarization) มีเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันตามเวลา ณ จุดใดๆ ในอวกาศหมุนเป็นรูปแบบวงรี

2.1.3 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปแบบการกระจายและสนามแม่เหล็กโดยหลักการเหนี่ยวนำซึ่งกล่าวว่า สนามไฟฟ้าแปรเปลี่ยนตามเวลาในสุญญากาศ จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

หรือในทางกลับกันสนามไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำขึ้นด้วยสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{H} = \varepsilon(\mathbf{v} \times \vec{E}) \quad (2.18)$$

$$\vec{E} = -\mu(\mathbf{v} \times \vec{H}) \quad (2.19)$$

รูปคลื่นสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าที่ได้จากสมการที่ 2.18 และ 2.19 เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กหรือในทางกลับกันมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก ทำให้มีการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น โดยจะเกิดการเหนี่ยวนำกลับไปกลับมา และมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเช่นนี้ตลอดไปไม่มีที่สิ้นสุด ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะแพร่ออกไปเป็นรูปรวมคลื่น ซึ่งมีชื่อเรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.3 (ก) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเดินทางด้วยความเร็วแสงในสุญญากาศ คือ 3×10^8 เมตร/วินาที และจะแพร่กระจายคลื่นออกไปอย่างต่อเนื่อง จนกว่าพลังงานของคลื่นจะลดทอนไปจนหมดสิ้น ทั้งรูปคลื่นสนามแม่เหล็กและไฟฟ้า ซึ่งที่นี้เรียกว่า คลื่น H และคลื่น E โดยจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางขวา

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีชื่อเรียกต่างกันหลายแบบด้วยกัน คือ จากการจัดหรือการวางตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเทียบทิศทางการเดินทางหรือการแพร่กระจายคลื่น ถ้าสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H ถูกจัดวางในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น รูปคลื่นเช่นนี้มีชื่อเรียกว่า ทรานสเวิร์สอิเล็กโตแมกเนติกเวฟ (Transverse Electromagnetic Waves) หรือ TEM แสดงให้ดังรูปที่ 2.3 (ข) ถ้าสนามไฟฟ้า E ทำมุมฉากกับทิศทางการแพร่กระจายคลื่น โดยมีเพียงส่วนหนึ่งของสนามแม่เหล็ก H (ซึ่งจากเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก H แดกเข้าสู่แนวแกน) ทำมุมฉากและอีกส่วนประกอบที่เหลืออยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีชื่อเรียกว่า ทรานสเวิร์สอิเล็กทริกเวฟ (Transverse Electric Wave) หรือคลื่น TE พิจารณาได้ตามรูปที่ 2.3 (ค) กรณีสนามแม่เหล็ก H ทำมุมฉากกับทิศทางการแพร่กระจายคลื่น และมีส่วนประกอบหรือเวกเตอร์ย่อย 2 เวกเตอร์ สนามไฟฟ้า E ทำมุมฉากและอยู่ในแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น เรียกคลื่นลักษณะนี้ว่า ทรานสเวิร์สแมกเนติกเวฟ (Transverse Magnetic Wave) หรือคลื่น TM แสดงในรูปที่ 2.3 (ง)

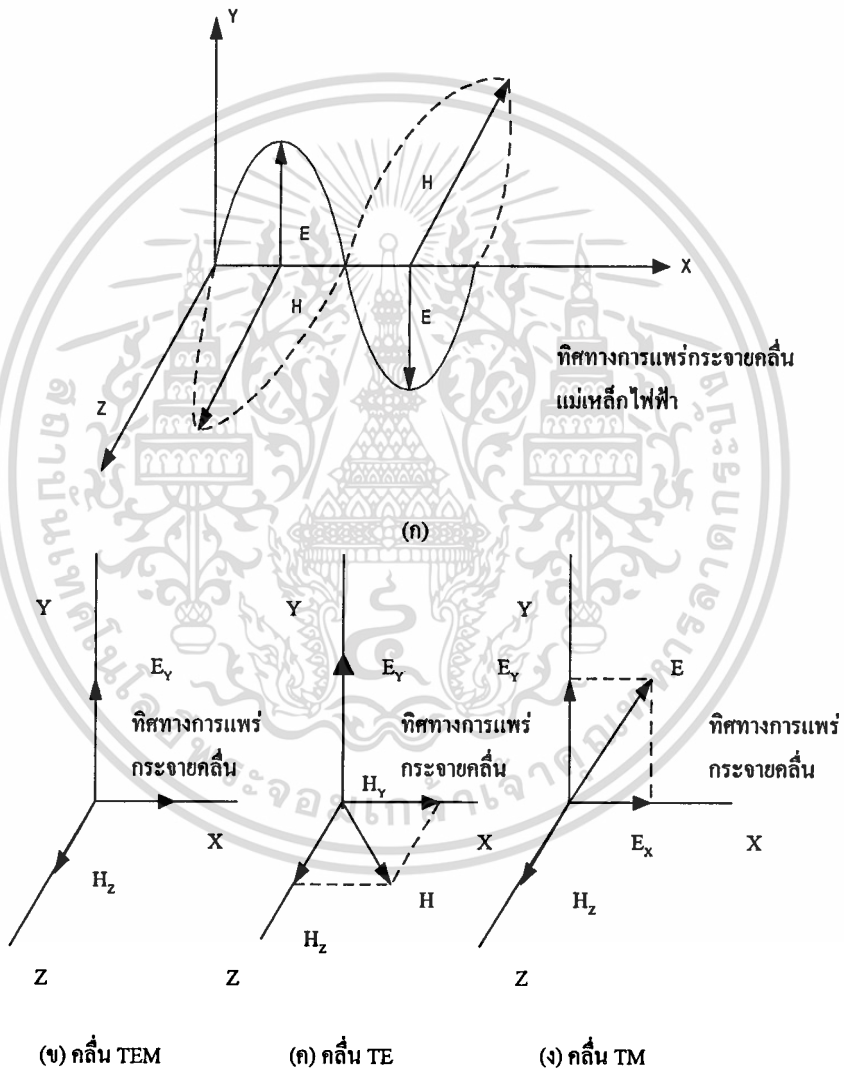
1) พอยดิงเวกเตอร์ (Poynting vector)

ทิศทางการเคลื่อนที่ของรูปคลื่นที่แม่เหล็กไฟฟ้า ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 สามารถหาได้ด้วยวิธีเวกเตอร์ที่มีชื่อเรียกว่า พอยนดิงเวกเตอร์ โดยสมการที่ 2.20

$$P = E \times H \tag{2.20}$$

(2.20)

เมื่อ P คือ กำลัง, (w/m^2)
 E คือ สนามไฟฟ้า, (V/m)
 H คือ สนามแม่เหล็ก, (A/m)

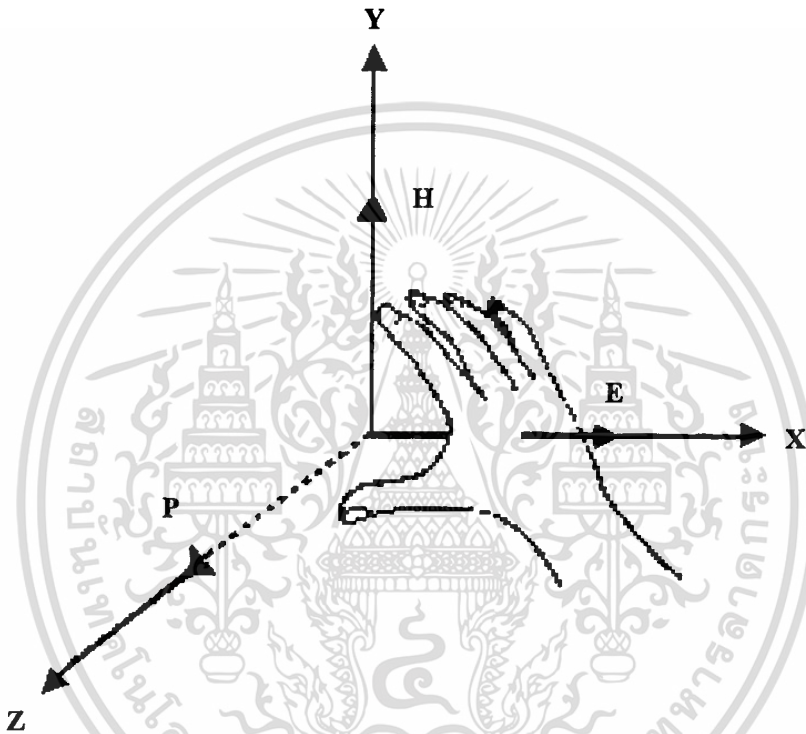


รูปที่ 2.3 รูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามทิศทางการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอยต์แวกเตอร์ หมายถึงค่ากำลัง (คิดเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทิศทางของแวกเตอร์หาได้จากสมการที่ 2.20 ความเร็วคลื่นเท่ากับความเร็วแสง หรือค่า c โดยที่ $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

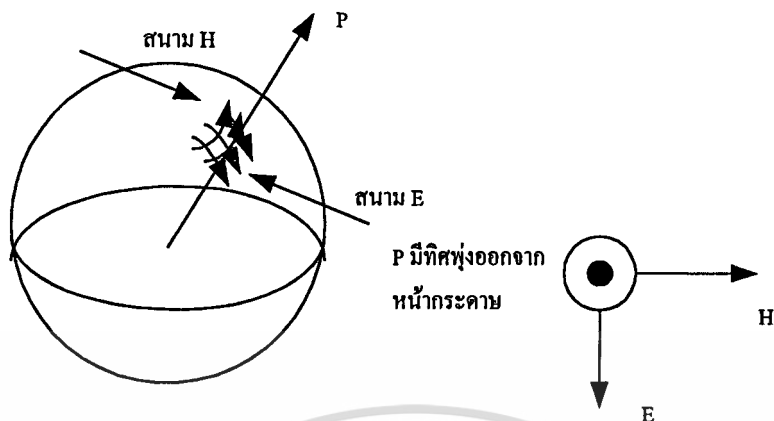
ทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H หาได้โดยกฎมือขวาดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การใช้กฎมือขวาหาทิศทางของคลื่น

2) หน้าคลื่นหรือเวฟฟรอนท์ (Wavefront)

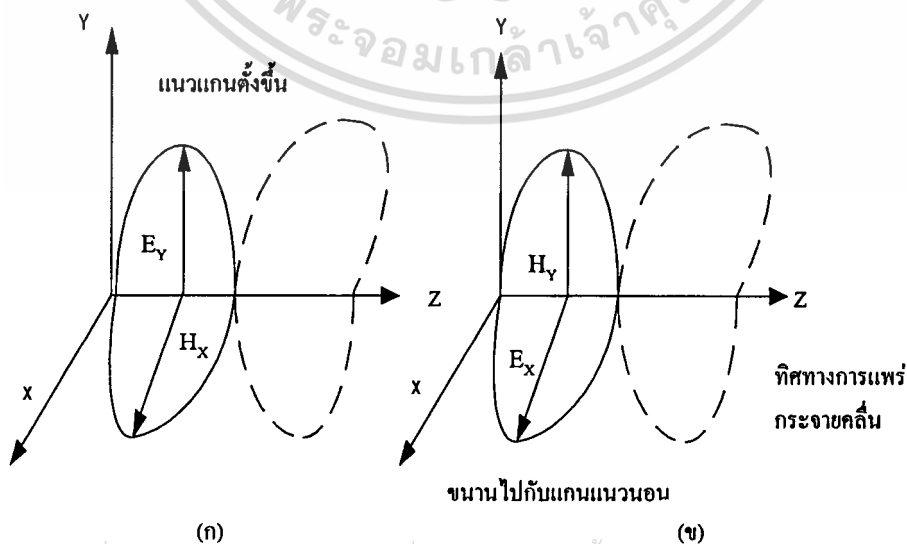
ในการพิจารณาการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวสายอากาศในเวลาชั่วขณะใดๆ ณ จุดซึ่งอยู่ห่างออกมาเป็นระยะทางคงที่ค่าหนึ่ง จะสามารถกำหนดรูปทรงกลม ซึ่งเสมือนเป็นตัวแทนของการมีผลของสนามไฟฟ้าเดียวกัน (Impulse) ตลอดทั่วทั้งผิวของรูปทรงกลมนั้น และรูปผิวทรงกลมของเฟสที่เหมือนกันนี้จะเคลื่อนที่ขยายตัวออกจากสายอากาศด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง ด้วยทิศทางที่หาได้จากพอยต์แวกเตอร์ พื้นที่ผิวทรงกลมนี้ให้ชื่อว่าเวฟฟรอนท์ ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ระยะห่างจากตัวสายอากาศออกไปที่ส่วนเล็กๆ ส่วนหนึ่งของพื้นผิวจะกลายเป็นพื้นราบหรือพื้นผิวจะไม่เป็นระนาบโค้งอีกแล้วนั้นจะได้สนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H ทำมุมตั้งฉากต่อกัน แสดงตามรูปที่ 2.5 ซึ่งเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลักษณะนี้ว่าคลื่นระนาบของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ทิศทางการกำลังของคลื่น

3) การจัดขั้วคลื่นหรือการโพลาไรเซชันของคลื่น

เพื่อที่จะนิยามหรือระบุลักษณะของเวฟฟรอนท์ จึงได้มีการหาวิธีต่างๆ วิธีหนึ่งที่ใช้คือ อ้างอิงกับการจัดวางตัวของสนาม E หรือ สนาม H ซึ่งมีชื่อเรียกว่าการจัดขั้วคลื่น โดยวิธีที่นิยมใช้ และเป็นหลักปฏิบัติกันทั่วไปจะอ้างอิงทิศทางของสนาม E ถ้าคลื่นระนาบที่เราพิจารณา มีสนาม E มีทิศตั้งขึ้น จะเรียกคลื่นลักษณะนี้ว่ามีการจัดขั้วคลื่นแบบเวอร์ติคอลลโพลาไรเซชัน (Vertical Polarization) แสดงดังรูปที่ 2.6 (ก) แต่กรณีสนาม E วางตัวอยู่ในแนวแกน X หรือสนาม E มีทิศทางขนานไปกับแนวระนาบเราเรียกคลื่นลักษณะนี้ว่า ฮอริซอลทอลโพลาไรเซชัน (Horizontal Polarization) ดังรูปที่ 2:6 (ข)

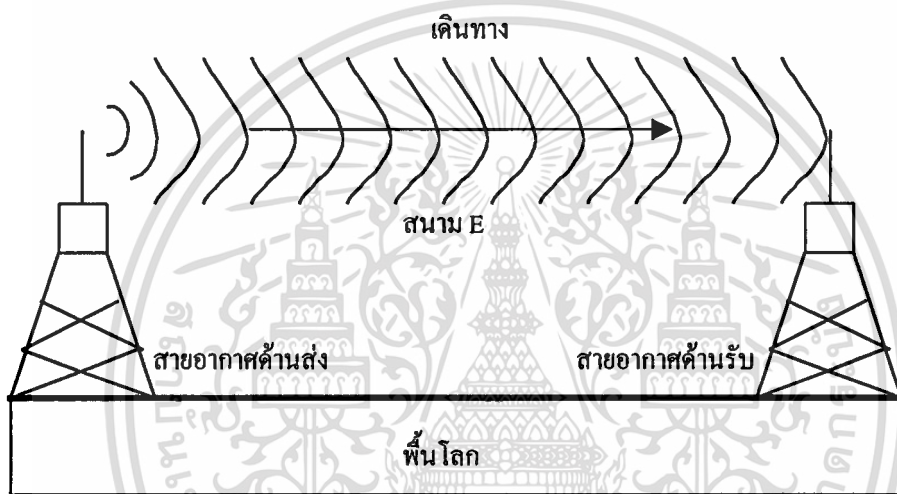


(ก)

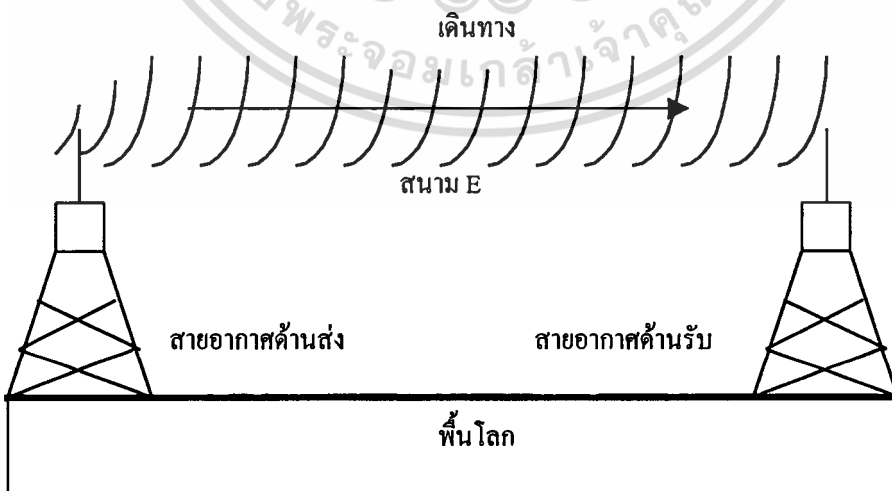
(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ 2.6 โพลาริเซชันของคลื่น เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้สายอากาศส่งและสายอากาศรับทำงานได้ผลดีที่สุด กล่าวคือ สามารถรับและส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด สายอากาศทั้งส่งและรับจำเป็นต้องวางตัวในแนวที่รับคลื่นแบบฮอริซอลทอลนี่ หรือถ้าสายอากาศส่งทำการส่งคลื่นแบบเวอร์ติคอลลโพลาไรเซชัน ทางด้านสายอากาศรับ จะต้องวางตัวในแนวที่รับคลื่นแบบเวอร์ติคอลลนี่ สัญญาณวิทยุที่ใช้การผสมคลื่น เชนจ์แอมพลิจูด หรือแอมพลิจูดมอดูเลชัน (AM) จะมีการจัดขั้วคลื่นแบบเวอร์ติคอลลโพลาไรเซชัน แสดงดังรูปที่ 2.7 (ก) ส่วนสัญญาณโทรทัศน์ที่ส่งออกจากสถานีต่างๆ นั้น จะมีการจัดขั้วคลื่นเป็นแบบฮอริซอลทอลโพลาไรเซชันดังรูปที่ 2.7 (ข)



(ก) เวอร์ติคอลลโพลาไรเซชัน



(ข) ฮอริซอลทอลโพลาไรเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 การส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ

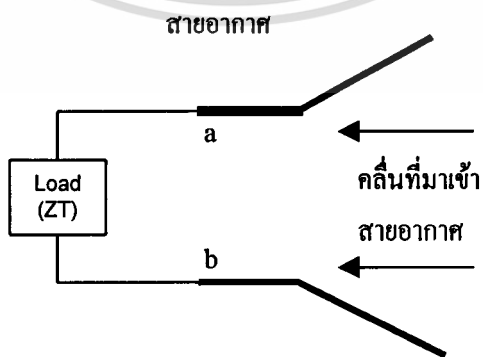
2.1.4 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) ของสายอากาศอย่างง่าย ๆ เป็นอิมพีแดนซ์ที่ขั้วสายอากาศนั้นเช่นกัน หรือเป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ในรูปที่ 2.8 (ก) แสดงให้เห็นขั้วของสายอากาศ อัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนี้ เมื่อไม่ได้ต่อตัวภาระ (Load) จะเป็นอิมพีแดนซ์ของสายอากาศซึ่งมีค่า

$$Z_A = R_A + jX_A \tag{2.21}$$

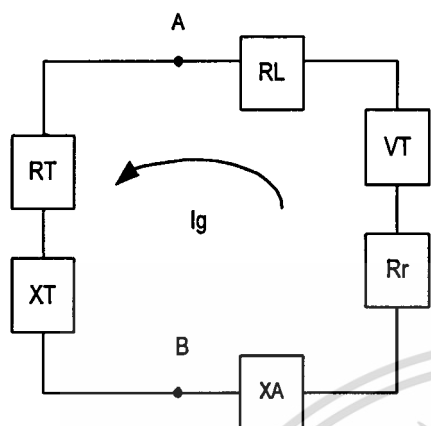
- เมื่อ Z_A คือ อิมพีแดนซ์ที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ, (โอห์ม)
- R_A คือ ความต้านทานที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ, (โอห์ม)
- X_A คือ รีแอกแตนซ์ที่ขั้ว a-b ของสายอากาศ, (โอห์ม)

โดยทั่วไปค่าความต้านทานในสมการที่ 2.21 จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (R_r) และความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ (R_l) โดยสมมติว่าสายอากาศถูกต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดที่มีอิมพีแดนซ์ภายใน (Z_g) เป็นสองส่วน คือ ความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (R_g) และรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ และให้สายอากาศทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งจะแสดงวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 2.8 (ก), (ข) และ (ค)

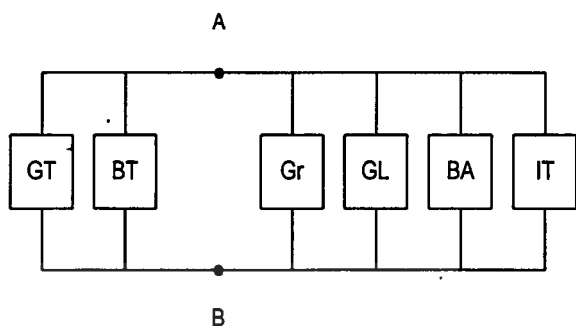


(ก) สายอากาศด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน (ก) มอนูอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) วงจรสมมูลย์เทวินิน



(ค) วงจรสมมูลย์นอร์ตัน

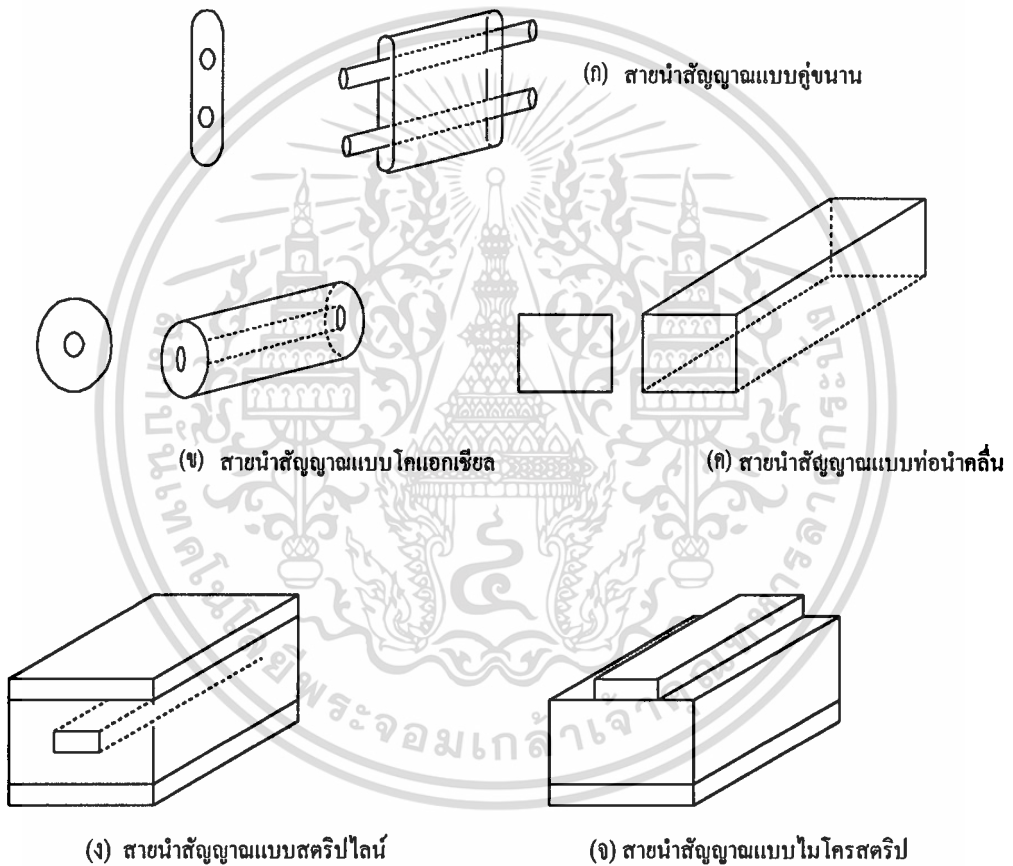
รูปที่ 2.8 สายอากาศและวงจรสมมูลย์

2.2 ทฤษฎีสายนำสัญญาณ

สายนำสัญญาณเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบสื่อสารทำการเชื่อมต่อ เพื่อถ่ายเทกำลังงานระหว่างเครื่องรับส่งและสายอากาศ โดยสายนำสัญญาณทุกชนิดจะต้องมีคุณสมบัติประจำตัว เรียกว่าอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสายนำสัญญาณ หรือ คาเรคเตอริสติกอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance)

กำลังงานจะมีการถ่ายเทจากแหล่งจ่ายไปสู่ภาระ จากอุปกรณ์ตัวหนึ่งไปสู่อุปกรณ์อีกตัวหนึ่งในระบบทางไฟฟ้า หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความถี่ต่างๆ การรับส่งกำลังงานที่ใช้กันคือ สายคู่ขนานเชื่อมระหว่างแหล่งกำเนิดกำลังงานกับภาระ แต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเข้าสู่ย่านไมโครเวฟ กำลังงานจะถูกส่งแผ่ไปในรูปสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ซึ่งในการถ่ายเทกำลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะใช้สายนำสัญญาณได้หลายรูปแบบ โดยเริ่มจากช่วงต้นความถี่ในย่านไมโครเวฟ จะใช้สายนำสัญญาณแบบสายคู่ขนาน (Two-Wire Line) ซึ่งประกอบด้วยสายตัวนำ 2 สายแยกห่างจากกันด้วยระยะห่างที่คงที่ โดยใช้ฉนวนคั่นกลางตามรูปที่ 2.9 (ก) สำหรับการใช้งานในช่วงกลางของความถี่ย่านไมโครเวฟ รวมทั้งการรับส่งในระยะใกล้ของช่วงความถี่สูงขึ้นไป นิยมใช้สายนำสัญญาณที่เรียกว่า สายโคแอกเซียล ซึ่งมีลักษณะเป็นสายตัวนำอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยตัวนำชั้นนอกโดยรักษาระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสองด้วยตัวคั่นกลาง (Spacer) ที่เป็นฉนวนหรือใช้ฉนวนที่เป็นสารตัวกลาง แสดงให้ดังรูปที่ 2.9 (ข) แต่ที่ความถี่สูงขึ้นไปนิยมใช้

ท่อนำคลื่นหรือ เวฟไกด์ (Waveguide) เป็นสายนำสัญญาณ ท่อนำคลื่นจะมีลักษณะเป็น ท่อกลวงสี่เหลี่ยมหรือกลม ดังรูปที่ 2.9 (ค) การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์หรือคอมโพเนนท์ในวงจร จะใช้ สตรีปไลน์ (Stripline) และ ไมโครสตรีป (Microstrip) เป็นสายนำสัญญาณ โดยสตรีปไลน์มีลักษณะเป็นแผ่นตัวนำขนาน 3 แผ่น คั่นด้วยสารตัวกลาง ดังรูปที่ 2.9 (ง) ส่วนไมโครสตรีปประกอบด้วยแผ่นตัวนำขนาน 2 แผ่น คั่นกลางไว้ด้วยสารตัวกลาง แสดงดังรูปที่ 2.9 (จ)



รูปที่ 2.9 รูปแบบของสายนำสัญญาณแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อน

1) การสะท้อนกลับจากตัวภาระตัวต้านทาน

การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาระที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ประจำตัวหรืออิมพีแดนซ์คุณสมบัติ ทำให้เกิดการสมดุลทางอิมพีแดนซ์ หรือเมทซซิ่งอิมพีแดนซ์ จึงไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณ และกำลังงานสูญเสียเป็นความร้อนที่ตัวภาระส่วนการเทอร์มิเนตปลายแบบปิด (ลัดวงจร) หรือแบบเปิด (เปิดวงจร) จะเกิดการสะท้อนกลับ ของกำลังงานทั้งหมด ในการใช้งานทั่วไปเป็นการต่อปลายสายด้วยตัวภาระตัวความต้านทานซึ่งไม่ใช่ อิมพีแดนซ์ประจำตัว ของสายนั้น ผลที่ได้คือกำลังงานจะถูกแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับ มาตามสาย อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียที่ตัวภาระเป็นความร้อน ในส่วนกำลังงานที่สะท้อนกลับจะมี ปริมาณเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน (Voltage Reflection Coefficient)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \tag{2.22}$$

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน
 V_r คือ แรงดันสะท้อนกลับ
 V_i คือ แรงดันตกกระทบ

จากสมการ ถ้าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันมีค่าเป็นบวก แสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกัน (In Phase) แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบ แรงดันสะท้อนกลับจะกลับเฟสตรงกันข้าม (Out of Phase)

การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของคลื่นแรงดันสะท้อนกลับได้เท่ากับ

$$\% \text{ แรงดันสะท้อนกลับ} = \Gamma \times 100 \tag{2.23}$$

กำลังงานหาได้จากแรงดันยกกำลังสองหารด้วยความต้านทานประจำตัว Z_0

$$\Gamma = \frac{V^2}{Z_0} \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลังงาน (Power Reflection Coefficient) จะมีค่าเท่ากับกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

$$\Gamma^2 = \frac{P_r}{P_i} \quad (2.25)$$

เมื่อ Γ^2 คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลังงาน
 P_r คือ กำลังงานสะท้อนกลับ, (วัตต์)
 P_i คือ กำลังงานตกกระทบ, (วัตต์)

พิจารณาในรูปเปอร์เซ็นต์ได้โดย

$$\% \text{ กำลังงานสะท้อนกลับ} = \Gamma^2 \times 100 \quad (2.26)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่างและผลรวมระหว่างตัวการะกับอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสาย

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.27)$$

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน
 Z_L คือ ความต้านทานตัวการะ, (โอห์ม)
 Z_0 คือ ความต้านทานประจำตัวของสายนำสัญญาณ, (โอห์ม)

จากสมการ จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็นบวก เมื่อ Z_L มากกว่า Z_0 และเป็นลบ เมื่อ Z_L น้อยกว่า Z_0

2) การสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่แมทซ์ทั้งสองปลายสายนำสัญญาณ

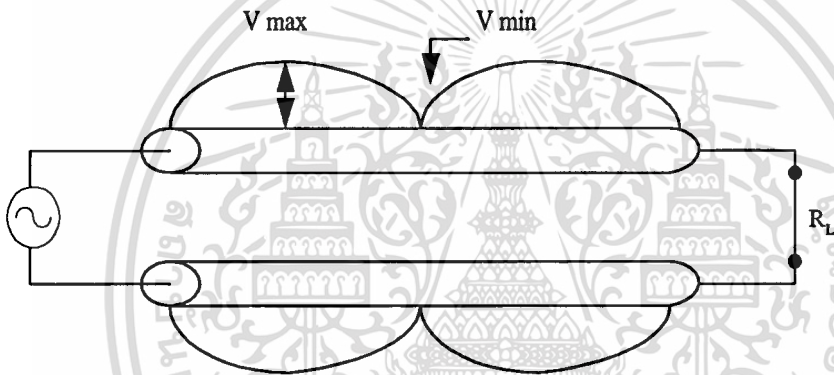
การสะท้อนกลับที่เกิดขึ้นในสายนำสัญญาณสามารถปรากฏได้ทั้งที่ต้นทาง และปลายทาง การสะท้อนกลับที่ปลายสายเนื่องจากการต่อตัวการะแบบไม่แมทซ์ เช่นเดียวกัน ถ้าเกิดคลื่นสะท้อนกลับย้อนกลับไปยังอินพุต และพบว่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณต้นทางเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบให้ฟรีๆ ซึ่งในเอกสารที่ส่งมอบให้ฟรีๆ นี้ เมื่อผู้ดูแลเห็นได้ชัดว่าประโยชน์ของการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่แมทช์กับความต้านทานประจำตัวของสายนำสัญญาณแล้ว จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับอีกครั้ง และจะเป็นเช่นนี้จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลย์

2.2.2 คลื่นนิ่ง

คลื่นนิ่งเกิดจากการรวม หรือบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับ โดยมีจุดร่วมอยู่ที่ระหว่างจุดร่วมทั้งหลาย ลูกคลื่นจะเปลี่ยนขึ้นไปจนถึงจุดสูงสุด และลดลงจนถึงค่าต่ำสุด ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 2.10 และคลื่นนิ่งจะสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีความถี่ของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.10 จุดแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นนิ่ง

2.2.3 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ค่าแรงดัน V_{max} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกัน

$$V_{max} (V) = V_i + V_r \quad (2.28)$$

ค่าแรงดันต่ำสุด V_{min} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงข้าม

$$V_{min} (V) = V_i - V_r \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นอัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุด เรียกว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันการคำนวณ (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR) เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (2.30)$$

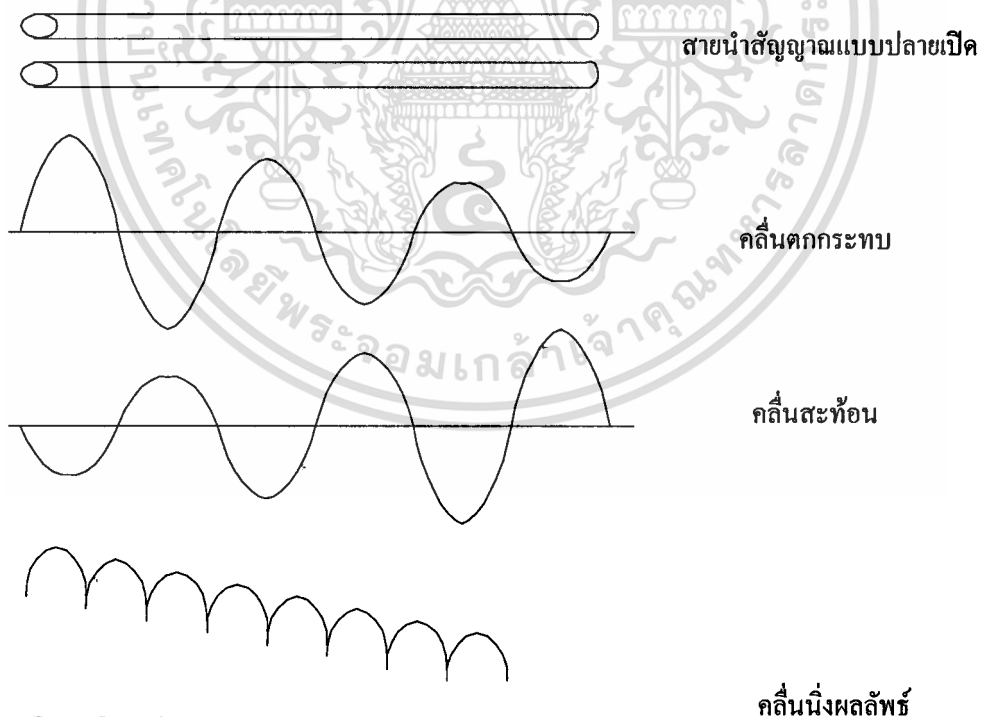
อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน หรือ VSWR แสดงในหน่วย dB จะมีชื่อเรียกว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR)

$$SWR \text{ (dB)} = 20 \log VSWR \quad (2.31)$$

2.2.4 การสูญเสียของสายนำสัญญาณ

1) การสูญเสียบนสายนำสัญญาณ

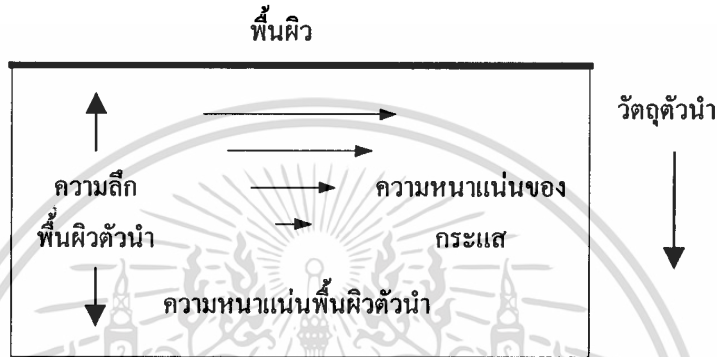
ความต้านทานของสายนำสัญญาณ จะทำให้แอมพลิจูดของคลื่นแรงดันและกระแสที่ตกกระทบ และสะท้อนกลับ ถูกลดทอนอย่างต่อเนื่อง ผลตามมามีคือ ทำให้คลื่นนิ่ง ซึ่งเกิดจากการรวมกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับมีรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปด้วย ดังรูปที่ 2.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.11 การลดทอนของคลื่นแรงดันเนื่องจากการสูญเสียในสาย ซึ่งประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การสูญเสียเนื่องจากผิวตัวนำ (Skin Effect)

เมื่อความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แท่งตัวนำเพิ่มขึ้น ความลึกของกระแสที่ผิวตัวนำจะลดลง ความลึกของกระแสที่ผิวตัวนำนี้มีชื่อเรียกว่า ความลึกของพื้นผิวตัวนำ ที่ชั้นความลึก หรือระยะความลึกจากผิวตัวนำซึ่งมีความหนาแน่นของกระแสลดลงเป็น $1/\varepsilon$ ของกระแสที่พื้นผิว ($\varepsilon = 2.718$) แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การลดลงของความหนาแน่นกระแสเนื่องจากการสูญเสียเนื่องจากผิวตัวนำ

ความลึกของผิวตัวนำนี้ จะมีค่าน้อยมากขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ งาน ค่าเพอมีอะบิลิตีของตัวกลาง และสภาพความเป็นตัวนำ

$$\text{การสูญเสียเนื่องจากผิวตัวนำ} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}} \quad (2.32)$$

เมื่อ f คือ ความถี่, (Hz)
 μ คือ ค่าเพอมีอะบิลิตี, (H/m)
 γ คือ สภาพความเป็นตัวนำ, (S/m)

เพราะว่าสภาพความต้านทานเป็นส่วนกลับหรือแปรผกผันกับสภาพเป็นตัวนำ

$$r = \frac{1}{\gamma} \quad (2.33)$$

และสมการที่ 2.32 จะได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{การสูญเสียเนื่องจากผิวตัวนำ (m)} = \sqrt{\frac{r}{\pi f \mu}} \quad (2.34)$$

เมื่อ	f	คือ ความถี่, (Hz)
	μ	คือ ค่าเพอมีอับิลิตี, (H/m)
	γ	คือ ความต้านทาน, (Ω/m)

การที่ระยะความถี่ถูกลดลงที่ความถี่สูงนั้น ทำให้ความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณพื้นผิวตัวนำเพิ่มขึ้น แต่ถ้าทำการลดพื้นที่หน้าตัดตัวนำจะมีผลทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น และกระแสลดลงไปด้วย ค่าความต้านทานของ โลหะที่ตัวนำที่ใช้งาน แสดงไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าความต้านทานของวัสดุชนิดต่างๆ

โลหะตัวนำ	หน่วย โอห์ม/เมตร
อลูมิเนียม	2.620×10^{-8}
ทองคำ	2.439×10^{-8}
ทองแดง	1.724×10^{-8}
เงิน	1.620×10^{-8}

ในการใช้งานสามารถลดผลจากความสูญเสียเนื่องจากผิวของตัวนำ ได้โดยการชุบหรือเคลือบผิวด้วยโลหะซึ่งมีความต้านทานต่ำแต่มีราคาสูง เช่น ทองคำ เป็นต้น ซึ่งวิธีการนี้นิยมใช้กันในอุปกรณ์ หรือเครื่องมือที่ใช้งานในความถี่สูง เช่น การฉาบผิวด้านในของท่อนำคลื่นด้วยทองหรือเงิน เพื่อลดความต้านทานที่ผิวตัวนำ เป็นต้น

2.2.5 การลดทอนสัญญาณ

ตามหลักการของวงจรไฟฟ้า นั้น เมื่อรู้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอินพุตของวงจร และรู้ค่ากระแสที่ไหลเข้าไปสามารถหาการลดทอนสัญญาณได้ โดยการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความยาวหารด้วยกำลังไฟฟ้าที่จุดนั้นดังสูตรต่อไปนี้

$$L = -\frac{1}{P} \frac{dP}{dz} = \frac{2\alpha e^{-2\alpha z}}{e^{-2\alpha z}} = 2\alpha \quad (\text{Nep/m}) \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

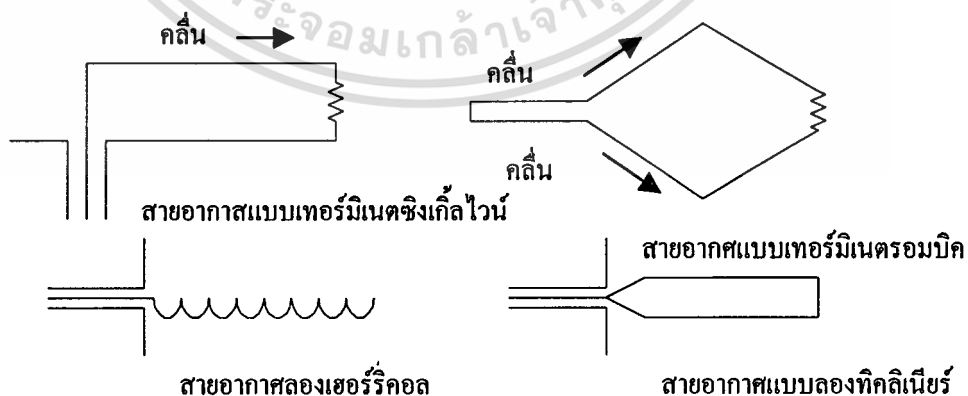
ประกอบด้วยตัวนำในหลายรูปแบบ ส่วนใหญ่แล้วมักใช้ลวดตัวนำ มีบางแบบที่ใช้แท่งตัวนำ หรือท่อตัวนำ ซึ่งลวดตัวนำในที่นี้ หมายถึงตัวนำที่มีขนาดของภาคตัดขวางเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาว ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ร่อออกจากลวดตัวนำ มีค่าขึ้นอยู่กับความยาวของลวดตัวนำกับขนาดของกระแสที่ไหลอยู่ภายใน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับ แรงดันไฟฟ้า ที่ตกคร่อมลวดตัวนำด้วย แต่จะเป็นการสะดวกมากกว่าถ้าวัดในรูปของกระแส อาจกล่าวได้ว่า ความเข้มสนามเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของกระแส ดังนั้น จึงต้องให้มีกระแสในขนาดมาก เท่าที่เป็นไปได้ผ่านลวดตัวนำ เพื่อให้เกิดกำลังส่งปริมาณมากขึ้น ในวงจรทั่วไปจะประกอบด้วยพารามิเตอร์สองตัวคือ ค่าความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์ เป็นค่าทางเชิงซ้อนของอิมพีแดนซ์ ในวงจรกระแสสลับพบว่า ถ้าค่ารีแอกแตนซ์มีน้อยลงจนหมดไปทำให้ปริมาณกระแสในวงจรมีค่ามากที่สุด หรือในอีกแง่หนึ่งเรียกว่าวงจรเรโซแนนซ์ (Resonant) ที่ความถี่ใช้งาน เช่นเดียวกับกรณีสายอากาศ เมื่อกระแสที่ไหลผ่านมีค่ามากที่สุด ทำให้มีการแผ่กระจายคลื่นมากที่สุด นั่นคือสายอากาศจะถูกเรโซแนนซ์

2.3.2 ชนิดของสายอากาศ

สายอากาศชนิดหลักๆมีดังนี้

1) สายอากาศลวดตัวนำ (Wire Antenna)

จัดเป็นสายอากาศที่เราคุ้นเคยเป็นอย่างดี มีใช้งานในทุกรูปแบบอย่างเช่น บินอาคาร, รถยนต์, เรือ, เครื่องบิน, ยานอวกาศ และอื่นๆ รูปร่างของสายอากาศแบบลวดตัวนำ ยังแยกย่อยได้อีก เช่น แบบเส้นตรง (ไดโพล) แบบรูป (วนเป็นรอบ) และแบบวงก้นหอย (คล้ายสปริง) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศชนิดลวดตัวนำ

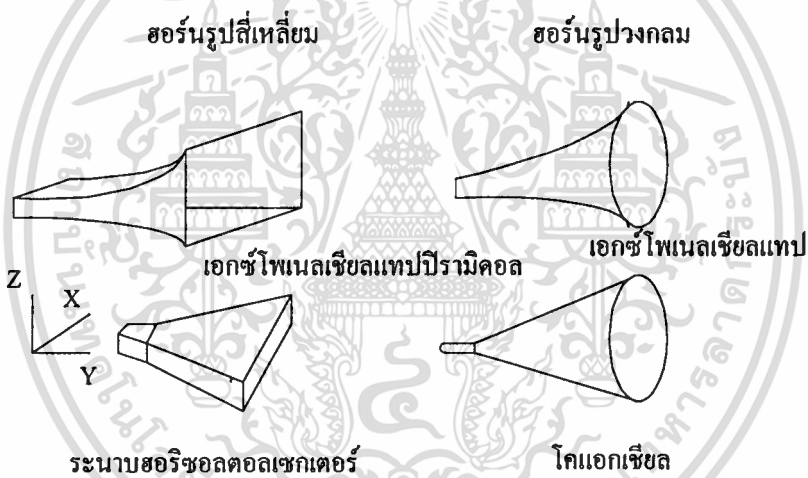
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

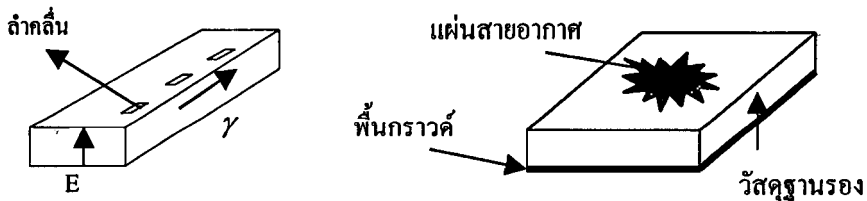
สายอากาศแบบลูป (Loop) ไม่จำเป็นต้องเป็นแบบวงกลม อาจมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า วงรี หรือลักษณะอื่น ส่วนลูปชนิดวงกลมนั้นจัดว่ามีการใช้งานมากที่สุด เพราะว่าง่ายในการสร้าง

2) สายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ (Aperture Antenna)

สายอากาศชนิดนี้เริ่มมีความนิยมมากขึ้นจากเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานย่านความถี่สูง ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ด้านเครื่องบิน หรือยานอวกาศ เนื่องจากความสะดวกในการติดตั้ง และยังสามารถหุ้มด้วยฉนวนหรือวัสดุที่ไม่เป็นสื่อไฟฟ้าได้อีกด้วย เพื่อป้องกันสภาพที่เป็นอันตรายต่อระบบสื่อสาร อีกทั้งยังมีให้เลือกใช้งานได้หลายรูปแบบ เพราะมีทั้ง รูปร่างแปดเหลี่ยม (Hex), รูปร่างวงรี และรวมถึงท่อนำคลื่นอีกด้วย รูปแบบต่างๆ ของสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ แสดงในรูปที่ 2.14



(ก) สายอากาศแบบฮอร์นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและวงกลม



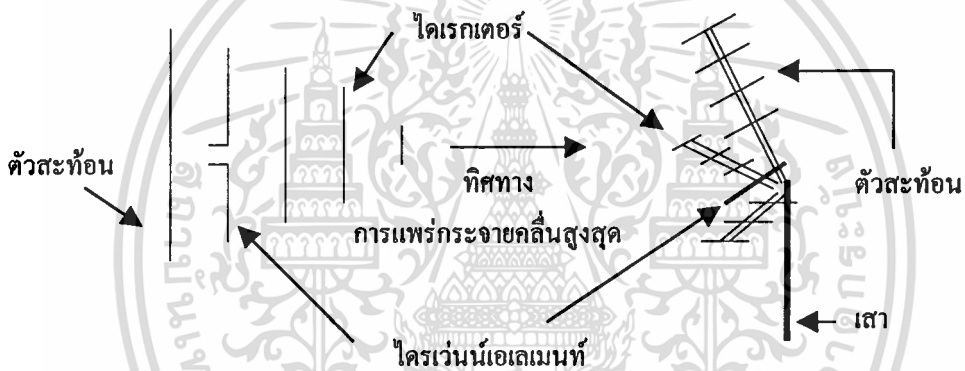
(ข) ท่อนำคลื่นแบบสลอต

(ค) สายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 2.14 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) สายอากาศแบบแถวลำดับ (Array Antenna)

การประยุกต์ใช้ในงานสายอากาศโดยส่วนมากแล้ว จะมีคุณสมบัติของการแพร่คลื่นไม่เหมือนกัน ทำให้เกิดการนำเอาเอเลเมนต์ (Element) มาใช้งานร่วมกัน เพื่อสนองความต้องการใช้งานต่างๆ ซึ่งสามารถกำหนดให้ทิศทางหลักในการแพร่คลื่นของสายอากาศอยู่ทางทิศใดก็ได้ ซึ่งการนำสายอากาศหลายเอเลเมนต์มาต่อเรียงกันเป็นแถวเรียกว่า “อาร์เรย์” มีผลทำให้อัตราการขยายเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสามารถควบคุมทิศทางการแพร่คลื่นได้อีกด้วย สามารถที่จะเลือกใช้งานสายอากาศแถวลำดับได้หลายรูปแบบ มีทั้งยากิหรือที่รู้จักกันดี คือสายอากาศที่ใช้ติดบนอาคารรับรายการโทรทัศน์ แบบอะเพอร์เจอร์ และแบบช่องนำคลื่น ตัวอย่างการใช้งานสายอากาศแบบแถวลำดับแสดงในรูปที่ 2.15

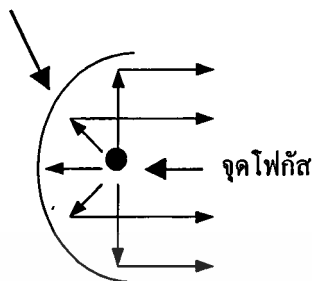


รูปที่ 2.15 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศแถวลำดับ

4) สายอากาศแบบตัวสะท้อน (Reflector Antenna)

สายอากาศแบบตัวสะท้อนนี้ถูกพัฒนาอย่างมาก เนื่องจากต้องนำมาใช้งานสื่อสารระยะไกลมาก จึงต้องมีการพัฒนาสายอากาศส่ง หรือรับคลื่นที่สามารถเดินทางได้เป็นล้านไมล์ สายอากาศชนิดนี้ยังมีขนาดใหญ่มากจะให้อัตราขยายสูงมากตามไปด้วย ทำให้สามารถส่งหรือรับคลื่นในระยะไกลมากๆ ซึ่งสายอากาศที่ถูกนำมาใช้งานอย่างมากเป็นแบบตัวสะท้อนพาราโบลิก (Parabolic Reflector) ดังแสดงในรูปที่ 2.16

แบบแผ่นสะท้อนรูปพาราโบลิก



รูปที่ 2.16 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศชนิดตัวสะท้อน

5) สายอากาศแบบเลนส์ (Lens Antenna)

สายอากาศแบบเลนส์เป็นสายอากาศที่ถูกออกแบบโดยใช้หลักการของเลนส์ โดยใช้วัสดุสารตัวกลางทำหน้าที่เป็นเลนส์แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. Delay Lens เป็นสายอากาศแบบที่เพิ่มระยะทางของคลื่น คือ มีลักษณะเป็นเลนส์นูน
2. Fast Lens เป็นสายอากาศแบบที่ลดระยะทางของคลื่น คือ มีลักษณะเป็นเลนส์เว้า

เพื่อรวมคลื่นที่แพร่ออกไป หรือส่งมาให้ไปยังทิศทางที่ต้องการได้ สำหรับการประยุกต์ใช้งาน เช่นเดียวกับแบบสะท้อนคลื่นพาราโบลิก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่สูงมากๆ จะใช้ได้ผลดี สายอากาศแบบเลนส์ที่ถูกแบ่งออกตามรูปร่างที่สร้างขึ้นไม่แตกต่างจากเลนส์ชนิดต่างๆ ที่เคยรู้จักเท่าใดนัก แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศแบบเลนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานที่มอบหมายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสรุปแล้วสายอากาศในทางทฤษฎีจะสามารถนำพลังงานทั้งหมดที่มาจากเครื่องส่งไปออกอากาศได้โดยไม่มี การสูญเสียเลย แต่สายอากาศที่มีคุณภาพขนาดนี้ถือเป็นสายอากาศในอุดมคติ

สายอากาศมีมากมายหลากหลายชนิด ซึ่งแต่ละแบบสร้างให้มีรูปแบบการแพร่คลื่น และช่วงความถี่ของสัญญาณที่ใช้งานแตกต่างกันออกไปให้เหมาะสมสำหรับงานที่ประยุกต์ใช้งาน

2.4 สายอากาศไมโครสตริป

2.4.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป

การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศแบบไมโครสตริป มีการค้นคว้า และสรุปทฤษฎีสามารถรวบรวมเป็นหัวข้อการวิเคราะห์ได้ 4 แบบ คือ

1) วิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีสายส่ง

ทฤษฎีสายส่งเป็นการวิเคราะห์เบื้องต้นแบบง่าย สำหรับสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทฤษฎีจะกำหนดโดยให้ตัวสายอากาศมีช่องแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งขนานกัน 2 ช่อง ดังแสดงดังรูปที่ 2.18

จากรูปขอบเขตของตัวนำซึ่งทำหน้าที่แพร่คลื่นมีความยาว L กำหนดให้เป็นช่องแพร่กระจายคลื่นไปในฮาล์ฟสเปซ (Half Space) โดยแอดมิตแตนซ์ของช่องแพร่คลื่นมีค่าดังสมการที่ 2.37

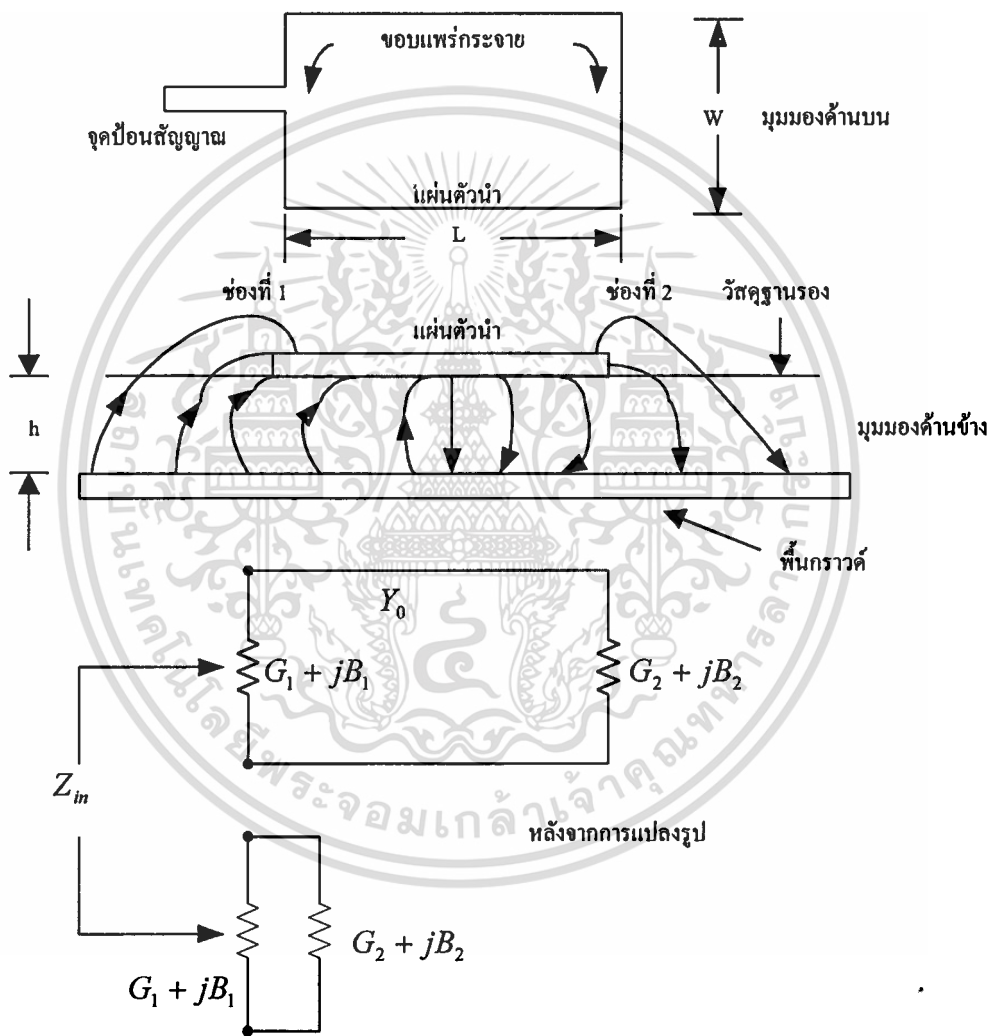
$$G_1 + jB_1 = \frac{\pi h}{\lambda_0 z_0} [1 + j(1 - 0.636) \ln k_0 w_0] \quad (2.37)$$

เมื่อ	λ_0	คือ	ความยาวคลื่นของสายอากาศ
	Z_0	คือ	อิมพีแดนซ์คุณสมบัติ
	k_0	คือ	เวฟนัมเบอร์ในอวกาศ
	w_0	คือ	ความกว้างของช่องแพร่คลื่น
	h	คือ	ความหนาของสารตัวกลาง

เมื่อคิดว่าช่องแพร่คลื่นทั้ง 2 เหมือนกันทุกประการจะได้ค่าแอดมิตแตนซ์ในช่องเปิด ที่ 2 เท่ากัน (ไม่คิด Fringing Effect) และถ้าสนามไฟฟ้าคงที่ตลอดระหว่างช่องเปิดทั้ง 2 เปิด จะได้ค่าแรกเตอร์ริสติกแอดมิตแตนซ์ (Characteristic Admittance) นั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_0 = \frac{a\sqrt{\epsilon_r}}{hz_0} \tag{2.38}$$

เมื่อ h คือ ความหนาของแผ่นฐาน
 ϵ_r คือ ค่าเปอร์มิติวิตีสัมพัทธ์



รูปที่ 2.18 แบบจำลองสายส่งสำหรับสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากต้องการใช้สนามที่ช่องเปิดทั้งสองมีเฟสตรงข้ามกัน 180° ดังนั้น จึงได้ขนาดความยาว 1 น้อยกว่าเล็กน้อย อาจมีค่า 0.48 ถึง 0.49 การที่ความยาว 1 ลดลงเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของช่องแพร่คลื่น แพลตเตอร์ที่ทำให้เกิดการลดความยาวเรียกว่า Factor Q สำหรับช่องเปิดที่ 2 หลังจาก Transformation แล้วจะได้

$$\bar{G}_2 + j\bar{B}_2 = G_1 + jB_1 \quad (2.39)$$

ดังนั้น ที่ความถี่เรโซแนนซ์ได้อินพุตแอดมิตแตนซ์ เป็น

$$\begin{aligned} Y_{in} &= (G_1 + jB_1) + (\bar{G}_2 + j\bar{B}_2) \\ &= 2G_1 \end{aligned} \quad (2.40)$$

ในการออกแบบขนาด w เท่ากับ 0.49λ แทนค่า w ในสมการได้ $G_1 = 0.00417$ ดังนั้น ความถี่เรโซแนนซ์คำนวณจากสูตร

$$f_r = \frac{c}{\lambda_d \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{2l \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.41)$$

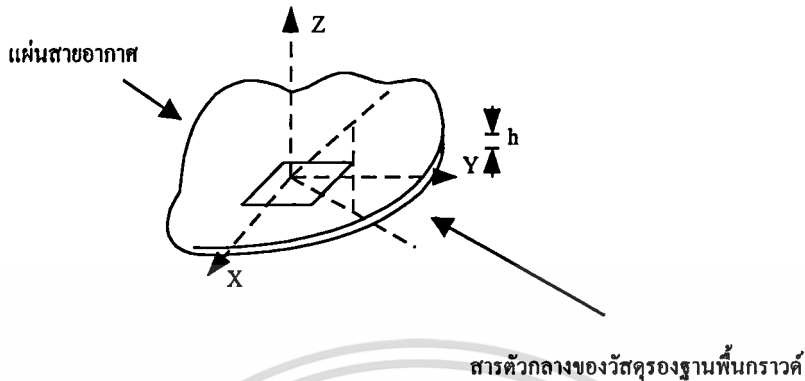
ข้อดีของทฤษฎีสายส่งคือ พิจารณาได้ง่าย ไม่ใช้สมการที่ยุ่งยากซับซ้อน สามารถหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ และขนาด Input Resistance ได้จากสมการที่ 2.40 และ 2.41

2) วิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีช่องเปิด (Aperture Model)

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปมีหลายวิธีด้วยกัน การวิเคราะห์ในลักษณะของช่องเปิด (Aperture) นับว่ามีความสำคัญ และพัฒนามาจากแบบทฤษฎีสายส่ง ทฤษฎีช่องเปิดสามารถใช้คำนวณหาการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากช่องเปิด และคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศได้ ทฤษฎีที่จะอธิบายต่อไปนี้จะใช้สายอากาศต้นแบบเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่อย่างไรก็ตามสามารถนำไปประยุกต์อธิบายกับแบบอื่นๆ เช่น สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมได้

สายอากาศซึ่งจะพิจารณาต่อไปนี้จะประกอบด้วยสารตัวกลางขนาดอนันต์อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำขนาดใหญ่เป็นอนันต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์ (Ground Plane) และแผ่นตัวนำด้านบนมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากำหนดผิวตัวนำด้านบนเป็นพื้นผิว ดังรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แกนประสานร่วมของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การคำนวณการแพร่คลื่นคิดจากหลักการสมมูลย์ (Equivalent Principle) สนามในฮาร์ฟสเปซ z มากกว่า 0 นั้น จะมีส่วนประกอบผิวโลกของสนามไฟฟ้าในระนาบ ถ้าผิวดำนำ S เป็นตัวนำที่เป็นอุดมคติจะได้ว่า

$$\bar{E}_t = 0 \quad (2.42)$$

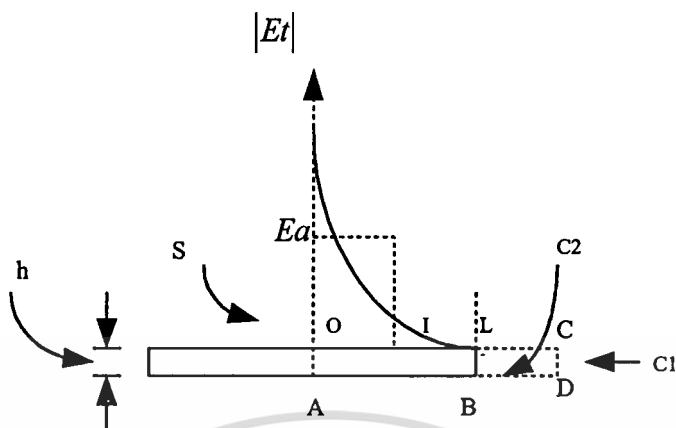
ตลอดบนผิวดำนำ S ที่ระยะห่างจากผิวดำนำ S มากๆ ในระนาบ $z=0$ ค่าของ \bar{E}_t จะลดลงเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงว่าสนาม \bar{E}_t จะแพร่กระจายคลื่นได้เฉพาะระยะใกล้กับพื้นผิว S เท่านั้น ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\int_0^\infty |\bar{E}_t| dl \cong \int_0^L |\bar{E}_t| dl \quad (2.43)$$

เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นในอากาศว่าง นั่นคือ L น้อยกว่า λ_0

จากที่กล่าวมาแล้วในระนาบของ $z=0$ \bar{E}_t จะมีค่าน้อยมากในการแพร่กระจายคลื่นด้วยเหตุผลดังกล่าว จะประมาณขนาดของสนามไฟฟ้า $|\bar{E}_t|$ ด้วยค่าคงที่ E_0 ตลอดระยะทาง $2a$ จากขอบริมตัวนำ และเมื่อเกินระยะนี้แล้วพบว่า $\bar{E}_t = 0$ ดังรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 สนามบริเวณขอบของพื้นผิว S

ดังนั้น สมการเป็น

$$\int_0^L |\vec{E}_r| dl = E_a \cdot 2a \quad (2.44)$$

ค่าของ E_z จะสอดคล้องกับส่วนประกอบ ในแนวแกน z ของสนามไฟฟ้า ในวัสดุฐาน รอบที่ขอบของผิวดำนำ S

เมื่ออินทิเกรตรอบพื้นผิวปิด c_1 และ c_2 จะได้

$$\oint_{c_1} \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (2.45)$$

$$\oint_{c_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (2.46)$$

จากสมการ 2 สมการข้างบนและสมการที่ 2.43 สรุปได้ว่า

$$\int_{-LB} \vec{E} \cdot d\vec{l} \cong \int_{CD} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.47)$$

จากสมการที่ 2.45 และ 2.47 ได้ว่า

$$E_a \cdot 2a = E_z \cdot h \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ โดยถือว่า E_z มีค่าคงที่ตลอดความหนาของสารวัสดุฐานรอง

สำหรับการแปรค่าของ E_z ตามแนวขอบของ S คำนวณโดยการกำหนดให้สายอากาศ มีลักษณะเป็น Closed Resonator Model ประกอบด้วยกล่องที่มีตัวนำด้านบนแผ่น (Patch) และ ด้านล่าง (Ground Plane) โดยมีผนังตัวนำแม่เหล็กด้านข้างภายในกล่องประกอบด้วยวัสดุฐานรอง ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุฐานรองของสายอากาศสนาม E_z ของโหมด mn ในสายอากาศไมโครสตริป รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีขนาด $2b'$ และ $2c'$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการดังสมการที่ 2.49

$$E_z = E_0 [\cos m\pi x / (2b')] x [\cos n\pi y / (2c')] \quad (2.49)$$

โดย E_0 คือขนาดสูงสุดของสนาม E_z

จากการอธิบายทั้งหมดสามารถสรุปเป็นช่องของสายอากาศแบบไมโครสตริปได้ว่า ประกอบด้วยระนาบตัวนำที่ $z = 0$ ขนาดอนันต์มีช่องเปิดขนาดกว้าง $2a$ รอบพื้นที่ผิว S และมีสนาม ไฟฟ้าขนาด E_a ทฤษฎีของสายอากาศแบบไมโครสตริปแก้สมการโดยใช้ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Fourier Transform)

3) วิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีแบบจำลองโพรง (Cavity Model)

ถึงแม้ว่าทฤษฎีสายส่งการพิจารณากำลังไฟฟ้าจะสามารถทำได้ง่ายแต่มีข้อเสีย คือใช้ได้ เฉพาะไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และต้องมีการหาค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q Factor) ด้วยข้อกำหนดคือต้องให้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform) ตลอดช่วงของการแพร่คลื่น แต่ไม่สามารถ อธิบายเกี่ยวกับการป้อนกำลังงานไฟฟ้าได้ ข้อบกพร่องดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยใช้ทฤษฎีแบบ จำลองโพรง โดยการพิจารณาให้แผ่นไมโครสตริปมีท่อนำคลื่นเป็นผนังแม่เหล็กอยู่ในโหมด TM_2 สนามระหว่างตัวไมโครสตริปกับแผ่นกราวด์ พิจารณาในทอมแผ่นเรโซแนนซ์ (Resonant Mode) ของท่อนำคลื่น ผลของการแพร่คลื่นและการสูญเสียต่างๆ พิจารณาจากการเพิ่มแทนเจนต์การ สูญเสีย (Loss Tangent) ของวัสดุฐานรอง หรือจากเงื่อนไขขอบเขตของผนังแม่เหล็ก (Boundary Condition) ผลที่ได้จากการใช้ทฤษฎีนี้จะใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก เช่น การหาค่า อินพุตอิมพีแดนซ์, ความถี่เรโซแนนซ์ เป็นต้น

2.4.2 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

สายส่งไมโครสตริปที่ใช้ในงานอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 กล่าวคือจะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแคบๆ อยู่บนฐานรอง ซึ่งเป็นสารสารถูกกลาง และ ด้านล่างของวัสดุฐานรองเป็นผิวโลหะ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในฐานรอง เอกภพบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบโลหะแคบๆ กับผิวโลหะด้านล่าง ความหนาของวัสดุฐานรองนั้นประมาณการค่า ใน 2 มม. หรือต่ำกว่าลงมา ความกว้างของสตริปนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติที่ต้องการใช้

ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป สำหรับความหนาของตัวสตริปนั้นจะมีค่าประมาณ $5 \mu\text{m}$ หรือ $10 \mu\text{m}$ ขึ้นอยู่กับการใช้เทคโนโลยีแบบฟิล์มบางหรือแบบฟิล์มหนาในการสร้างสตริปนั้น สำหรับวัสดุฐานรอง ที่ใช้งานกันอยู่กันทั่วไปจะมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ดังตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของวัสดุฐานรองชนิดต่างๆ และคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุฐานรองซึ่งได้แก่ ค่าคงตัวสารตัวกลางสัมพัทธ์ ค่า $\tan \delta$ ที่ความถี่ 10 GHz ค่าคงตัวของการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ความขรุขระของผิว และความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) ความหมายของคุณสมบัติที่กล่าวมา เป็นดังนี้ คือ ค่าคงตัวสารตัวกลางสัมพัทธ์จะบ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสาร สารตัวกลางโดยเทียบกับอากาศว่าง ค่านี้จะส่งผลทำให้อิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติของไมโครสตริปเปลี่ยนแปลง ค่า $\tan \delta$ นั้นคือค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสเชิงขั้ว เมื่อนำสารตัวกลางนั้นไปคั่นอยู่ระหว่างแผ่นโลหะคู่หนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นคาปาซิแตนซ์ เมื่อ $\epsilon = \epsilon' - j\sigma/\omega$ ค่า $\tan \delta$ จะเท่ากับ $\sigma/\omega\epsilon'$ ซึ่งค่านี้แสดงว่าสารตัวกลางนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใดโดยที่ยิ่งต่ำกว่าก็ยิ่งดี ค่าคงตัวของการนำความร้อนจะแสดงให้เห็นว่า สารตัวกลางนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ค่านี้ยิ่งสูงมากยิ่งดี ความขรุขระของผิวนั้นจัดว่ามีความสำคัญมากเช่นเดียวกัน เพราะถ้าผิวขรุขระเกินไปจะทำให้การใช้เทคโนโลยีแบบฟิล์มบางทำได้ลำบาก นอกจากนั้นจะมีผลกระทบต่อการส่งผ่านของคลื่นไปตามไมโครสตริปด้วย เพราะฉะนั้นความขรุขระน้อยดีกว่า สำหรับความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้านี้จะบ่งบอกถึงความสามารถในการรับกำลังคลื่นด้วย ดังนั้น ค่าที่สูงจะดีกว่าค่าต่ำ

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุฐานรองแบบต่างๆ ตามตารางที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าวัสดุฐานรองแบบอะลูมินามีคุณสมบัติในหลายๆ ข้อถึงแม้จะมีความขรุขระไม่ต่ำมากนัก ดังนั้น อะลูมินาจึงเป็นวัสดุฐานรองที่นิยมกันมาก สำหรับ GaAs นั้นจะใช้ในกรณีที่ทำวงจรรวมของไมโครเวฟเป็นหลัก เนื่องจาก GaAs เป็นวัสดุฐานรองที่ทำชั้นส่วนแอคทีฟสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ ในย่านไมโครเวฟได้ดี

2.4.3 วัสดุพื้นรองที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริป

นักออกแบบสายอากาศพบว่าส่วนประกอบของสายอากาศไมโครสตริปที่มีผลต่อคุณสมบัติการแพร่คลื่นอย่างมาก คือ สารตัวกลางในวัสดุฐานรอง โดยที่ค่า ϵ_r ของสายอากาศ จะต้องรู้ค่าที่แน่นอน และคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด การเปลี่ยนแปลงของความถี่ในวัสดุฐานรอง มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของสารตัวกลางดังนี้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวัสดุฐานรองชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	ค่าคงตัว สารตัวกลาง สัมพัทธ์	$\tan \delta$ ที่ความถี่ 10 GHz	ค่าคงตัวนำ ความร้อน $W/cm^2/^{\circ}C$	ความขรุขระ ของผิว μm	ความสามารถ ในการทนต่อ แรงดันไฟฟ้า (kV/cm)
อะลูมินา (alumina)					
99.5%	10	$1-2 \cdot 10^{-4}$	0.3	2-8	$4 \cdot 10^3$
96%	9	$6 \cdot 10^{-4}$	0.28	20	$4 \cdot 10^3$
แซฟไฟร์ (sapphire)	9.4และ11.6 (ผลึกเดี่ยว)	$1 \cdot 10^{-4}$	0.4	1	$4 \cdot 10^3$
แก้ว	5	$20 \cdot 10^{-4}$	0.01	1	-
ควอตซ์	3.8	$1 \cdot 10^{-4}$	0.01	1	$10 \cdot 10^3$
GaAs	13	$6 \cdot 10^{-4}$	0.3	1	350

$$\frac{\delta f}{f_0} = -\frac{1}{2} \frac{\delta \epsilon_r}{\epsilon_r} \quad (2.50)$$

- เมื่อ f_0 คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) ของสายอากาศ
 ϵ_r คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารตัวกลาง
 δf คือ การเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนซ์
 $\delta \epsilon_r$ คือ การเปลี่ยนแปลงของเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

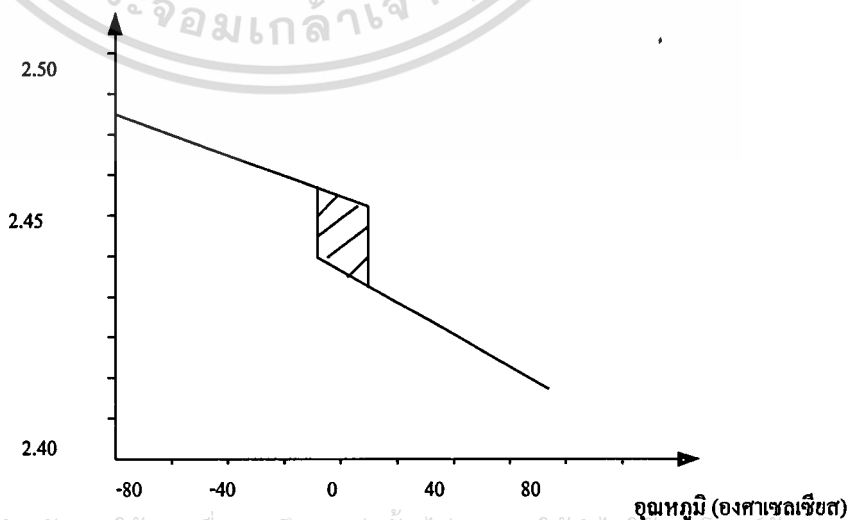
สำหรับการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับมิติของขนาด และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ และมีผลอย่างมากคือค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารตัวกลาง ซึ่งต้องมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ปัจจุบันสารที่ใช้ทำฐานรองมีหลายชนิดโดยมีค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ต่างๆ กัน ตั้งแต่ 1.17 ถึงประมาณ 25 และมีค่า Loss Tangent จาก 0.0001 ถึง 0.004 สารตัวกลางที่นิยมใช้กันมากคือ Polytetrafluoroethylene (PTFE) เนื่องจากมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลตามต้องการ รวมทั้งมีความหนา และขนาดที่สอดคล้องกับการออกแบบ สายอากาศแบบไมโครสตริป

$$\frac{\delta f}{f_0} = \frac{-\delta \epsilon_r}{l} = -\alpha_r \delta T \tag{2.51}$$

- เมื่อ α_r คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของสายอากาศ
- T คือ อุณหภูมิเป็นองศาเซลเซียส
- δT คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
- l คือ ความยาวที่เป็นตัวกำหนดความถี่ของสายอากาศ

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับค่าคงที่สารตัวกลาง ของ PTFE แสดงดังรูปที่ 2.21 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าคงที่สารตัวกลางของ PTFE จะลดลง

ค่าคงที่อิสระของ Polytafluoroethylene



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ **รูปที่ 2.21** ค่าคงที่อิสระของ Polytafluoroethylene (PTFE) ต่ออุณหภูมิครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 รูปร่างลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศแผ่นไมโครสตริปจะมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางฟิสิกส์มากกว่าสายอากาศที่ใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟทั่วไป ที่พบเห็นได้ชัด คือ รูปร่างของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม สายอากาศแผ่นไมโครสตริปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้ คือ

1) สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Patch)

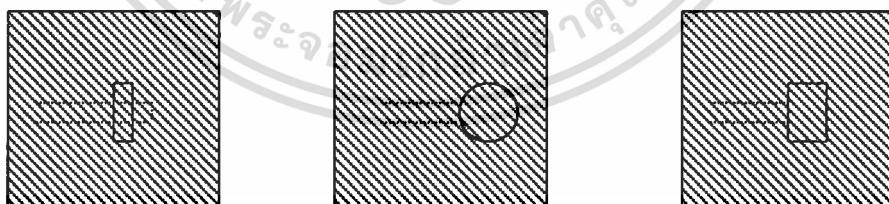
สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปแบบแผ่น Patch ประกอบด้วยแผ่นตัวนำบางๆ มีรูปทรงเรขาคณิตอยู่บนแผ่นสารตัวกลาง อีกด้านหนึ่งของสารตัวกลางจะเป็นพื้นกราวด์ แผ่นตัวนำจะเป็นตัวกำหนดการแพร่กระจาย ซึ่งหาได้จากกรคำนวณรูปร่างลักษณะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.22

2) สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบสล็อต (Slot)

สายอากาศแผ่นไมโครสตริปแบบสล็อต มีลักษณะคือ มีช่องที่พื้นกราวด์ และทำการป้อนสัญญาณโดยใช้เส้นไมโครสตริปช่องนี้ รูปร่างของสล็อตจะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (กว้างหรือแคบก็ได้) วงกลม หรือวงแหวน ดังรูปที่ 2.23



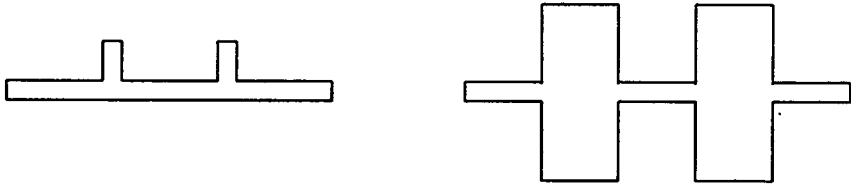
รูปที่ 2.22 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น



รูปที่ 2.23 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสล็อต

3) สายอากาศแผ่นแบบ Travelling-Wave

สายอากาศแผ่นแบบ Travelling-Wave ประกอบด้วยตัวนำลักษณะเป็นคาบ หรือมีความยาวตามเส้น TEM โดยที่ปลายเปิดของเส้น TEM จะต่อกับตัวภาระที่ทำกรแม่ทซ์แล้ว โดยที่รูปร่างแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบ Travelling-Wave

2.4.5 การป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับสายอากาศไมโครสตริป

ส่วนใหญ่สายอากาศแผ่นไมโครสตริปจะมีส่วนแพร่กระจายคลื่นอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองนั้น มีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี ได้แก่

1) การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป (Microstrip Line)

การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งไมโครสตริป เป็นการป้อนกำลังงานไฟฟ้าไปยังขบตัวนำสายอากาศด้านบนโดยพื้นกราวด์เป็นกราวด์ร่วมกันกับตัวสายอากาศ และสำหรับสายส่งไมโครสตริปนี้จะต้องคำนึงถึงการแมทซ์อิมพีแดนซ์ ระหว่างสายป้อนสัญญาณกับด้านสายอากาศไมโครสตริป ส่วนการป้อนสัญญาณที่แนวศูนย์กลางของสายอากาศดังรูปที่ 2.25



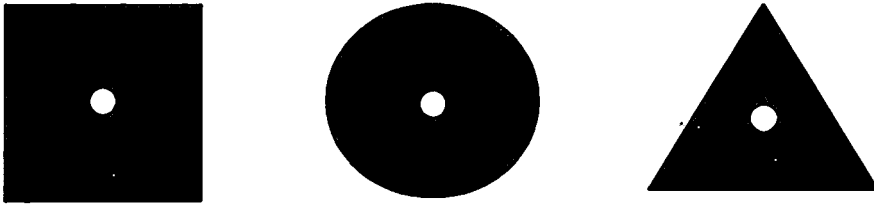
รูปที่ 2.25 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีสายส่งไมโครสตริป

2) การป้อนสัญญาณด้วยโคแอกเซียล (Coaxial Cable)

การป้อนกำลังงานโดยเจาะทะลุจากกราวด์ด้านล่างต่อตัวนำด้านในของสายส่ง เข้ากับตัวสายอากาศ และตัวนำเชื่อมต่อเข้ากับแผ่นกราวด์ การป้อนกำลังงานโดยที่จะต้องคำนึงว่าจุดที่เราป้อนเข้าไปนั้นว่าแมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายป้อนสัญญาณกับสายอากาศไมโครสตริป วิธีนี้แสดง

ดังรูปที่ 2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 การป้อนสัญญาณด้วยโคเอกเซียล

3) การป้อนสัญญาณผ่านช่องเปิด (Aperture)

การป้อนสัญญาณประเภทนี้จะนำเอาข้อบกพร่องของการป้อนสัญญาณแบบที่ 1 และ 2 เนื่องจากทั้ง 2 แบบ โดยธรรมชาติแล้วจะไม่สมมาตรกัน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดโหมด ในอันดับที่สูงกว่าขึ้น (Higher Order Mode) ทำให้มีการแผ่กระจายมีโพลาไรเซชันไขว้ (Cross Polarization) เกิดขึ้น จึงได้มีการคิดวิธีการป้อนสัญญาณ โดยการคัปปลิงผ่านช่องเปิด แต่วิธีการนี้ จะมีการสร้างที่ยากที่สุด และมีแบนด์วิดท์แคบ แต่การแพร่กระจายคลื่นประเภทนี้จะช่วยลดการกระจายคลื่นปลอมปนได้ ดังรูปที่ 2.27

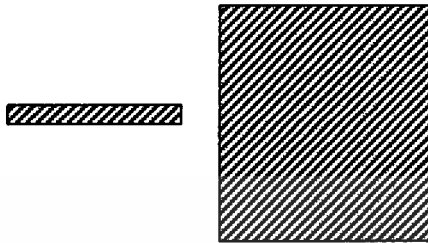


รูปที่ 2.27 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีผ่านช่องเปิด

4) การป้อนสัญญาณด้วยการวางไว้ใกล้กัน (Proximity)

การป้อนสัญญาณประเภทนี้ มีลักษณะเช่นเดียวกับการการป้อนสัญญาณประเภทที่ 3 โดยลักษณะโครงสร้างจะประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 2 ชั้นที่ถูกแยกออกจากกันด้วยระนาบสร้างเงาด้านล่างของวัสดุฐานรองแผ่นล่างสุด จะเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่สารตัวกลางต่ำกว่าระนาบสร้างเงาที่แบ่งวัสดุฐานรองทั้งสองออกจากกัน จะช่วยป้องกันการแพร่กระจายคลื่นออกจากส่วนป้อนสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดการแพร่กระจายปลอมปน และทำให้โพลาไรเซชันที่บริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งการป้อนไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณโดยการวางไว้ใกล้ๆ กันนั้น จะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด และยังง่ายต่อการสร้างแบบจำลอง และมีการปลอมปนของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ แต่การสร้างทำได้ยากอยู่ดี ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 การป้อนสัญญาณด้วยวิธีวางไว้ใกล้กัน

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของวิธีการป้อนสัญญาณแบบต่าง ๆ

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Microstrip Line - Radiating Edge	- การแพร่กระจายคลื่นเป็นกลุ่มก้อน	- มีการแพร่กระจายคลื่นแบบปลอมปน - ต้องใส่สตริปไลน์ภายในแผ่นแพร่กระจายคลื่น หรือใช้ทรานสฟอร์มเมอร์ในการแมทช์
- Nonradiating Edge	- มีโพลาริเซชันที่ดี	
2. Coaxial Feed	- การแมทช์อิมพีแดนซ์ทำได้โดยการเลื่อนตำแหน่งโพรบ - การเลื่อนตำแหน่งโพรบ จะกระตุ้นให้เกิดการรวมกันของโหมด	- อิมพีแดนซ์จะมีค่ามากเมื่อใช้สารฐานรองที่หนา

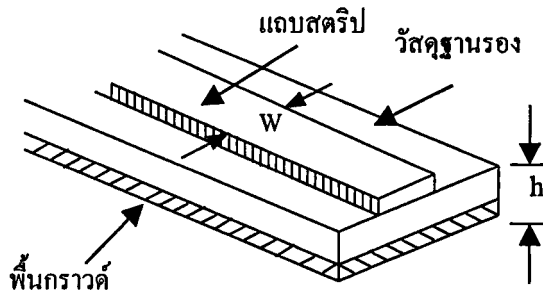
ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ข้อดีและข้อเสียของวิธีการป้อนสัญญาณแบบต่าง ๆ

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
3. Proximity Coupling - Monolithic - Multilayer	- ไม่มีกระแสไฟตรงบริเวณระหว่างจุดป้อน และแผ่นแพร่กระจายคลื่น - ใช้กับสายอากาศที่แผ่นแพร่กระจายคลื่นที่มีฐานรองหนา และแผ่นป้อนที่มีฐานรองบางมาก - สามารถเลือกองศาได้โดยอิสระในการแมทซ์ หรือการปรับแต่ง	- มีการแพร่กระจายคลื่นโดยตรงจากบริเวณที่มีการคับปลิง - รูปร่างของตัวป้อนต้องแข็งแรง ทนทาน - ต้องออกแบบให้ใช้กับแบบหลายๆ ชั้น - ยากในการออกแบบรูปร่าง
4. Aperture Coupling	- มีวิธีหลายวิธีในการเลือกใช้สารฐานรอง สำหรับแผ่นแพร่กระจายคลื่น หรือจุดป้อน - ไม่มีการแพร่กระจายคลื่นปลอมปนจากจุดป้อน - ไม่ต้องเชื่อมต่อสัญญาณด้วยสายโคแอกเซียล	- ต้องออกแบบให้ใช้กับแบบหลายๆ ชั้น

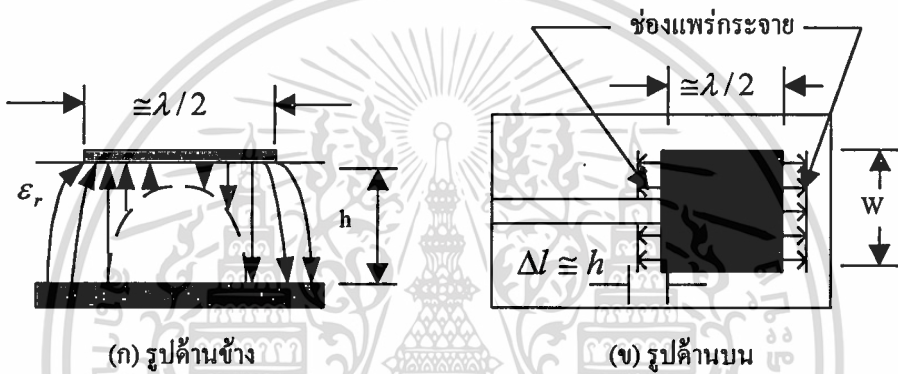
2.4.6 หลักการกระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศไมโครสตริปสามารถทำได้ให้ดูง่ายขึ้น โดยจะให้ส่วนแพร่กระจายคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.29

สมมติให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าตามแนวความกว้าง และความหนาแน่นเอกซของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.30 ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

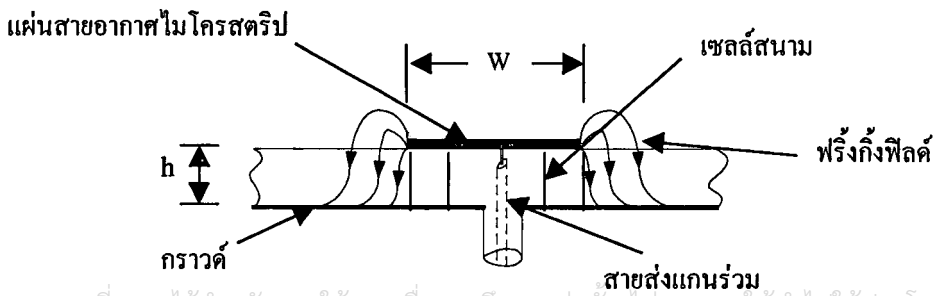


รูปที่ 2.29 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป



รูปที่ 2.30 ลักษณะของสนามไฟฟ้าภายใต้แผ่นและบริเวณขอบของสายอากาศไมโครสตริป

สนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามแนวความยาวของส่วนกระจายคลื่น ซึ่งเท่ากับ $\lambda/2$ การแพร่กระจายคลื่น สามารถอธิบายได้จากสนามบริเวณขอบด้านที่เปิดวงจรของแผ่นแพร่กระจายคลื่น โดยจะแยกพิจารณาสนามไฟฟ้าที่ขอบเป็นส่วนประกอบแนวตั้งฉาก และส่วนประกอบแนวสัมผัส ส่วนประกอบตั้งฉากจะมีการกลับเฟส 180 องศา เพราะส่วนการกระจายคลื่นมีความยาว $\lambda/2$ ดังนั้น สนามระยะไกลที่เกิดขึ้นจะไม่มีการแพร่กระจายสูงสุดโดยตั้งฉากกับผิวของส่วนกระจายคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดรูปที่ 2.31 ลักษณะการเกิดสล็อต อองเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง สายอากาศแผ่นไมโครสตริปจะเกิดเป็นสล็อต เรียกแต่ละสล็อตว่า เซลล์สนาม (Field-Cell) ดังรูปที่ 2.31 ซึ่งแต่ละเซลล์สนามมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ

$$Z_i = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = Z_o \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (2.52)$$

$$Z_c = \frac{Z_o}{n\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{377}{10\sqrt{2}} = 26.7 \quad (2.53)$$

ถ้าเป็นสายอากาศ $\mu_r = \epsilon_r = 1$ และ $Z_i = Z_o = 377$ โอห์ม ดังนั้น ถ้ามีจำนวนเซลล์สนาม ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปมีค่า

$$Z_c = \frac{Z_o}{\sqrt{N\epsilon_r}} \quad (2.54)$$

โดย $N = W/t$ เพราะฉะนั้น

$$Z_c = \frac{Z_o t}{\sqrt{W\epsilon_r}} \quad (2.55)$$

ในรูปจะตัดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากขอบของสองข้างทิ้งไป แต่ถ้าต้องการค่าที่ละเอียดจะเขียนได้ว่า

$$Z_c = \frac{Z_o}{\sqrt{\epsilon_r} [(W/t) + 2]} \quad (2.56)$$

ถ้าความยาว L ไม่ใช่ $\lambda/2$ แต่มีค่าเท่ากับ λ ($\lambda = \lambda_o / \sqrt{\epsilon_r}$) เซลล์สนามทั้งสองข้างของขอบของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปจะมีผลต่อการกระจายคลื่นทันที สมมติ $\epsilon_r = 1$ จะได้ว่า

$$Z_c = \frac{Z_o^2}{4Z_d} \quad (2.57)$$

เมื่อ Z_o คือ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ที่อยู่ในสุญญากาศ ซึ่งเท่ากับ 377 โอห์ม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

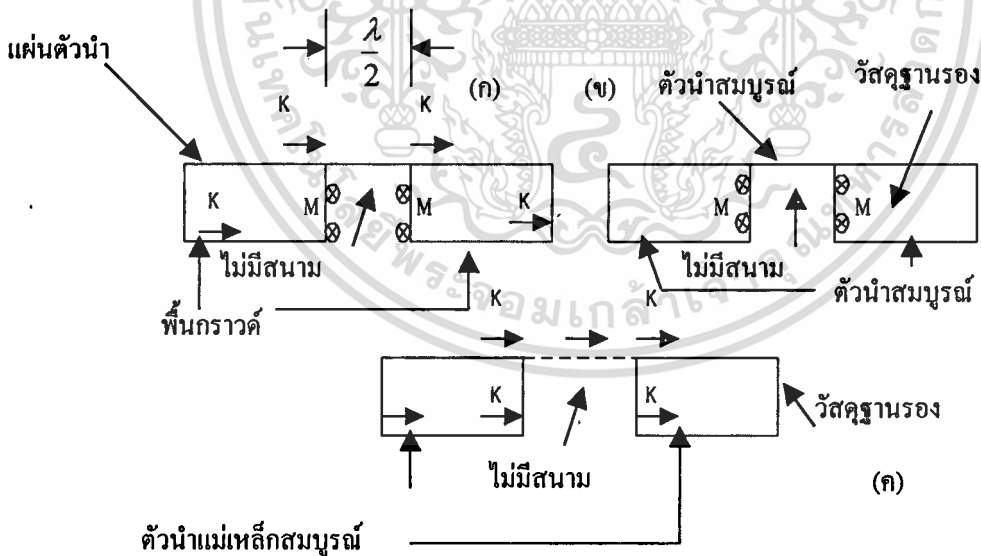
Z_d คือ ค่า Impedance Complementary Dipole (โอห์ม)

สามารถหาค่าสภาพเจาะงทิศทางโดยใช้สูตร

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \tag{2.58}$$

เมื่อ Ω_A คือ มุมที่กระจายคลื่น (Beam Area)

การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากแผ่นไมโครสตริป สามารถหาได้จากการสมมติสถานะ และการจ่ายกระแสให้แก่สายอากาศ แหล่งจ่ายกระแสที่สมมติขึ้นนี้มีอยู่ 3 แบบ ดังรูปที่ 2.32 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากกระแสเชิงผิว สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.32 (ก) สนามในระยะไกลสามารถคำนวณได้จากกระแสแม่เหล็ก (\vec{M}) รวมกับสถานะตัวนำสมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.32 (ข) ความหนาแน่นกระแสของสนามไฟฟ้าแนวสัมผัสจะทำให้สนามระยะไกลเป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้า (\vec{K}) รวมกับสถานะตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ พิจารณาได้จากรูปที่ 2.32 (ค)



(ก) \vec{K} และ \vec{M} (ข) \vec{M} และ ตัวนำสมบูรณ์
 (ค) \vec{K} และ ตัวนำสมบูรณ์

รูปที่ 2.32 แหล่งจ่ายกระแสแบบที่ทำให้เกิดสนามในระยะไกลเหมือนกัน

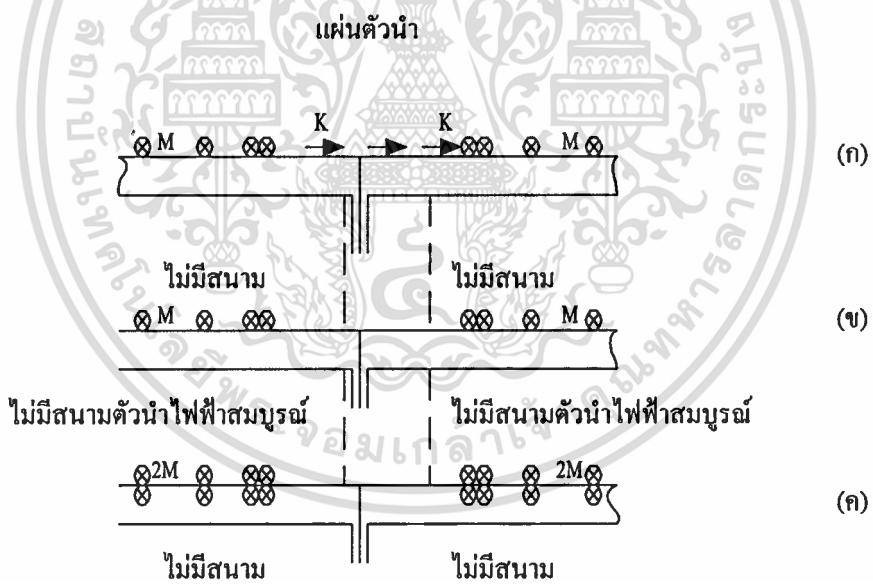
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในกรณีต่อไป การกำหนดสมการจะใช้พื้นฐานของขอบเขตเงื่อนไขขอบเขต คือ

$$\left. \begin{aligned} \bar{E} \times \bar{a}_n &= 0 \\ \bar{a}_n \times \bar{H} &= \bar{K} \end{aligned} \right\} \text{บนแผ่นแพร่กระจายคลื่นและพื้นกราวด์} \quad (2.59)$$

เมื่อ \bar{a}_n คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ขนานกับพื้นผิว \bar{E} และ \bar{H} คือสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัสภายในสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

ซึ่งแหล่งจ่ายจะทำให้เกิดสนามในระนาบใกล้เคียงแผ่นแพร่กระจายคลื่น สนามไฟฟ้าที่อยู่ใต้พื้นกราวด์จะเป็นศูนย์ รูปที่ 2.33 (ก) แสดงกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กในระนาบ รูปที่ 2.33 (ข) แสดงกระแสแม่เหล็ก และตัวนำกระแสเชิงผิวจะเพิ่มเป็น 2 เท่า



รูปที่ 2.33 แหล่งจ่ายกระแสเชิงผิวอีกแบบหนึ่ง ที่ทำให้เกิดสนามในระนาบเหมือนกัน

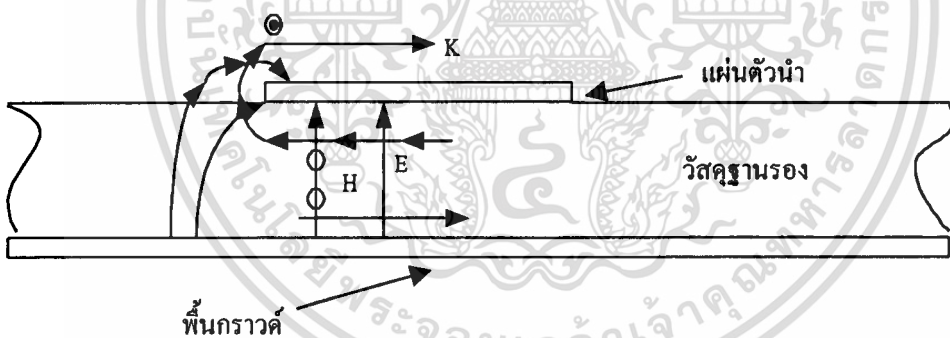
สภาวะดังกล่าวทั้ง 6 อย่างจะต้องมีการกระจายกระแสที่เที่ยงตรง เนื่องจากสามารถคำนวณหาสนามในระนาบใกล้เคียงได้ถูกต้อง ถ้าวัสดุรองรับเป็นเนื้อเดียวกัน (Isotropic) คุณสมบัติเอกสัณฐานเป็นอีกสิ่งหนึ่งซึ่งจำเป็นสำหรับการคำนวณที่มีอนุกรมเทย์เลอร์โดยประมาณการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเหมือนกัน (Homogeneous) และไม่มีการสูญเสียค่าความนำของตัวนำของส่วนแพร่กระจายคลื่น และพื้นกรวดของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปมีค่าเป็นอนันต์ กระแสเชิงผิวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าแนวสัมผัส \vec{M} เป็น

$$\vec{K} = \vec{a}_n \times \vec{H} \tag{2.60}$$

$$\vec{M} = \vec{E} \times \vec{a}_n \tag{2.61}$$

สมการทั้งสองแสดงความสัมพันธ์ของสนามภายในสายอากาศแผ่นไมโครสตริปกับกระแสเชิงผิว ดังรูปที่ 2.34 เพื่อความรวดเร็วในทางปฏิบัติ จะพิจารณาเพียงกระแสด้านบนและด้านล่างของส่วนการกระจายคลื่น พังค์รันของศักย์ไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะทำให้ทราบส่วนที่แพร่กระจายที่เกิดจากกระแสเชิงผิวง่ายขึ้น ในขั้นแรกจะสมมติให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ซึ่งอยู่ภายนอกสายอากาศแผ่นไมโครสตริป สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.60 และ 2.61



รูปที่ 2.34 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และสนามที่แพร่กระจายบริเวณขอบของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป

ในขั้นแรก สมมติให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่จุดใดๆ $P(r, \theta, \phi)$ ซึ่งอยู่ภายนอกสายอากาศแผ่นไมโครสตริป สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.62 และ 2.63

$$\vec{E}_e(r) = \frac{-j}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - j\omega\vec{A} \tag{2.62}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.63) การคำนวณหาสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_e(r) = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}$ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยตัวห้อย e ที่ \bar{E} และ \bar{H} แสดงถึงสนามที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า

เมื่อ μ คือ เพอร์มิอับิลิตี (Permeability)

ϵ คือ เพอร์มิททิวิตี (Permittivity)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (Angular Frequency)

\bar{A} คือ เวกเตอร์ศักย์แม่เหล็ก (Vector Magnetic Potential)

\bar{A} สามารถหาได้จาก

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_s \bar{M}(r') \frac{e^{-jk_0|\bar{r}-\bar{r}'|}}{|\bar{r}-\bar{r}'|} ds' \quad (2.64)$$

เมื่อ k_0 คือ จำนวนของคลื่นในอวกาศ

$\bar{M}(r')$ คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเชิงผิว ที่ห่างจากจุดกำเนิด

ในการทำงานเดียวกัน โดยใช้เวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้า (\bar{F}) สนามเนื่องจากสนามแม่เหล็ก สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.65 และ 2.66

$$\bar{E}_m(r) = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \bar{F} \quad (2.65)$$

$$\bar{H}_m(r) = \frac{-j}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \bar{F}) - j\omega\bar{F} \quad (2.66)$$

โดยที่ตัวห้อย m ที่ \bar{E} และ \bar{H} แสดงสนามที่เกิดจากกระแสแม่เหล็กและเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้า สามารถหาได้จาก

$$\bar{F} = \frac{\epsilon}{4\pi} \iint_s \bar{M}(r') \frac{e^{-jk_0|\bar{r}-\bar{r}'|}}{|\bar{r}-\bar{r}'|} \quad (2.67)$$

เพื่อความสะดวกจะตัดเทอม $e^{-j\omega t}$ ซึ่งเกิดจากสนามที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time Varing Field) ดังนั้น สนามรวม คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\bar{E}(\mathbf{r}) &= \bar{E}_e + \bar{E}_m \\ &= \frac{-j\nabla(\nabla \cdot \bar{A})}{\omega\mu\epsilon} - j\omega\bar{A} - \frac{\nabla \times \bar{F}}{\epsilon} \\ \bar{H}(\mathbf{r}) &= \bar{H}_e + \bar{H}_m \\ &= \frac{\nabla \times \bar{A}}{\mu\epsilon} - \frac{j\nabla(\nabla \cdot \bar{F})}{\omega\mu\epsilon} - j\omega\bar{F}\end{aligned}\quad (2.69)$$

ทั้งเวกเตอร์ศักย์ไฟฟ้าและเวกเตอร์ศักย์แม่เหล็กนำไปใช้ในการแก้ปัญหасมการ 2 สมการ
คือ

$$\nabla^2 \bar{A} + \omega^2 \mu\epsilon \bar{A} = 0 \quad (2.70)$$

$$\nabla^2 \bar{F} + \omega^2 \mu\epsilon \bar{F} = 0 \quad (2.71)$$

เมื่อพิจารณาสนามที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\bar{H}(\mathbf{r}) = \frac{\bar{E}(\mathbf{r})}{\eta_0} \quad (2.72)$$

$$\bar{E}(\mathbf{r}) = -j\omega\bar{A} \quad (2.73)$$

และสำหรับสนามที่เกิดจากกระแสแม่เหล็ก คือ

$$\bar{H}(\mathbf{r}) = -j\omega\bar{F} \quad (2.74)$$

$$\bar{E}(\mathbf{r}) = \bar{H}(\mathbf{r})\eta \quad (2.75)$$

เมื่อ η_0 คือ ค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 120π

สนามในระยะไกลจะพิจารณาภายใต้เงื่อนไข หรือเป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของช่องเปิดคั้งนั้น จากสมการที่ 2.63 และ 2.72 จะได้

$$\bar{E}(\mathbf{r}) = \frac{-j\omega\epsilon e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \iint_S K(\mathbf{r}') [e^{-jk_0 r' \cos \theta}] ds' \quad (2.76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม 2564 ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{H}(r) = \frac{-j\omega\epsilon e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \iint_S M(r') [e^{-jk_0 r' \cos\phi}] ds' \quad (2.77)$$

เมื่อ ϕ คือ มุมระหว่าง r กับ r'

2.4.7 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งไมโครสตริป

ไมโครสตริปถึงแม้จะมีโครงสร้างง่ายๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่การวิเคราะห์คุณสมบัติของไมโครสตริปโดยละเอียดทางทฤษฎีนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมาก ทั้งนี้เป็นเพราะระบบแกนประสานที่ใช้และเงื่อนไขขอบเขตของระบบค่อนข้างยุ่งยากเมื่อเทียบกับท่อนำคลื่น หรือสายนำสัญญาณชนิดอื่นในโหมด TEM มาก แต่จะไม่ใช่โหมด TEM เสียทีเดียว เพราะมีสนามในแนวแกนอยู่ด้วย จึงนิยมเรียกโหมดดังกล่าวนี้ว่าโหมดกึ่ง TEM (Quasi TEM) รูปที่ 2.35 แสดงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวาง ซึ่งไมโครสตริปที่มีสนามในแนวแกนอยู่ข้างนั้นเป็นเพราะโครงสร้างที่มีสารตัวกลาง และอากาศอยู่ในระบบเดียวกัน และในสภาพที่มีสนามในแนวแกนเกิดขึ้น โหมดนั้นจะเกิดเป็นไฮบริดโหมด การที่คลื่นส่งผ่านไปโนโหมดกึ่ง TEM ซึ่งอนุโลมให้โหมด TEM นี้ ทำให้สามารถใช้หลักการวงกระจายในการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของไมโครสตริปได้ กล่าวคือ ถ้าสามารถหาค่าอินตีกแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ จะนำค่าทั้งสองนี้ไปคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติได้



รูปที่ 2.35 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริป

อย่างไรก็ตามการหาค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของไมโครสตริปจะยุ่งยากกว่าสายอากาศคู่ขนานหรือสายโคแอกเซียล เพราะไมโครสตริปมีทั้งสารตัวกลางและอากาศอยู่ในบริเวณที่พลังงานของคลื่นส่งผ่าน สำหรับการหาค่าอินตีกแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวนั้น จะไม่ถูกรบกวนจากการมีสารตัวกลาง ถึงแม้ว่าการหาค่าคาปาซิแตนซ์จะยุ่งยากกว่าปกติ แต่มีวิธีทำให้

ง่ายขึ้นโดยใช้วิธีหาค่าคงตัวของไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant: ϵ_{eff}) ของระบบซึ่งจะรวมผลของสารตัวกลาง และอากาศเข้าด้วยกัน

เนื่องจากสารตัวกลางทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่หรือมีสแควร์เพอร์ซันเชิงวัสดุ ดังนั้น ϵ_{eff} ที่หาได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไปด้วย อย่างไรก็ตามจากการศึกษาทางทฤษฎี และการทดลองของผู้เชี่ยวชาญว่า ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 2 GHz ลงมา ค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีของไฟฟ้าสถิตย์น้อยมาก จึงสามารถอนุมานให้ใช้ค่า ϵ_{eff} ของไฟฟ้าสถิตย์ได้ สำหรับช่วงความถี่สูงกว่า 2 GHz ต้องคำนึงถึงดิสเพอร์ชัน โดยทำการปรับแต่งค่า ϵ_{eff} ให้เหมาะสมกับความถี่ที่ใช้งาน

ในการหาค่า ϵ_{eff} ของกรณีไฟฟ้าสถิตย์นั้นจะใช้แนวความคิดของวงจรกระจายดังต่อไปนี้ เมื่อคลื่นที่ส่งผ่านไปไมโครสตริปเป็นโหมด TEM อิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติ Z_c จะเขียนในรูปของค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว L และหาค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว C ได้ในรูปต่อไปนี้

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.78)$$

ในขณะเดียวกันกับความเร็วเฟส v_p จะเขียนได้ดังนี้

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.79)$$

จากสมการที่ 2.78 ทำให้อยู่ในรูปของ v_p กับ L และ C ได้ดังนี้

$$Z_c = v_p L = \frac{1}{v_p C} \quad (2.80)$$

ในขั้นต่อไป พิจารณาที่วัสดุฐานรองที่เป็นสารตัวกลางถูกดึงออกไป เหลือแต่อากาศเพียงอย่างเดียวที่โอบล้อมไมโครสตริปอยู่ ในสภาพเช่นนี้ค่าความเร็วเฟสของคลื่น TEM ที่ส่งผ่านจะเท่ากับความเร็วแสง และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะเปลี่ยนแปลง โดยที่ค่าอินดักแตนซ์ไม่ถูกกระทบ ถ้าให้ค่าคาปาซิแตนซ์ที่เปลี่ยนไปนั้นมีค่าเป็น C_0 กับความเร็วเฟสดังสมการที่ 2.81

$$c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.81)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ในขณะเดียวกันกับค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติ จะเขียนได้ดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2.82)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.80 หาค่าด้วยสมการที่ 2.78 จะได้ผลดังนี้ คือ

$$\frac{C}{C_0} = \left[\frac{c}{v_p} \right]^2 \quad (2.83)$$

ค่า C/C_0 นี้ตามนิยามโดยทั่วไปคือค่าคงตัวของสารตัวกลางที่โบล้อมระบบเก็บประจุอยู่ในกรณีทีพิจารณาอยู่นี้ ค่านี้จะเปรียบเสมือนค่าคงตัวของสารตัวกลางสัมพัทธ์ประสิทธิผลของระบบ ไมโครสตริปที่มีวัสดุฐานรองเป็นสารตัวกลาง และด้านบนเป็นอากาศอยู่นั่นคือ

$$\epsilon_{eff} = \left[\frac{c}{v_p} \right]^2 \quad (2.84)$$

จากสมการที่ 2.79 ถึงสมการที่ 2.82 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง Z_c , Z_0 และ ϵ_{eff} ได้ดังนี้

$$Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{หรือ} \quad Z_0 = Z_c \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad \text{หรือ} \quad \epsilon_{eff} = \left(\frac{Z_0}{Z_c} \right)^2 \quad (2.85)$$

จากผลที่จะเห็นได้ว่า ถ้าสามารถรู้ค่า ϵ_{eff} ได้ จะทำให้สามารถคำนวณคุณสมบัติอื่นๆ ตามมาได้ อย่างไรก็ตามค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงไปตามความกว้างของไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของวัสดุฐานรอง ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้โดยพิจารณา 2 กรณีต่อไปนี้ กรณีแรกคือกรณีที่ $w/h \gg 1$ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.36 ในกรณีนี้เนื่องจากเส้นแรงไฟฟ้าจะอยู่ส่วนบริเวณที่มีแถบสตริป หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า จะถูกส่งผ่านอยู่ในบริเวณดังกล่าวเกือบทั้งหมด สภาพดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าคงตัวของสารตัวกลางสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ค่า ϵ_{eff} ในกรณีเส้นแรงไฟฟ้าจะผ่านวัสดุฐานรองครึ่งหนึ่งและผ่านอากาศครึ่งหนึ่ง ซึ่งทำให้ค่าคงตัวของสารตัวกลางสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ $(\epsilon_r + 1)/2$ จากที่อธิบายนี้จะเห็นได้ว่าค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงตามค่า w/h และจะมีขอบบนและขอบล่างตามค่าที่ได้จากกรณีต่อไปนี้

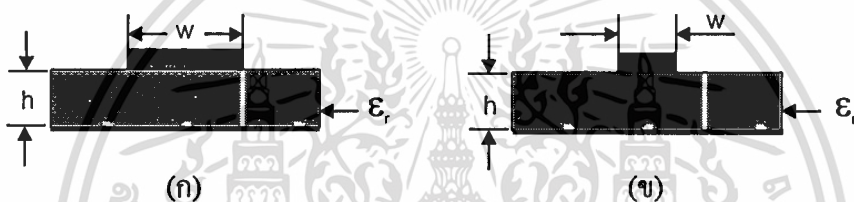
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) \leq \epsilon_{eff} \leq \epsilon_r \quad (2.86)$$

และเพื่อสะดวกในการคำนวณ และการออกแบบต่อไปนี้ ได้มีการเขียนค่า ϵ_{eff} ในรูปต่อไป

$$\epsilon_{eff} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \leq \epsilon_{eff} \leq \epsilon_r \quad (2.87)$$

ค่า q ในสมการที่ 2.87 นี้เรียกว่าฟิลลิงแฟกเตอร์ (Filling Factor) ซึ่งหมายถึงตัวประกอบที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุฐานรองที่เป็นสารตัวกลางจะมีผลต่อโครงสร้างนั้นมากน้อยแค่ไหน



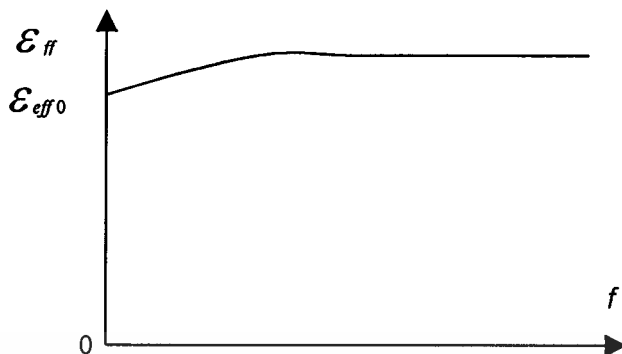
รูปที่ 2.36 ไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$ และ $w/h \ll 1$

เมื่อเขียนค่า ϵ_{eff} ตามสมการที่ 2.87 นี้ค่า q จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามค่า w/h ในกรณีที่ความถี่ใช้งานสูงกว่า 2 GHz นั้น ดิสเพอร์ชันเชิงวัสดุของวัสดุฐานรองจะมีผลมากกว่าการคำนึงถึงผลกระทบของดิสเพอร์ชัน ในส่วนนี้จะทำได้โดยการพิจารณาว่าเมื่อเปลี่ยนไป ความเร็วเฟสจะเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งทำให้ค่า ϵ_{eff} ตามสมการที่ 2.87 เขียนได้ดังนี้

$$\epsilon_{eff}(f) = \left\{ \frac{c}{v_p(f)} \right\}^2 \quad (2.88)$$

เมื่อพิจารณาค่า $\epsilon_{eff}(f)$ ตามสมการที่ 2.88 นี้จะพบว่าในช่วงความถี่ต่ำที่ $f \rightarrow 0$ นั้นค่า $\epsilon_{eff}(f)$ จะเข้าหาค่า ϵ_{eff} ของกรณีไฟฟ้าสถิตย์ และเมื่อ f มีค่าสูงขึ้นเข้าหา ∞ ค่า ϵ_{eff} ของวัสดุฐานรองเพราะความเร็วเฟสจะเข้าหาความเร็วของแสงในสารตัวกลางที่เป็นวัสดุฐานรอง โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงของค่า $\epsilon_{eff}(f)$ ตามความถี่จะเป็นคั้งที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.37 จะสูงขึ้นตามความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าสารตัวกลางสัมพัทธ์ประสิทธิผล

2.4.8 การลดทอนสัญญาณของสายส่งไมโครสตริป

เนื่องจากไมโครสตริปทำด้วยโลหะที่ไม่สมบูรณ์แบบ และมีสารตัวกลางกั้นในบริเวณที่คลื่นส่งผ่าน ดังนั้น การลดทอนสัญญาณจึงเกิดจากสาเหตุทั้งสองนี้ เมื่อพิจารณาว่าสายส่งไมโครสตริปส่งผ่านคลื่นในโหมด จากความรู้ที่ผ่านมา สามารถเขียนค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณได้ดังรูปต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{R}{2Z_c} + \frac{GZ_c}{2} = \alpha_m + \alpha_d \tag{2.89}$$

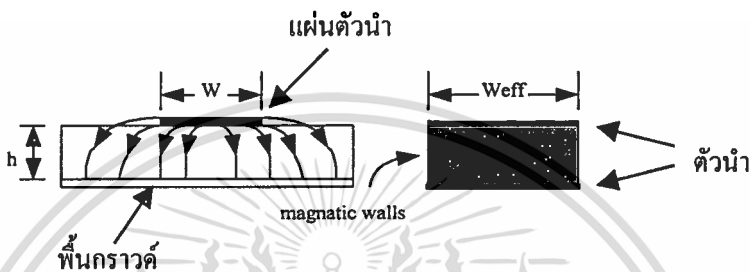
โดยที่ α_m และ α_d เป็นค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากโลหะและ สารตัวกลางตามลำดับ การหาค่า α_m โดยการวิเคราะห์ให้ละเอียดตามทฤษฎีจะทำได้ลำบาก เพราะการกระจายของสนามแม่เหล็กบนผิวโลหะมีความสลับซับซ้อนมากเช่นเดียวกับกับการกระจายของสนามไฟฟ้า และจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า w/h และความหนาของแถบสตริป t อีกด้วย ในทางปฏิบัติจึงมักใช้วิธีคิดขึ้นโดยสมมติให้คลื่น TEM ส่งผ่านอยู่ภายในบริเวณข้างใต้แถบสตริปเท่านั้นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.38 แล้วคำนวณการสูญเสียในเนื้อโลหะในสภาพดังกล่าว แล้วจึงนำ

ผลที่ได้ขึ้นไปคูณกับค่าคงที่ค่าหนึ่ง เพื่อทำการชดเชยให้มีความถูกต้องมากขึ้น เมื่อให้ค่าคงที่ดังกล่าวเป็นค่า K จะได้ α_m ดังรูปที่ 2.38 ต่อไปนี้

$$\alpha_m = \frac{KR}{2Z_c} = \frac{KR_s}{wZ_c} = \frac{\sqrt{\omega\mu_0}}{2\sigma} \sqrt{\frac{K}{wZ_c}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2 \times 5.8 \times 10^7 \sigma_r}} \frac{K}{wZ_c} \quad (\text{Nep/m}) \tag{2.90}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารส่วนบุคคล ห้ามเผยแพร่โดยไม่อนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นให้แต่เปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ σ_r คือ ค่าคงตัวของ การนำการไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Conductivity) ที่เทียบกับ ทองแดง ซึ่งมี $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ s/m}$ ค่า K นั้นจะขึ้นกับอยู่ค่า w/h และความถี่ โดยที่ในกรณี w/h มีค่าใหญ่มากๆ ซึ่งหมายถึง คลื่น TEM จะเข้าใกล้แบบอุดมคติที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.38 ค่า K จะลู่เข้าหา 1 ในกรณีกลับกัน คือ $w/h \ll 1$ ค่า K จะลู่เข้าหา 0.5 ในทางปฏิบัติ นั้นพบว่า กรณีออกแบบให้มี อิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติเป็น 50Ω โดยที่ $\epsilon_r = 10$ จะได้ค่า $K \cong 0.63$



รูปที่ 2.38 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป

สำหรับการหาค่า α_d จะอาศัยหลักการคิดค่า ϵ_{eff} ขึ้นมาใหม่ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$\alpha_d = \frac{GZ_c}{2} = \frac{Z_c}{2} (\omega C \tan \delta_{eff}) \tag{2.91}$$

$$= \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{2cC} (\omega C \tan \delta_{eff})$$

$$= \frac{\pi f \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \tan \delta_{eff} \quad (\text{Nep/m}) \tag{2.92}$$

โดยที่ค่า $\tan \delta_{eff}$ นั้นเปรียบเหมือนค่า $\tan \delta$ ประสิทธิภาพ ซึ่งสัมพันธ์กับ $\tan \delta$ ในรูปต่อไปนี้

$$\frac{\tan \delta_{eff}}{\tan \delta} = \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \tag{2.93}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.93 นี้เป็นสิ่งที่สมเหตุสมผล เพราะเมื่อแทนค่า ϵ_{eff} ด้วย 1 ซึ่งหมายถึงตัวกลางที่เป็นอากาศ ค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ 0 และเมื่อแทนค่า $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$ ซึ่งหมายถึงตัวกลางจะเป็นสารตัวกลางทั้งหมด ค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ $\tan \delta$

เมื่อนำค่า α_m และ α_d ในสมการที่ 2.91 และ 2.92 แทนกลับเข้าไปในสมการที่ 2.90 จะได้ค่า α ผลรวมออกมา และเนื่องจากนิยามเขียนค่า α ให้มีหน่วยเป็น dB/m เขียนความถี่ที่ใช้ งานให้มีหน่วยเป็น GHz และเขียนความกว้างของแถบสตริปให้มีหน่วยเป็น mm ดังนั้น α จะแสดงได้ในรูปต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{72K}{wZ_c} \sqrt{\frac{f}{\sigma_r}} + 91f \sqrt{\epsilon_{eff}} \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \tan \delta \quad (\text{dB/m}) \quad (2.94)$$

จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่า α_m แปรตาม \sqrt{f} ในขณะที่ α_d แปรตาม f ซึ่งทำให้ดูเหมือนว่า α_d จะมีค่าสูงกว่า α_m อย่างไรก็ตาม ในระยะหลังนี้ได้มีการพัฒนาวัสดุรองฐานที่มีคุณสมบัติดีขึ้น คือ มีค่า $\tan \delta$ ต่ำมาก ทำให้ช่วงความถี่ $f < 10$ GHz ค่า α_m จะใหญ่กว่า α_d และเป็นค่าสูญเสียหลักของสายส่งไมโครสตริป

บทที่ 3

การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน

3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปนี้ได้ออกแบบใช้งานที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้สารแบบอีพ็อกซี (Eproxy) และ ดูรอยด์ (Duroid) เป็นสารตัวกลาง ซึ่งอีพ็อกซีมีค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารตัวกลางของวัสดุที่นำมาทำแผ่นรองรับ (ϵ_r) มีค่าเท่ากับ 3 ฟารัดต่อเมตร และความหนาของสารที่เป็นสารตัวกลาง (h) มีค่าประมาณ 1.5 มิลลิเมตร ส่วนดูรอยด์จะมีค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารตัวกลางของวัสดุที่นำมาทำแผ่นรองรับ (ϵ_r) เท่ากับ 2.20 และมีความหนาของสารที่เป็นสารตัวกลาง (h) มีค่าประมาณ 1.5748 มิลลิเมตร โดยในการเชื่อมต่อสัญญาณให้กับแผ่นแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป จะใช้การป้อนสัญญาณแบบใช้สายส่งไมโครสตริป (Strip Line)

3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมจะกำหนดหาความกว้าง (W) และความยาว (L) ของแผ่นแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งแสดงแผนผังการทำงานดังรูปที่ 3.1 โดยสิ่งที่สำคัญในการออกแบบคือ

1. ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง (ϵ_r)
2. ความหนาของสารตัวกลาง (h)

การคำนวณหาความกว้างจะอาศัยสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\lambda_o = \frac{C_o}{f_o} \quad (3.1)$$

เมื่อ λ_o = ความยาวคลื่นที่ใช้งาน, (เซนติเมตร)

C_o = ความเร็วคลื่นในสุญญากาศ, (3×10^8 เมตร/วินาที)

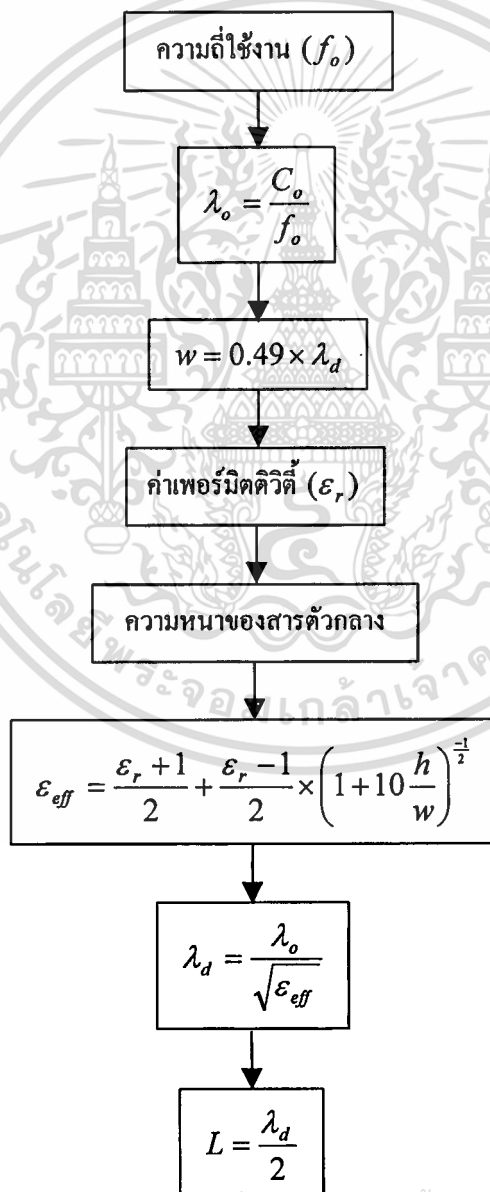
f_o = ความถี่คลื่นใช้งาน, (กิกะเฮิรตซ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า λ_o ลงในสมการที่ 3.2

$$W = \frac{\lambda_o}{2} \quad (\text{เซนติเมตร}) \quad (3.2)$$

เมื่อ W = ความกว้างของส่วนแพร่กระจายคลื่น, (เซนติเมตร)
 λ_o = ความยาวคลื่นที่ใช้งาน, (เซนติเมตร)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม ลิขสิทธิ์นี้เป็นของผู้แต่งและต้องอ้างถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

แต่ในการออกแบบจริงๆ ค่าของ W จะเท่ากับ

$$W \cong (0.49) \times \lambda_0 \quad (\text{เซนติเมตร}) \quad (3.3)$$

เมื่อทราบค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_r) และความหนาของสารตัวกลาง (h) นำมาหาค่าความยาวของแผ่นแพร์กระจายคลื่น (L) โดยอาศัยสมการที่ 3.4 ถึง 3.6

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left(1 + \frac{10h}{W} \right) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

เมื่อ ϵ_{eff} = ค่าคงที่ตัวประสิทธิผล
 ϵ_r = ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง
 h = ความหนาของสารตัวกลาง, (เซนติเมตร)
 W = ความกว้างของส่วนแผ่นแพร์กระจายคลื่น, (เซนติเมตร)

แทนค่า ϵ_{eff} ลงในสมการที่ 3.5

$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{เซนติเมตร}) \quad (3.5)$$

เมื่อ λ_d = ความยาวคลื่นของสารที่เป็นสารตัวกลาง, (เซนติเมตร)
 ϵ_{eff} = ค่าคงที่ตัวประสิทธิผล

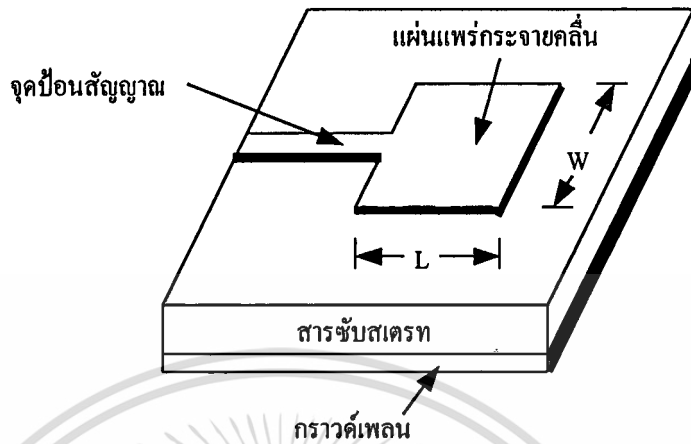
แทนค่า λ_d ลงในสมการที่ 3.6

$$L = \frac{\lambda_d}{2} \quad (\text{เซนติเมตร}) \quad (3.6)$$

เมื่อ L = ความยาวของสายอากาศ, (เซนติเมตร)
 λ_d = ค่าคงที่ตัวประสิทธิผล, (เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้จัดทำเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมจะเป็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

3.2.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมโดยใช้สารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี โดยที่มีค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารตัวกลางของวัสดุที่นำมาทำแผ่นรองรับ (ϵ_r) เท่ากับ 4.444 และความหนาของสารตัวกลาง (h) เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ดังนั้นสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยการแทนค่าในสมการที่ 3.1 ถึง 3.6 ได้ดังนี้

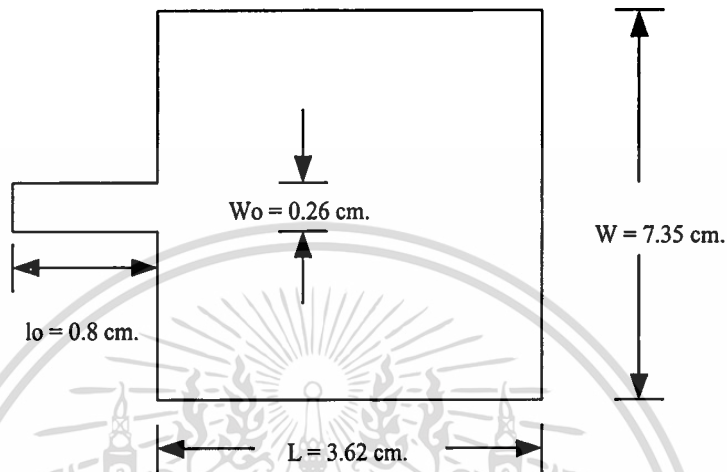
$$\begin{aligned} \epsilon_r &= 4.444 & h &= 0.15 & \lambda_o &= \frac{3 \times 10^8}{2 \times 10^9} \\ w &= 0.49 \times \lambda_o & & & & w = 7.35 \\ \epsilon_{eff} &= \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left(1 + \frac{10h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} & & & & \epsilon_{eff} = 4.29129 \\ \lambda_d &= \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} & & & & \lambda_d = 7.2409736 \\ L &= \frac{\lambda_d}{2} & & & & L = 3.6204 \end{aligned}$$

ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$\text{ค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารตัวกลาง } (\epsilon_r) = 4.444$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารความหนาของสารตัวกลาง (h) ศึกษาเท่านั้น ไม่เอ = 0.15 นำไปใช้ เช่นเดียวกับ การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ความกว้างของส่วนแพร่กระจายคลื่น (W) ของอึ่งถึงเจ = 7.35 สารทุกชิ้น เช่นเดียวกับ ไปใช้

ความยาวของส่วนแพร่กระจายคลื่น (L)	= 3.620	เซนติเมตร
ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป (W_0)	= 0.26	เซนติเมตร
ความยาวของสายส่งไมโครสตริป (l_0)	= 0.8	เซนติเมตร



รูปที่ 3.3 ดันแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี่

3.2.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมโดยใช้สารตัวกลางเป็นดูรอยด์

โดยที่มีค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารตัวกลางของวัสดุที่นำมาทำแผ่นรองรับ (ϵ_r) เท่ากับ 2.20 และความหนาของสารตัวกลาง (h) เท่ากับ 1.5748 มิลลิเมตร

ดังนั้น สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยการแทนค่าในสมการที่ 3.1 ถึง 3.6 ได้ดังนี้

$$\epsilon_r = 2.20 \quad h = 0.15748 \quad f_o = 2 \times 10^9 \quad \lambda_o = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 10^9}$$

$$w = 0.49 \times \lambda_o$$

$$w = 7.35$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left(1 + \frac{10h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\epsilon_{eff} = 2.1444972$$

$$\lambda_d = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

$$\lambda_d = 10.2430316$$

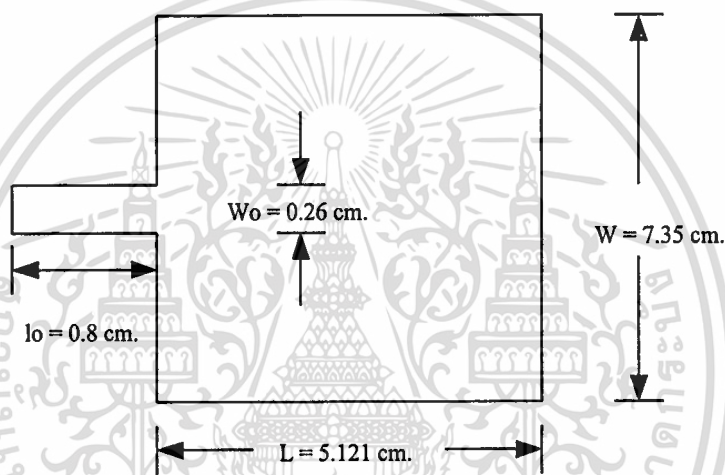
$$L = \frac{\lambda_d}{2}$$

$$L = 5.1215158$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

ค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารตัวกลาง (ϵ_r)	= 2.20	
ความหนาของสารตัวกลาง (h)	= 0.15748	เซนติเมตร
ความกว้างของส่วนแพร่กระจายคลื่น (W)	= 7.35	เซนติเมตร
ความยาวของส่วนแพร่กระจายคลื่น (L)	= 5.121	เซนติเมตร
ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป (W_0)	= 0.26	เซนติเมตร
ความยาวของสายส่งไมโครสตริป (l_0)	= 0.8	เซนติเมตร



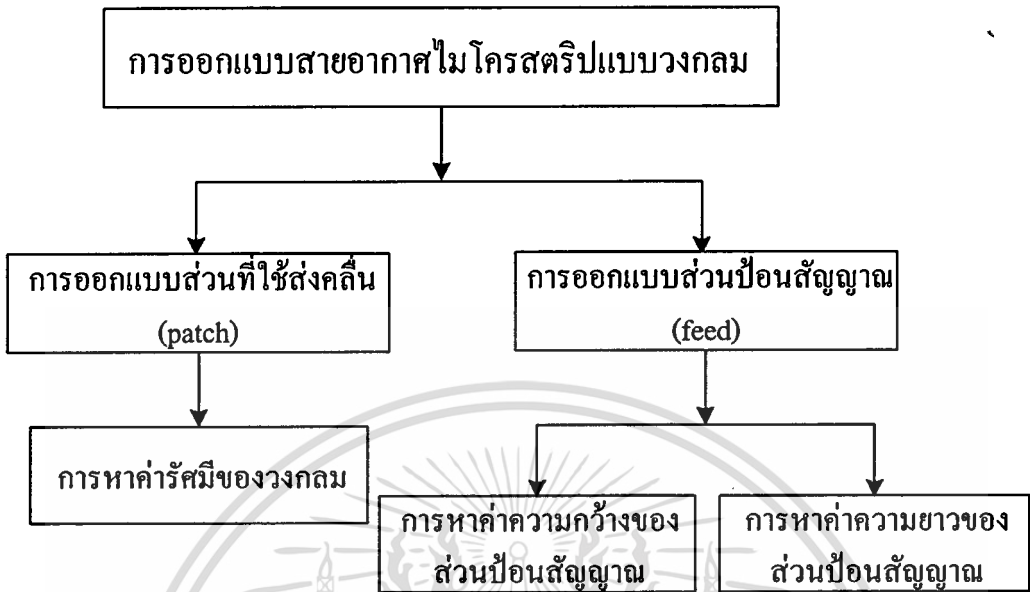
รูปที่ 3.4 ดันแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นฉนวน

3.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

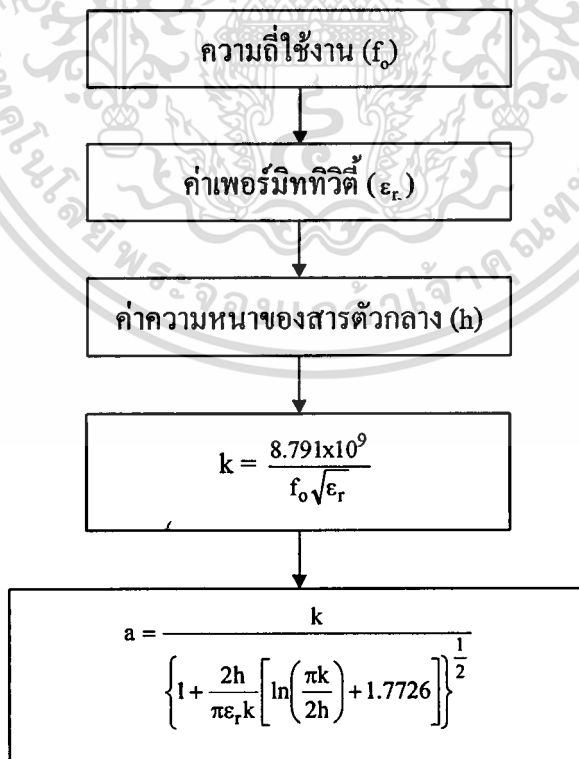
3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การออกแบบส่วนที่ใช้ส่งคลื่น กับ การออกแบบส่วนที่ใช้ป้อนสัญญาณ ดังรูปที่ 3.5

สำหรับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมจะใช้วิธีการคำนวณแบบจำลอง คาวิตี เนื่องจากการคำนวณแบบจำลองสายส่งไม่สามารถทำได้



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการคำนวณรัศมีของแผ่นตัวนำรูปวงกลม
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การออกแบบส่วนที่ใช้ส่งคลื่น

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่มีแผ่นตัวนำเป็นรูปวงกลมมีขั้นตอนตามรูปที่ 3.6 ในที่นี้จะแสดงวิธีการหรัศมีของวงกลมที่โหมด TM_{10} โดยสามารถหาได้จากสูตร

$$a = \frac{k}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r k} \left[\ln \left(\frac{\pi k}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (3.7)$$

เมื่อ a = รัศมีของวงกลม, (เซนติเมตร)

h = ความหนาของวัสดุ, (เซนติเมตร)

$$k = \frac{8.791 \times 10^9}{f_o \sqrt{\epsilon_r}}$$

2) การออกแบบขนาดของตัวป้อนสัญญาณ

การป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมจะแบ่งออกเป็นสามตอนด้วยกัน โดยมีความกว้างของตัวป้อนสัญญาณที่มีขนาดแตกต่างกัน ในตอนแรกและตอนที่สองให้ความยาวประมาณ $1/4$ ของความยาวคลื่นของสายอากาศ ส่วนตอนสุดท้ายมีความยาวประมาณ $1/2$ ของความยาวคลื่นของสายอากาศ เพื่อเป็นการปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้มีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม ดังรูปที่ 3.7

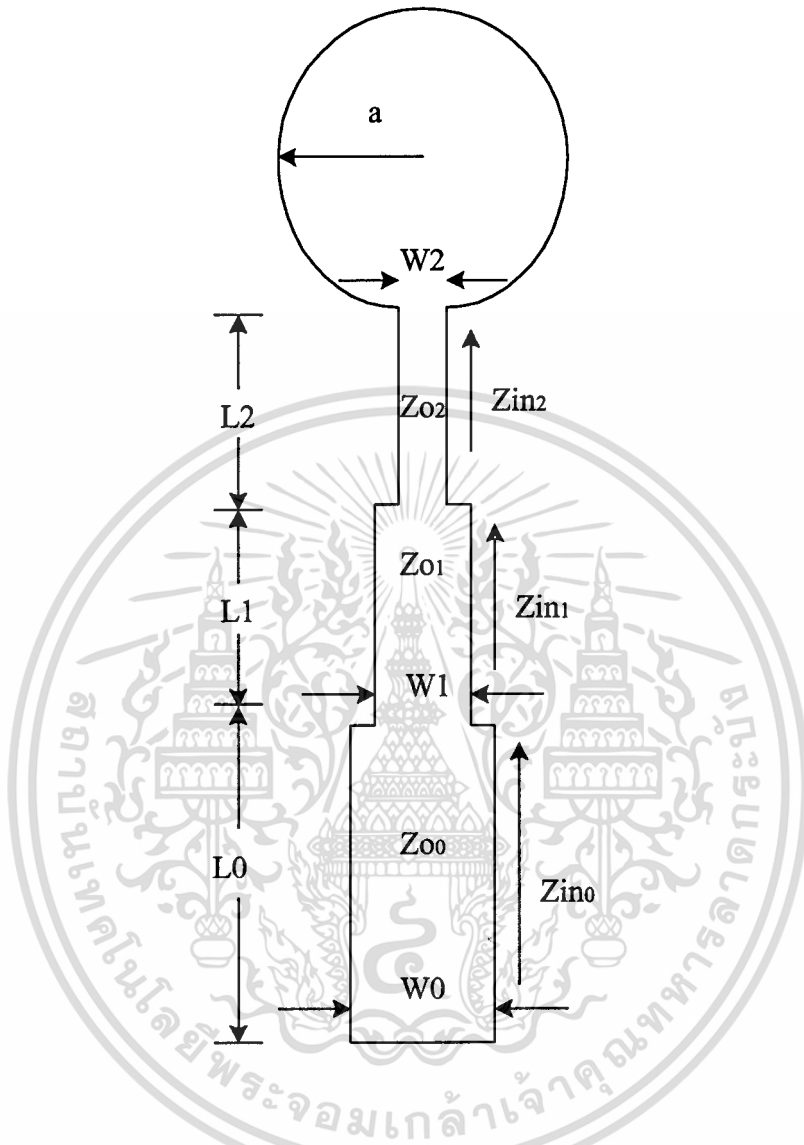
ความกว้างของจุดป้อนสัญญาณสามารถหาได้จากสมการที่ 3.8 หรือ สมการที่ 3.9

$$W = h \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (3.8)$$

$$W = \frac{2h}{\pi} \left(B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} (\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r}) \right) \quad (3.9)$$

การหาความกว้างของจุดป้อนสัญญาณแต่ละตอนนั้นต้องดูค่าของ A เมื่อ A มีค่ามากกว่า 1.52 ต้องใช้สมการที่ 3.8 และเมื่อ A มีค่าน้อยกว่า 1.52 ใช้สมการที่ 3.9 ค่า A และค่า B สามารถหาได้จากสมการที่ 3.10 และสมการที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การป้อนสัญญาณ โดยใช้สายส่งไมโครสตริปสามส่วน

$$A = \frac{Z_0}{60} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \right) + \frac{\epsilon_{r-1}}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (3.10)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.11)$$

เมื่อ Z_0 คือ ค่าความต้านทานขาออกของความกว้างจุดป้อนสัญญาณแต่ละตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานขาออกของความกว้างจุดป้อนสัญญาณแต่ละตอนสามารถหาได้จาก เมื่อ กำหนดค่าความต้านทานของจุดป้อนสัญญาณตอนแรก (Z_{o_2}) เป็น 102.3 โอห์ม ค่านี้จะต้องไม่เกิน 200 โอห์ม จะได้ค่าความต้านทานของจุดป้อนที่สอง (Z_{o_1}) เป็น

$$Z_{o_1} = \sqrt{Z_{o_2} \times 50}$$

$$Z_{o_1} = 71.5 \text{ โอห์ม}$$

ส่วนความต้านทานขาออกของจุดป้อนสัญญาณตอนที่สาม (Z_{o_0}) จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม

ความยาวของจุดป้อนสัญญาณทั้งสามตอนสามารถหาได้จากสมการที่ 3.12 และสมการที่ 3.13

$$L_a = \frac{\lambda_g}{4} \quad (3.12)$$

$$L_b = \frac{\lambda_g}{2} \quad (3.13)$$

เมื่อ L_a คือ ความยาวของจุดป้อนสัญญาณสองตอนแรก, (เซนติเมตร)

L_b คือ ความยาวของจุดป้อนสัญญาณตอนสุดท้าย, (เซนติเมตร)

ค่า λ_g สามารถหาได้จากสมการที่ 3.14

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (3.14)$$

เมื่อ λ_o คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ, (เซนติเมตร)

ϵ_{re} คือ ค่าคงที่สารตัวกลางของวัสดุสารตัวกลางที่สม่ำเสมอ

โดยที่ค่า ϵ_{re} สามารถหาได้จากสมการที่ 3.15

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานวิชาการเท่านั้น มอนูญุตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาหรือแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ w คือ ความกว้างของตัวส่งคลื่น, (เซนติเมตร)

3.3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ใช้สารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี

ซึ่งมีค่าเพอร์มิตติวิตีเท่ากับ 4.735 มีความหนาเท่ากับ 0.808 เซนติเมตร ที่ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.7 ถึงสมการที่ 3.15 จะได้

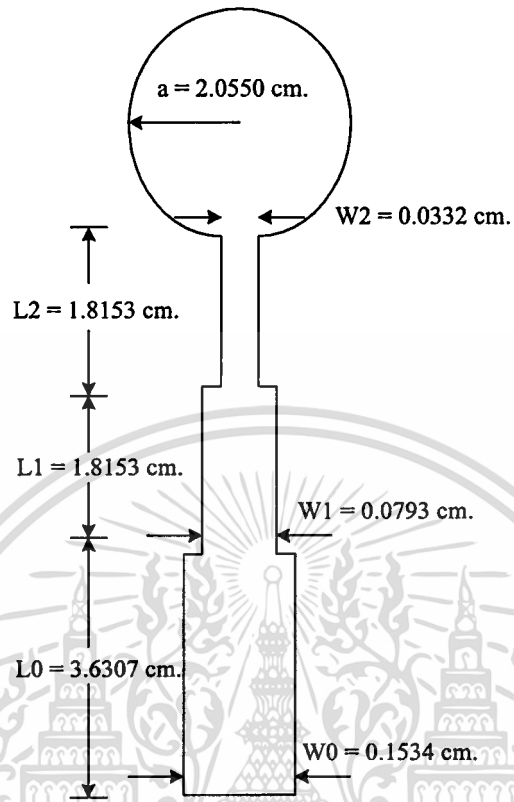
ส่วนที่ใช้ส่งคลื่นรูปวงกลม	(a)	=	2.0550	เซนติเมตร
ความกว้างของจุดป้อนสัญญาณ	(W2)	=	0.0332	เซนติเมตร
ความกว้างของจุดป้อนสัญญาณ	(W1)	=	0.0793	เซนติเมตร
ความกว้างของจุดป้อนสัญญาณ	(W0)	=	0.1534	เซนติเมตร
ความยาวของจุดป้อนสัญญาณ	(L2)	=	1.8153	เซนติเมตร
ความยาวของจุดป้อนสัญญาณ	(L1)	=	1.8153	เซนติเมตร
ความยาวของจุดป้อนสัญญาณ	(L0)	=	3.6307	เซนติเมตร

3.3.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ใช้สารตัวกลางเป็นฉนวน

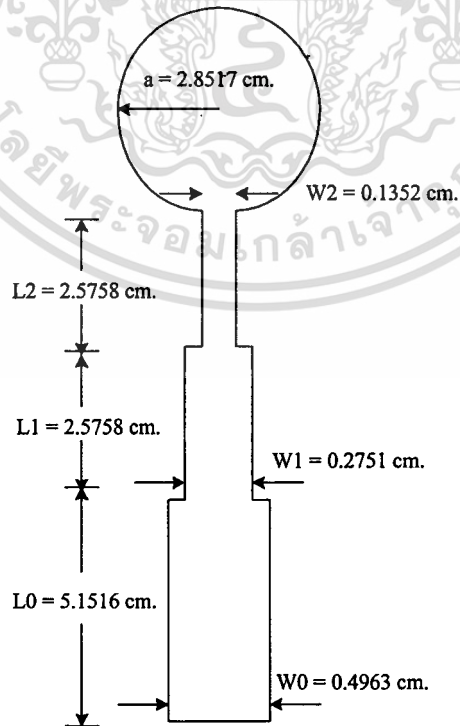
ซึ่งมีค่าเพอร์มิตติวิตีเท่ากับ 2.2 มีความหนาเท่ากับ 0.1588 เซนติเมตร ที่ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.7 ถึงสมการที่ 3.15 จะได้

ส่วนที่ใช้ส่งคลื่นรูปวงกลม	(a)	=	2.851751	เซนติเมตร
ความกว้างของจุดป้อนสัญญาณ	(W2)	=	0.1352	เซนติเมตร
ความกว้างของจุดป้อนสัญญาณ	(W1)	=	0.2751	เซนติเมตร
ความกว้างของจุดป้อนสัญญาณ	(W0)	=	0.4963	เซนติเมตร
ความยาวของจุดป้อนสัญญาณ	(L2)	=	2.5758	เซนติเมตร
ความยาวของจุดป้อนสัญญาณ	(L1)	=	2.5758	เซนติเมตร
ความยาวของจุดป้อนสัญญาณ	(L0)	=	5.1516	เซนติเมตร

ดังนั้นจะได้ขนาดของสายอากาศดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 ขนาดของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากอีพ็อกซี่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่ ไม่มเห็นแต่ต้องแจ้งชื่อของเอกสารไว้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 ขนาดของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากดูรอยด์

3.4 การสร้างสายอากาศไมโครสตริป

เนื่องจากการสร้างสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ทำงานที่ความถี่สูง จะต้องใช้ความละเอียดอย่างมาก ในการทำขนาดของแผ่นตัวนำให้เท่ากับค่าที่คำนวณไว้ ดังนั้น สารทุกอย่างที่ใช้ในการสร้างจะต้องมีความเข้มข้นมาก เพื่อให้เวลาที่ใช้น้อยลง และลดความผิดพลาดลงได้

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศแบบไมโครสตริป

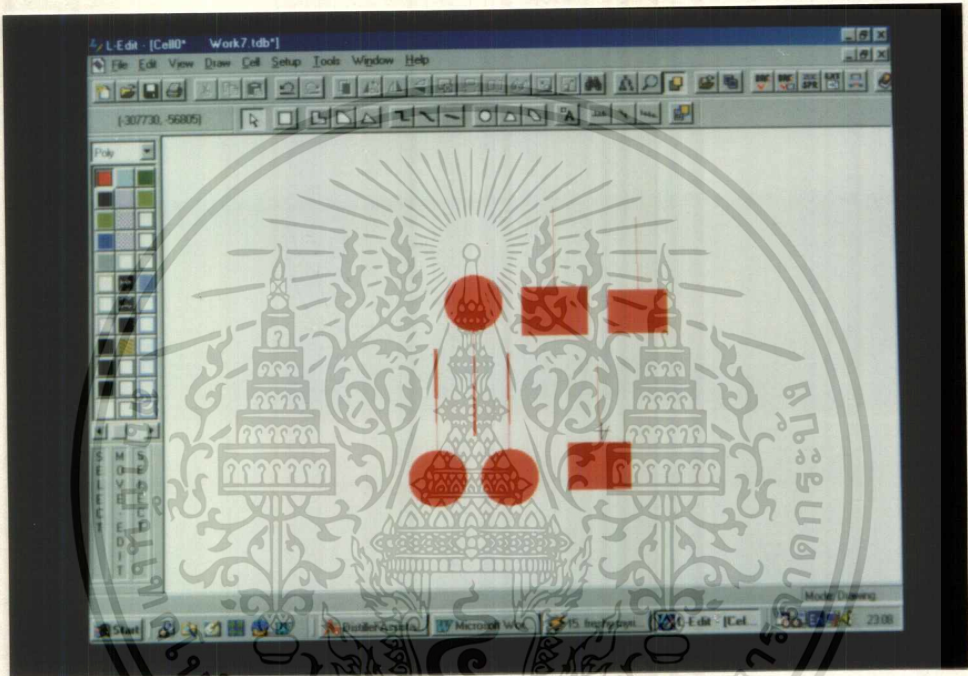
1. แผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้สารตัวกลางกึ่งกลางเป็นอีพ็อกซี และดูรอยด์
2. แอลกอฮอล์
3. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
4. แผ่นทรายฟิล์ม (Dry Film)
5. กรดกัดแผ่นวงจรพิมพ์
6. ขั้วต่อ SMA
7. ทินเนอร์
8. กระดาษทรายอย่างหยาบ
9. หลอดไฟขนาด 100 วัตต์
10. เตารีดไฟฟ้า
11. ฝ้ายหนาๆ

3.4.2 ขั้นตอนการสร้างสายอากาศไมโครสตริป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน **รูปที่ 3.10** ขั้นตอนการสร้างสายอากาศไมโครสตริป หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วัดขนาดความหนาของวัสดุที่จะทำ โดยใช้ไมโครมิเตอร์วัด
2. นำค่าความหนา และ ϵ_r ไปคำนวณหาขนาดของแผ่นตัวนำด้านบน
3. คำนวณขนาดของสายส่งสัญญาณไมโครสตริป
4. นำค่าที่ได้จากการออกแบบมาทำการสร้างต้นแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม L- Edit ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความละเอียดสูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ในที่นี้ใช้ความละเอียด 1 หน่วยต่อ 1 ไมโครเมตร

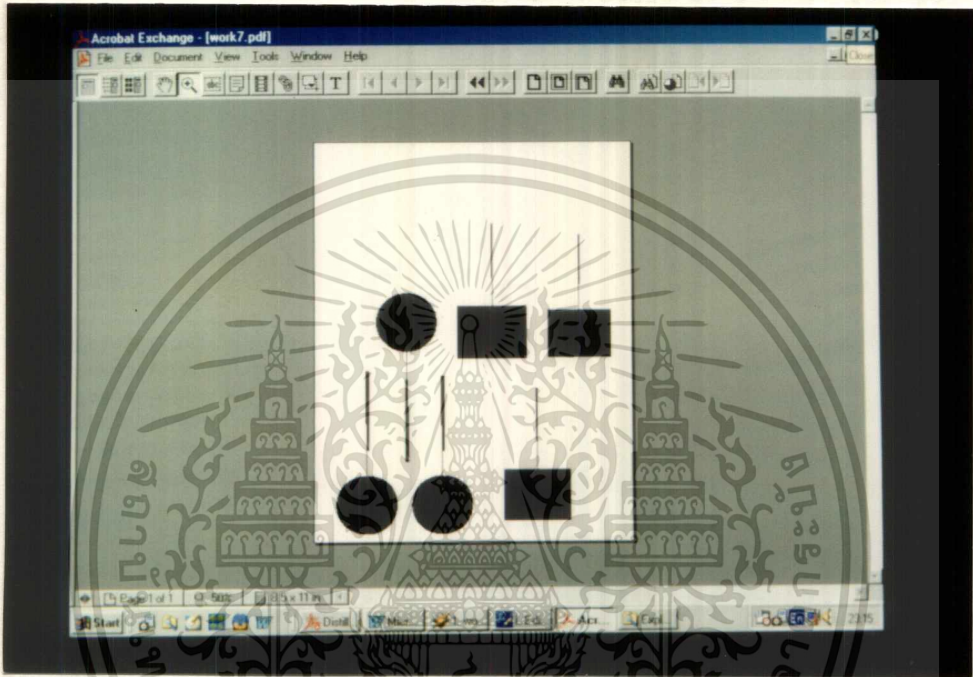


รูปที่ 3.11 โปรแกรม L- Edit

5. ที่ Menu – Cell เลือก Fabricate แล้วสร้าง Cell 0
6. ในโปรแกรม L-Edit ให้เก็บไฟล์เป็นนามสกุล “*.CIF” เช่น เก็บเป็นไฟล์ชื่อ “WORK1.CIF”
7. ก๊อปปี้ไฟล์นามสกุล “*.CIF” (เช่น WORK.CIF) ไปไว้ในห้องที่มีโปรแกรม CIF2PS3
8. ใช้โปรแกรม CIF2PS3 ซึ่งรันบน DOS เพื่อเปลี่ยนเป็นไฟล์นามสกุล “*.PS”
9. พิมพ์ cif2ps3 *.CIF (หมายเหตุ cif2ps3 ตัวเล็กหมด และ .CIF หมายถึง ไฟล์นามสกุล “*.CIF” เช่น WORK1.CIF จะต้องเป็นตัวใหญ่)
10. จากนั้นจะได้ไฟล์นามสกุล “*.PS” ตามไฟล์ “*.CIF” ตามต้นฉบับ (เช่น WORK1.PS)
11. เปลี่ยนชื่อไฟล์ที่ได้ให้เป็นนามสกุล “*.PDF”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 12. นำไฟล์นามสกุล “*.PS” มาเปิดบนโปรแกรม Adobe Acrobat Distiller
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. เปลี่ยนไฟล์นามสกุล “*.PS” ให้เป็นนามสกุล “*.PDF” โดยใช้คำสั่ง OPEN ในเมนู File
14. จะได้ไฟล์ที่มีนามสกุลจุด “*.PDF” (เช่น WORK1.PDF)
15. ทำการตรวจสอบความเรียบร้อยของต้นฉบับด้วยโปรแกรม Adobe Acrobat Exchange

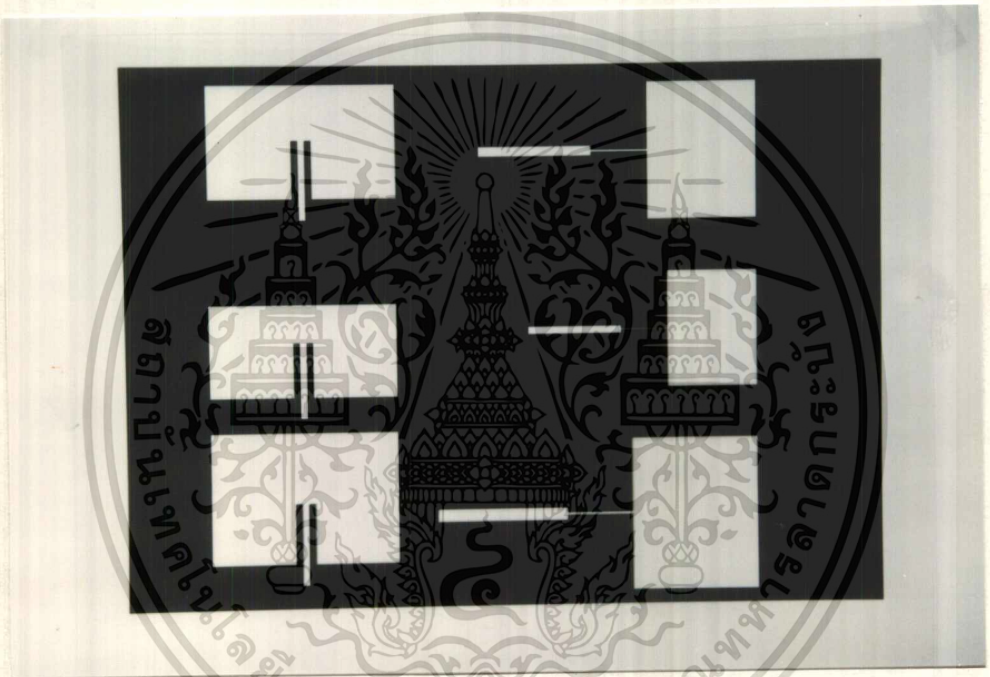


รูปที่ 3.12 โปรแกรม Adobe Acrobat Exchange

16. นำไปทำแผ่นฟิล์มอาร์ทเวิร์ค (Proscript File) แบบ Negative ที่ร้านรับทำแผ่น Output ที่มีเครื่องยิงฟิล์มที่มีความละเอียดสูง ดังแสดงดังรูปที่ 3.13
17. ตัดแผ่นวงจรพิมพ์ตามขนาดที่ต้องการทำ จากนั้นใช้กระดาษทรายขัดดูที่ขอบรอบๆ แผ่น วงจรพิมพ์ให้เรียบ
18. ทำความสะอาดผิวทองแดงทั้งสองด้านด้วยแอลกอฮอล์เพื่อขจัดออกไซด์
19. ตัดแผ่นครายฟิล์ม (Dry Film) ให้มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นวงจรพิมพ์เล็กน้อย
20. นำแผ่นวงจรพิมพ์ ไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น
21. ใช้ลมเป่าแผ่นวงจรพิมพ์ทั้งสองด้านให้แห้งสนิท ระวังอย่าให้เกิดลายนิ้วมือบนแผ่นทองแดงทั้งสองด้าน
22. ลอกแผ่นพลาสติก (Cover Sheet) ที่ติดอยู่กับแผ่นครายฟิล์มด้านใดด้านหนึ่งออกแล้วนำไปติดกับแผ่น PCB ที่เตรียมไว้ (ระวังอย่าให้มีฟองอากาศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานที่ไม่ถูกต้อง

23. ใช้ผ้าวางทับบนแผ่นวงจรพิมพ์ จากนั้นนำเตารีดไฟฟ้าที่ปรับความร้อนปานกลาง หรือ โดยประมาณ 110 องศาเซลเซียส รีดทับบนแผ่นผ้าให้ทั่ว (ระวังอย่าให้ความร้อนสูงจนเกินไป เพราะ ครายฟิล์มจะละลายได้) จากนั้นตรวจสอบดูว่าครายฟิล์ม ที่ติดบนแผ่น PCB มีฟองอากาศ แทรกอยู่หรือไม่ ถ้ามีให้นำเข็มปลายแหลมเจาะฟองอากาศแล้วไล่อากาศออก และให้ใช้เตารีดรีด ทับอีกครั้งหนึ่ง (ฟองอากาศนี้ทำให้ครายฟิล์มไม่เกาะติดกับแผ่นวงจรพิมพ์ เป็นเหตุให้ลายเส้นที่ จุดนี้ขาดได้) ดังรูปที่ 3.14



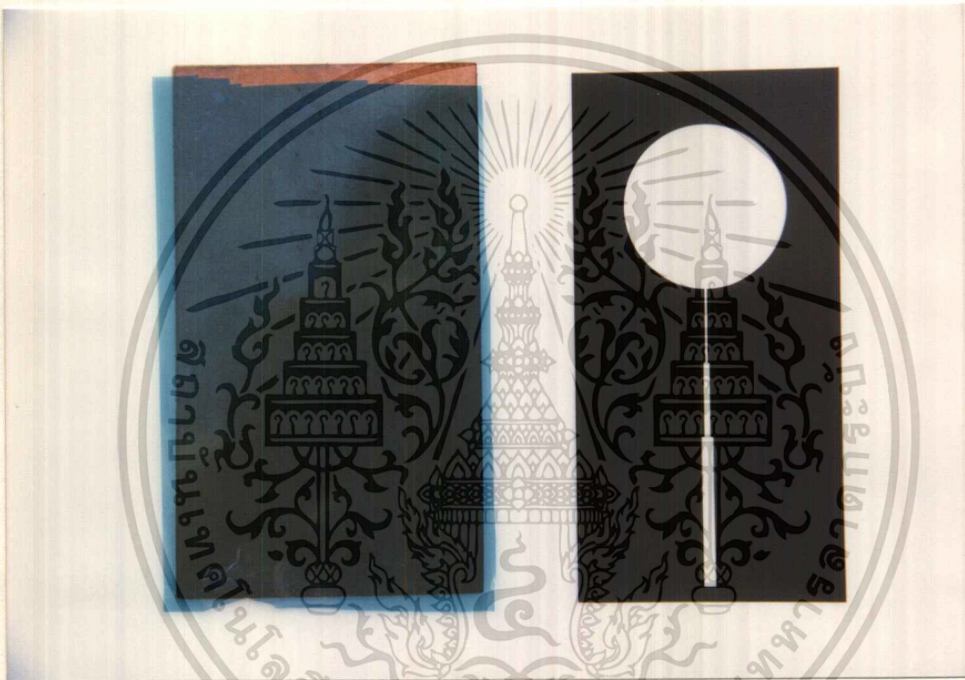
รูปที่ 3.13 แผ่นฟิล์มอาร์ทเวอร์ค

24. นำแผ่นวงจรพิมพ์ที่เคลือบแผ่นครายฟิล์มเรียบร้อยแล้วนั้นคือพร้อมที่จะขึ้นทำลายได้ จากนั้นนำหลอดไฟฟ้า (หลอดไส้) ขนาด 100 วัตต์ แขนงไว้เหนือแผ่นวงจรพิมพ์ ห่างประมาณ 5 นิ้ว

25. นำแผ่นฟิล์มอาร์ทเวอร์คแบบ Negative ที่มีขนาดเท่าแบบทับบนแผ่นวงจรพิมพ์ แล้วนำ กระจกใสมาวางทับอีกที เพื่อให้ฟิล์มอาร์ทเวอร์คแนบติดกับแผ่นวงจรพิมพ์แน่นขึ้น จากนั้นเปิดไฟ ให้กับหลอดไฟ เพื่อทำการถ่ายขึ้นลายใช้เวลาในการถ่ายประมาณ 25 นาที โดยในการวางฟิล์ม อาร์ทเวอร์คจะต้องมีระยะห่างของลายกับขอบของแผ่นวงจรพิมพ์เท่ากับความยาวของส่วนป้อน ไม่สำคัญใน ขั้ว SMA ที่ใช้ให้มีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26. ผสมน้ำยาล้างครายฟิล์ม (Developer) โดยนำผง Developer (โซเดียมคาร์บอเนต) ผสมลงในน้ำสะอาดจำนวน 200 cc. กวนให้ละลายจนหมด

27. ลอกแผ่นพลาสติก (Cover Sheet) ที่ติดอยู่บนแผ่นครายฟิล์มอีกชั้นหนึ่งออก แล้วนำมาล้างในน้ำยาล้างครายฟิล์มที่เตรียมไว้ ใช้ฟองน้ำถูเบาๆ จนกระทั่งปรากฏลายเส้นของอาร์ทเวิร์คเด่นชัด และไม่มีส่วนของครายฟิล์มที่ไม่ต้องการตกค้างอยู่ จากนั้นนำมาล้างน้ำให้สะอาดแล้วรอให้แห้ง ขั้นตอนนี้จะได้ลายครายฟิล์มที่เราต้องการดังรูปที่ 3.15



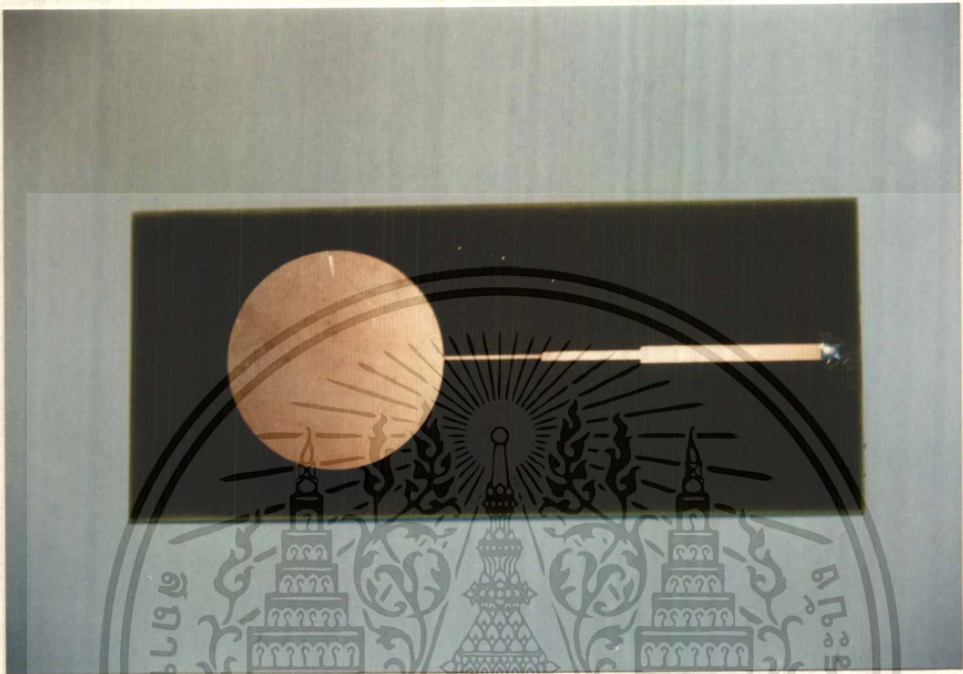
รูปที่ 3.14 แผ่นวงจรพิมพ์ที่ติดครายฟิล์มแล้ว

28. เตรียมน้ำยากรดกัดวงจรพิมพ์ใส่ลงในภาชนะ จากนั้นใส่แผ่นวงจรพิมพ์ลงไป เขย่าน้ำยาไปมาพร้อมทั้งตรวจสอบจนกระทั่งทองแดงในส่วนที่ไม่ต้องการถูกกัดออกจนหมด จะได้ลายเส้นตามต้องการ แล้วนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด

29. นำแผ่นวงจรพิมพ์ที่ต้องการลอกครายฟิล์มออก แช่ลงในภาชนะที่ใส่ทินเนอร์ ทิ้งไว้สักครู่ แผ่นครายฟิล์มจะอ่อนตัวและละลายออก จากนั้นจึงนำไปทำความสะอาด

30. นำแผ่นวงจรพิมพ์ไปทำความสะอาด และนำขั้วต่อ SMA มาเชื่อมต่อกับแผ่นวงจรพิมพ์ที่ตัวป้อนสัญญาณ ก็จะได้สายอากาศไมโครสตริปตามที่เราต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แผ่นวงจรมีพื้นที่เหลือแต่ลายทองแดงที่ต้องการ

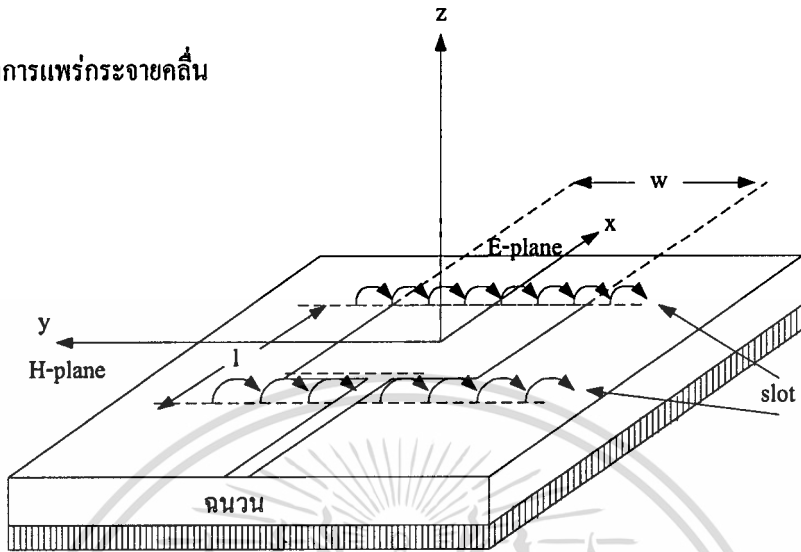
3.5 คุณสมบัติและการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป จะมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในโหมด TEM ซึ่งจะประกอบด้วยระนาบของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศ จะประกอบด้วยวัสดุฐานรองหรือ สารตัวกลาง และอากาศ อยู่บนระนาบเดียวกัน รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปจะเป็นดังรูปที่ 3.16

โดยที่การแพร่กระจายคลื่นของระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) จะมีคลื่นส่วนหนึ่งพุ่งออกไปสู่อากาศ และส่วนหนึ่งจะพุ่งเข้าไปภายในสารตัวกลาง ซึ่งรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าจะเป็นดังรูปที่ 3.17 (ก) ซึ่งจะมีลักษณะแผ่กว้างและราบเรียบ ทำให้มีบีมวิดท์ (Beamwidth) กว้างถึง 100 องศา ซึ่งบีมวิดท์ของระนาบสนามไฟฟ้า จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเปลี่ยน

เอกสความยาวของแผ่นแพร่กระจายคลื่น ใช้ แต่จะมีผลต่อค่าเพอร์มิตติวิตีของสารตัวกลาง ทำให้ความถี่ไม่เรโซแนนซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงได้แปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางการแพร่กระจายคลื่น



รูปที่ 3.16 การแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริป

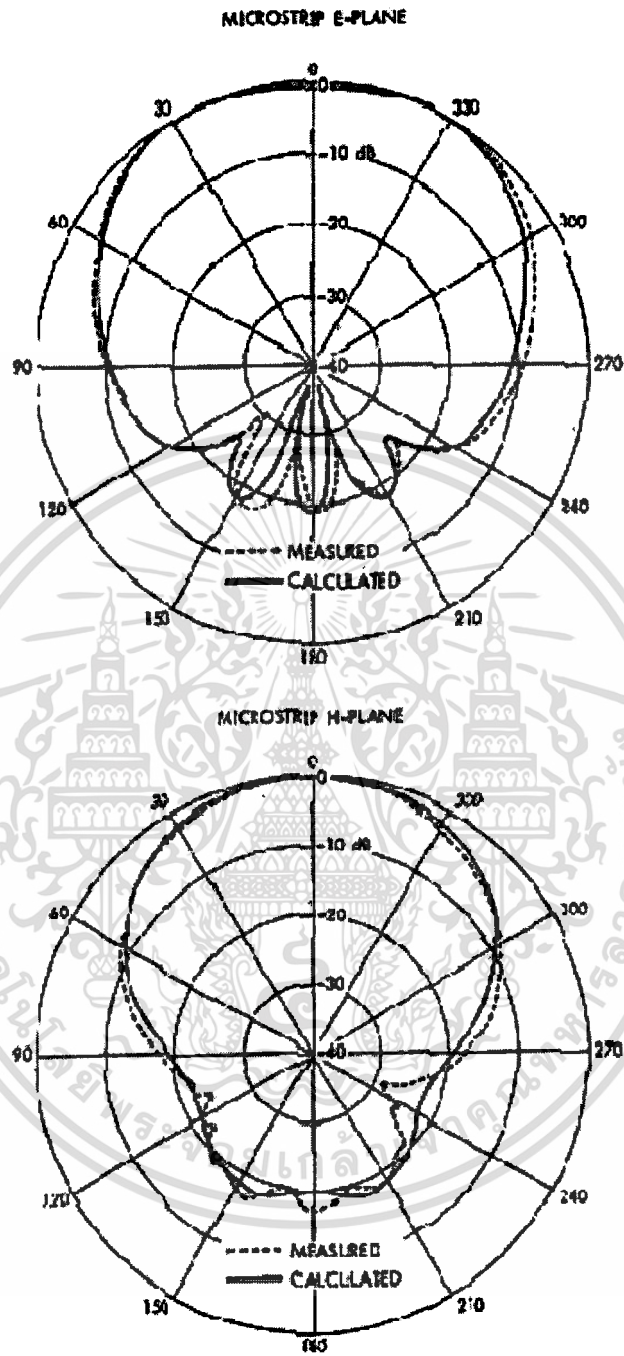
ในขณะที่การแพร่กระจายคลื่นของระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) จะเป็นดังรูปที่ 3.17 (ข) ซึ่งจะมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นเหมือนกับระนาบสนามไฟฟ้าแต่จะมีทิศทางพุ่งเข้าหาจุดศูนย์กลาง ดังรูปที่ 3.17 (ค) เนื่องจากการเหนี่ยวนำระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่นกับกราวด์เพลน ซึ่งการที่พุ่งเข้าหาจุดศูนย์กลางโดยสมบูรณ์ กราวด์เพลนจะต้องมีความยาวไม่สิ้นสุด

โดยปกติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปจะไม่เป็นแบบลิเนียร์โพลารไรเซชัน แต่มักจะเกิดเป็นรูปแบบของครอสโพลารไรเซชัน เนื่องจาก

1. ส่วนประกอบของสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่น อาจทำให้เกิดไฮเออร์ออเดอร์โหมดอันเป็นผลทำให้กำลังงาน ที่แพร่กระจายคลื่น มีค่าน้อยกว่ากำลังงานที่แพร่กระจายคลื่นในโหมดปกติ

2. ผลของปรากฏการณ์ฟริกกิง ในสายอากาศไมโครสตริปที่เกิดบริเวณด้านบนและด้านล่างของแผ่นแพร่กระจายคลื่น อันจะทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นไปตามแนวฮอริซอลตอลขึ้นมา ทำให้เกิดเป็นส่วนแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กอีกส่วนหนึ่งขึ้นมา ซึ่งวิธีการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดปรากฏการณ์ฟริกกิง ทำได้โดยการออกแบบให้ส่วนแพร่กระจายคลื่นมีความยาวน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

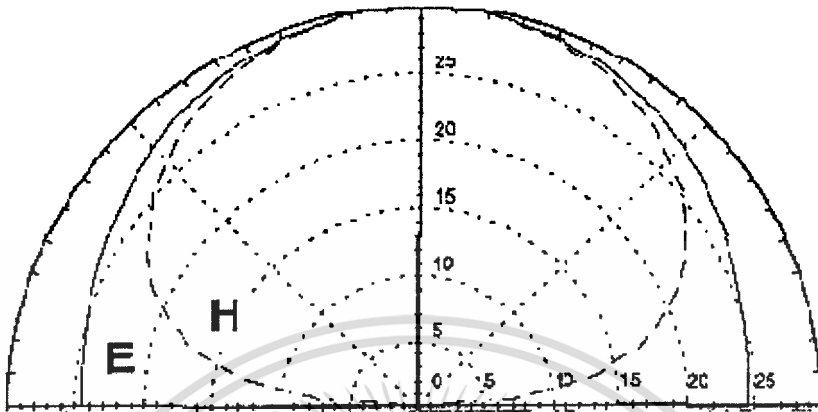


(ก) ระบบสนามไฟฟ้า

(ข) ระบบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Schaubert



ค) ระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กรวมกัน

รูปที่ 3.17 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

การทดลองนี้ใช้สายอากาศไมโครสตริปจำนวน 4 อัน โดยมี 2 ลักษณะคือ สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมกับสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมสร้างขึ้นบนสารตัวกลาง 2 ประเภทคือ อีพ็อกซี และดูรอยด์ ในตารางที่ 4.1 แสดงถึงลักษณะของสายอากาศที่สร้างขึ้น และตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของสายอากาศที่สร้างขึ้นทั้ง 4 อัน

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของสายอากาศ

ชิ้นงาน	ลักษณะแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น	สารตัวกลาง	ความถี่	สายส่งสัญญาณ
1	สี่เหลี่ยมผืนผ้า	อีพ็อกซี	2 GHz	หนึ่งตอน
2	สี่เหลี่ยมผืนผ้า	ดูรอยด์	2 GHz	หนึ่งตอน
3	วงกลม	อีพ็อกซี	2 GHz	สามตอน
4	วงกลม	ดูรอยด์	2 GHz	สามตอน

สำหรับการวัดและทดสอบค่าต่างๆ ในการทดลองนี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF Network Analyzers : รุ่น HP 8714C 300 kHz-3000 MHz) การวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุสามารถวัดและแสดงรูปสัญญาณพร้อมทั้งค่าต่างๆ ออกมาโดยละเอียด ส่วนอุปกรณ์อื่นที่ใช้ได้แก่ ตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับเครื่องวัดจะใช้สายเชื่อมต่อแบบ เอสเอ็มเอ ต่อเข้ากับ ขั้วเอสเอ็มเอของสายอากาศ

การทดลองจะประกอบไปด้วยการวัด และทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปทั้ง 4 อัน การทดลองใช้วัสดุชนิดต่างๆ วางบนสายอากาศ และการทดลองเปรียบเทียบสายอากาศไมโครสตริป ที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี กับ ที่ทำจากแผ่นดูรอยด์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้เหล่านี้จะนำมาวิเคราะห์หาความผิดพลาดของการคำนวณว่าได้ใกล้เคียงกับที่ทดลองหรือไม่เพื่อปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ขนาดของสายอากาศ

ลักษณะของสายอากาศ	ขนาดของสายอากาศ (เซนติเมตร)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4
ความกว้างของแผ่นตัวแพร่กระจาย	7.35	7.35	ไม่มี	ไม่มี
ความยาวของตัวแพร่กระจาย	3.620	5.121	ไม่มี	ไม่มี
รัศมีของตัวแพร่กระจาย	ไม่มี	ไม่มี	2.055	2.851
ความยาวของสายส่งตอนแรก	0.8	0.8	0.033	2.575
ความยาวของสายส่งตอนสอง	ไม่มี	ไม่มี	1.815	2.575
ความยาวของสายส่งตอนสาม	ไม่มี	ไม่มี	1.815	5.151
ความกว้างของสายส่งตอนแรก	0.26	0.26	0.033	0.135
ความกว้างของสายส่งตอนสอง	ไม่มี	ไม่มี	0.079	0.275
ความกว้างของสายส่งตอนสาม	ไม่มี	ไม่มี	0.153	0.496

4.2 การวัดการสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

4.2.1 ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี่ เข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ เข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas1)

3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas1

4. เลือกการวัดสะท้อนกลับโดยเลือกที่ Reflection

5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Freq เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยเลือก STOP ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์

6. สังเกตรูปสัญญาณที่ได้จากจอภาพแสดงผล ทำการปรับมุมมองการแสดงผลขนาดรูปของเอกสารสัญญาณให้สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนขึ้น บันทึกรูปสัญญาณนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ

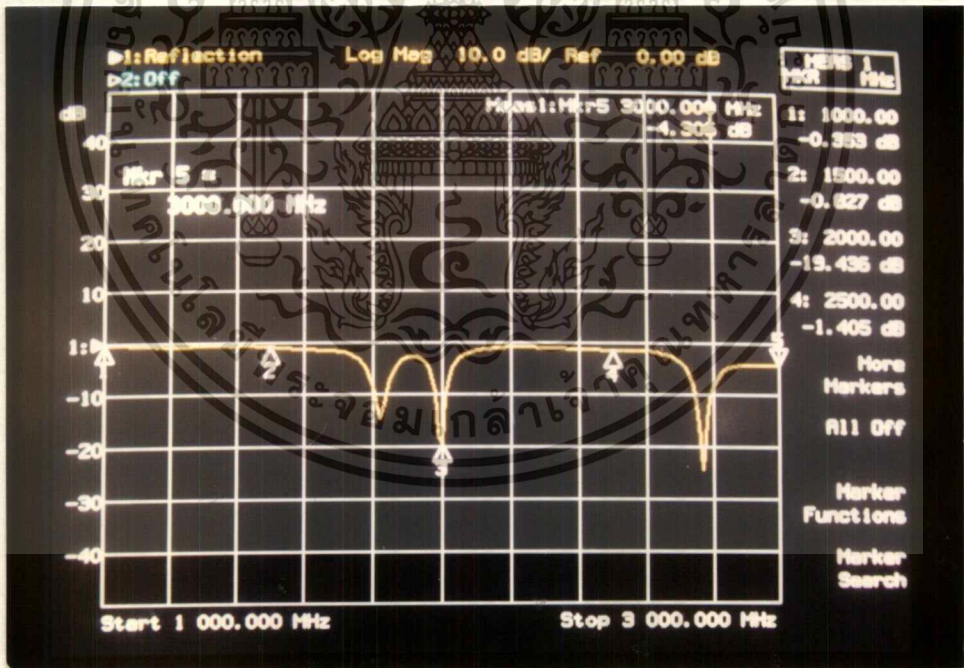
8. บันทึกรูปสัญญาณและผลการทดลองที่ได้

9. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3 ถึงข้อ 7 อีกครั้ง โดยเปลี่ยนเป็นสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ และสายอากาศวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี่ และดูรอยด์ตามลำดับ

10. บันทึกรูปสัญญาณ และผลการทดลองที่ได้

4.2.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี่ และดูรอยด์ในช่วงความถี่ 1 – 3 กิกะเฮิร์ตซ์ เป็นดังต่อไปนี้

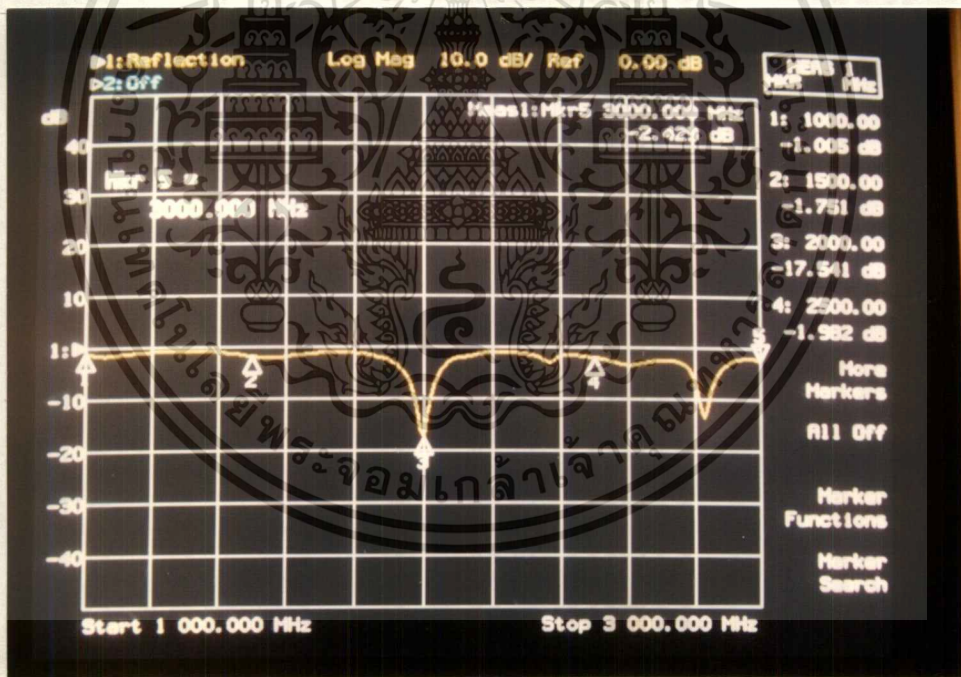


รูปที่ 4.1 สัญญาณสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)
1 กิกะเฮิรตซ์	-0.353
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-0.827
2 กิกะเฮิรตซ์	-19.436
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.405
3 กิกะเฮิรตซ์	-4.306

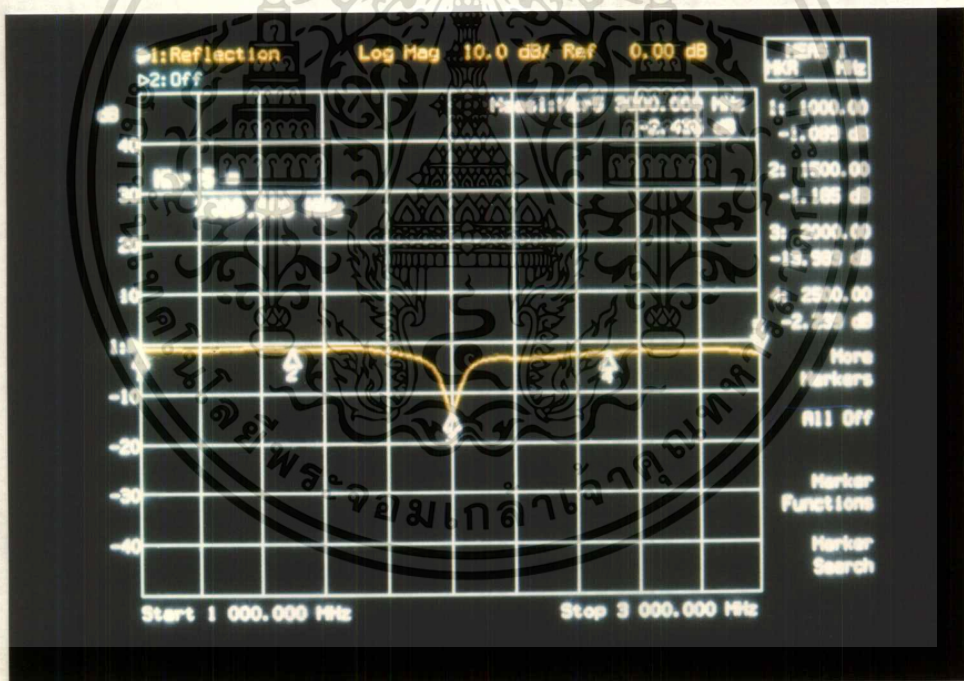


รูปที่ 4.2 สัญญาณสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นคูรอยด์

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)
1 กิกะเฮิรตซ์	-1.005
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.751
2 กิกะเฮิรตซ์	-17.541
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.982
3 กิกะเฮิรตซ์	-2.429

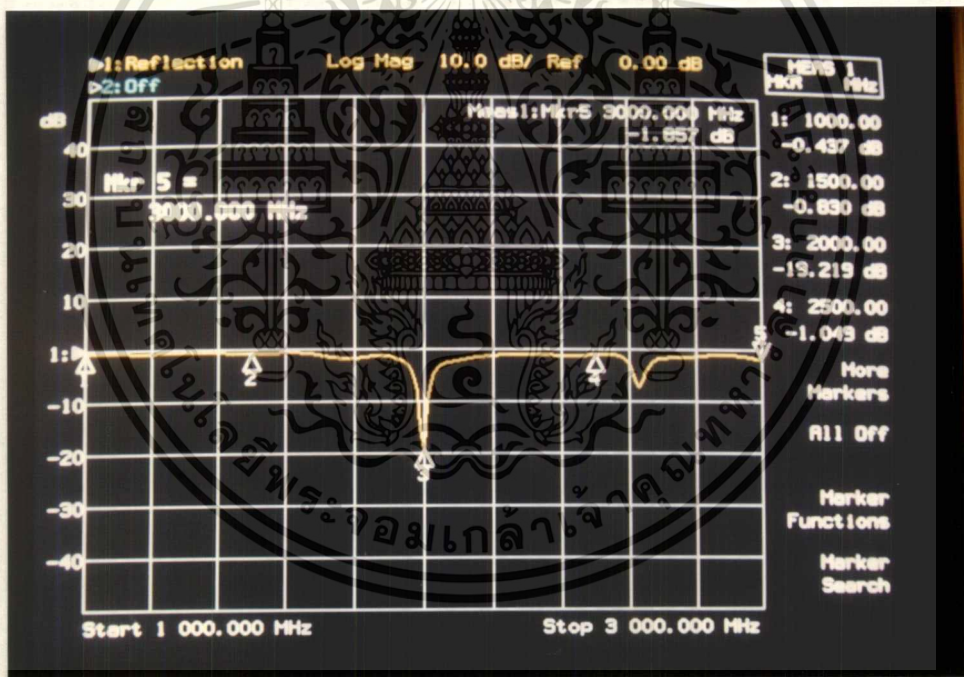


รูปที่ 4.3 สัญญาณสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)
1 กิกะเฮิรตซ์	-1.089
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.185
2 กิกะเฮิรตซ์	-13.983
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-2.239
3 กิกะเฮิรตซ์	-2.436



รูปที่ 4.4 สัญญาณสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นฉนวน

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)
1 กิกะเฮิรตซ์	-0.369
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-0.844
2 กิกะเฮิรตซ์	-16.591
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.035
3 กิกะเฮิรตซ์	-1.526

4.3 การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

4.3.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ
2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas1)
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas1
4. เลือกการวัดสะท้อนกลับโดยเลือกที่ Reflection
5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Freq เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก STOP ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
6. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) โดยกดปุ่ม Format จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ SWR
7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

8. บันทึกสรุปสัญญาณและผลการทดลองที่ได้

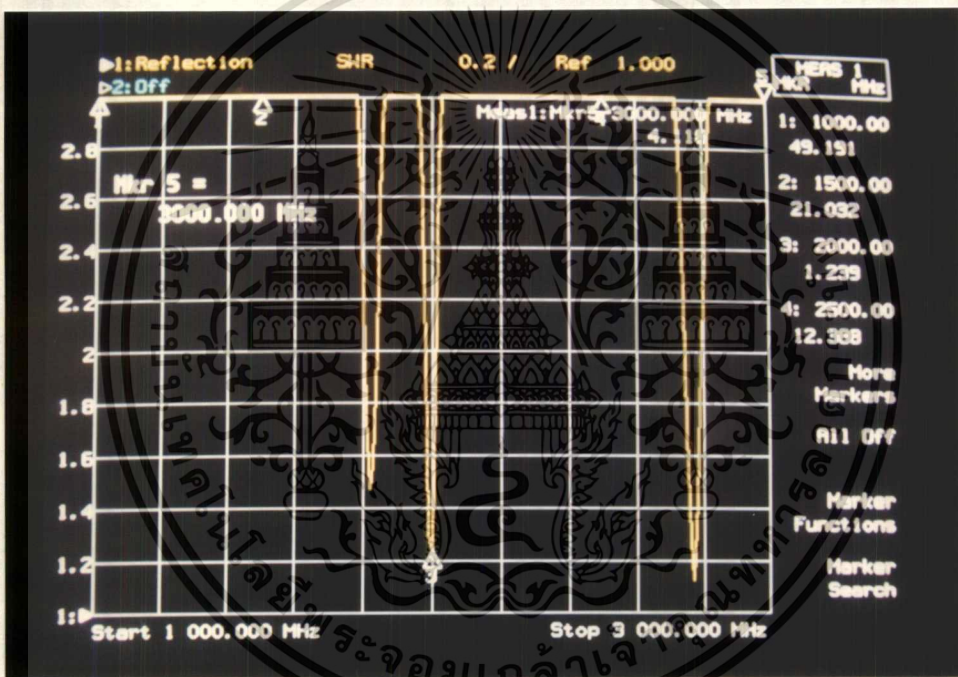
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3 ถึงข้อ 7 อีกครั้ง โดยเปลี่ยนเป็นสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นคูรอยด์ และสายอากาศวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี และคูรอยด์ตามลำดับ

10. บันทึกรูปสัญญาณ และผลการทดลองที่ได้

4.3.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองการหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และวงกลม โดยมีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี และคูรอยด์ในช่วงความถี่ 1 – 3 กิกะเฮิรตซ์เป็นดังนี้

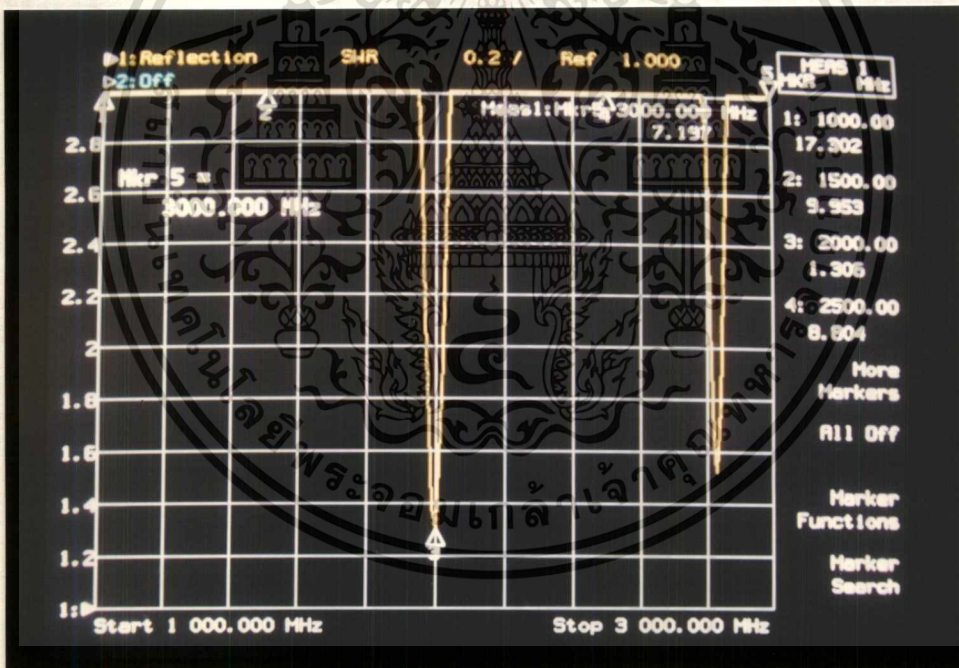


รูปที่ 4.5 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี่

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ (เท่า)
1 กิกะเฮิรตซ์	49.191
1.5 กิกะเฮิรตซ์	21.032
2 กิกะเฮิรตซ์	1.239
2.5 กิกะเฮิรตซ์	12.388
3 กิกะเฮิรตซ์	4.116

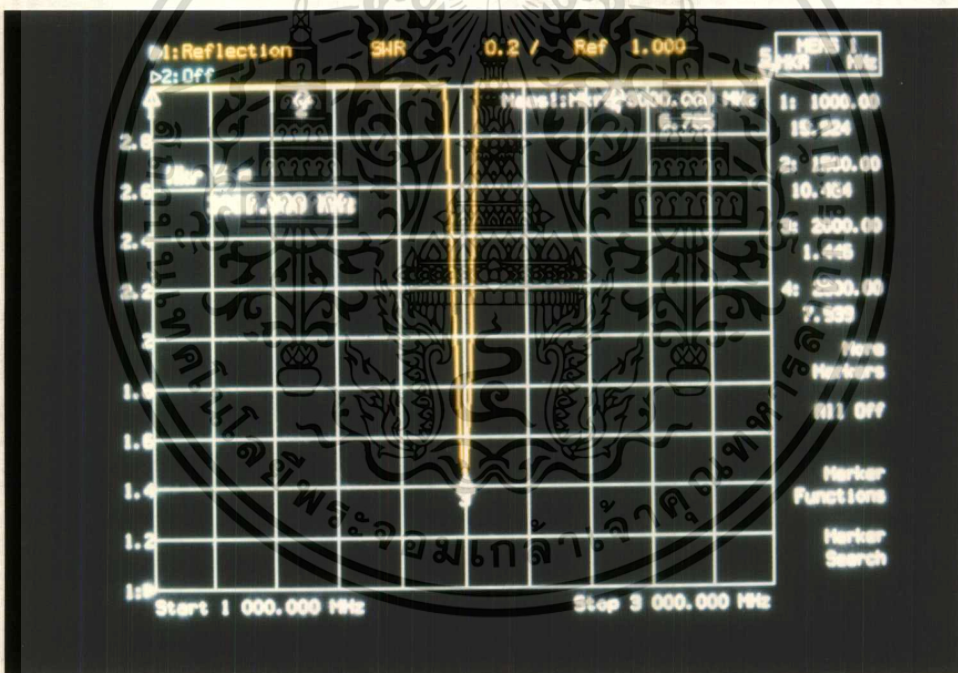


รูปที่ 4.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นคูรอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็น
ดูรอยด์

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ (เท่า)
1 กิกะเฮิรตซ์	17.302
1.5 กิกะเฮิรตซ์	9.953
2 กิกะเฮิรตซ์	1.306
2.5 กิกะเฮิรตซ์	8.804
3 กิกะเฮิรตซ์	7.197

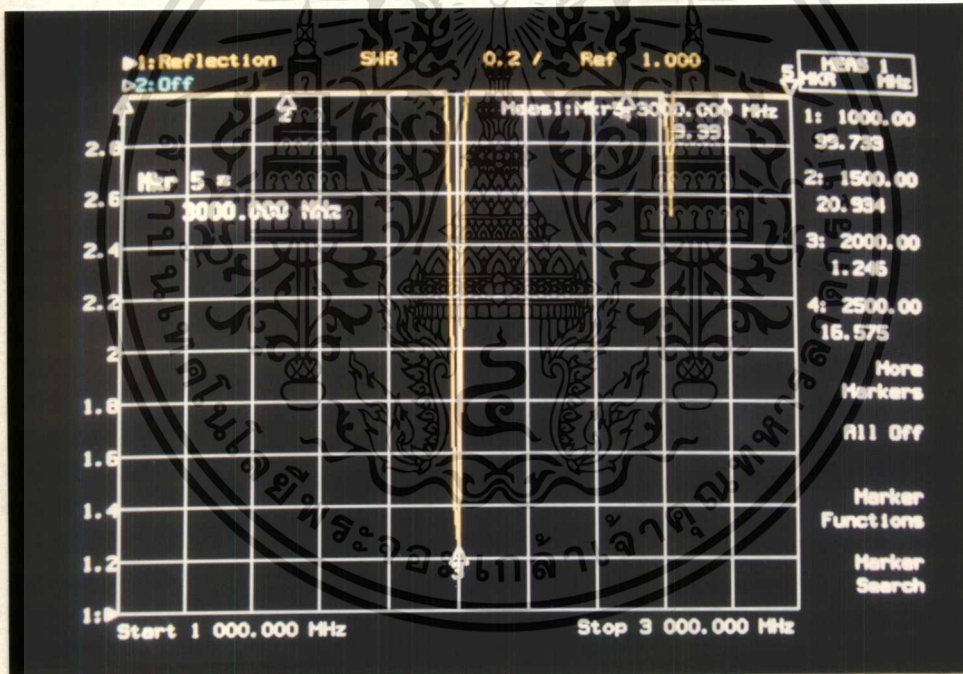


รูปที่ 4.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี่

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ (เท่า)
1 กิกะเฮิรตซ์	15.924
1.5 กิกะเฮิรตซ์	10.464
2 กิกะเฮิรตซ์	1.446
2.5 กิกะเฮิรตซ์	7.939
3 กิกะเฮิรตซ์	6.785



รูปที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นควอรอตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็น
คูรอยด์

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ (เท่า)
1 กิกะเฮิรตซ์	48.159
1.5 กิกะเฮิรตซ์	20.506
2 กิกะเฮิรตซ์	1.343
2.5 กิกะเฮิรตซ์	17.304
3 กิกะเฮิรตซ์	11.383

4.4 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และ สาย อากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

4.4.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม ที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ
2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas1)
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas1
4. เลือกการวัดสะท้อนกลับ โดยเลือกที่ Reflection
5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Freq เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
6. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม Format เลือกการวัดที่ Smitchart
7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
8. บันทึกรูปสัญญาณ และผลการทดลองที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3 ถึงข้อ 7 อีกครั้ง โดยเปลี่ยนเป็นสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นคูรอยด์ และสายอากาศวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีและคูรอยด์ตามลำดับ

10. บันทึกรูปสัญญาณ และผลการทดลองที่ได้

4.4.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองการหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และวงกลม โดยมีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี และคูรอยด์ในช่วงความถี่ 1 – 3 กิกะเฮิรตซ์เป็นดังนี้

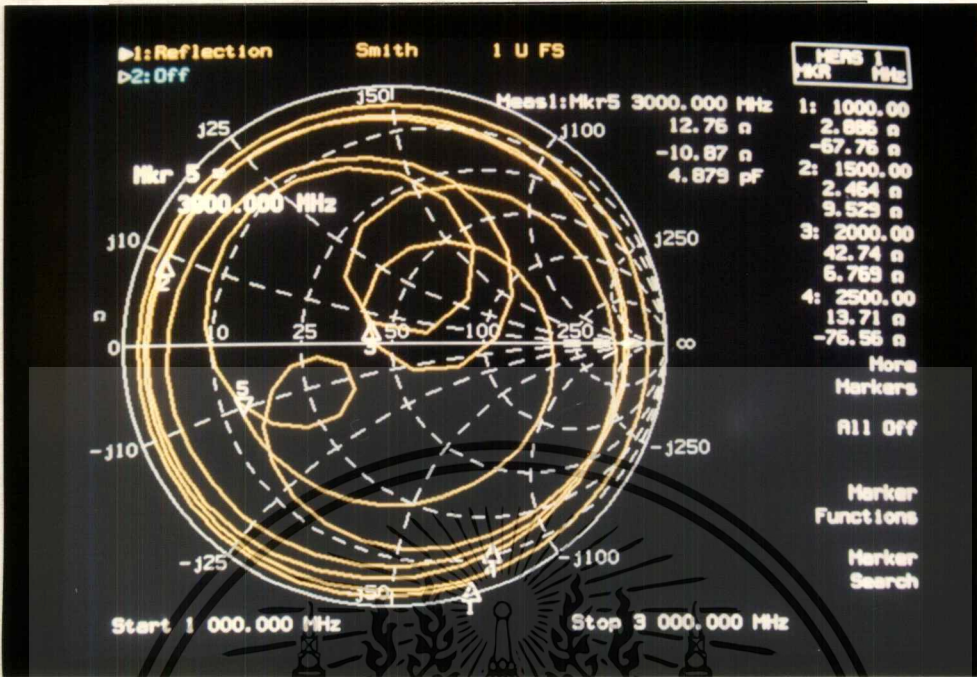
ตารางที่ 4.11 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	2.886
1.5 กิกะเฮิรตซ์	2.464
2 กิกะเฮิรตซ์	42.740
2.5 กิกะเฮิรตซ์	13.710
3 กิกะเฮิรตซ์	12.760

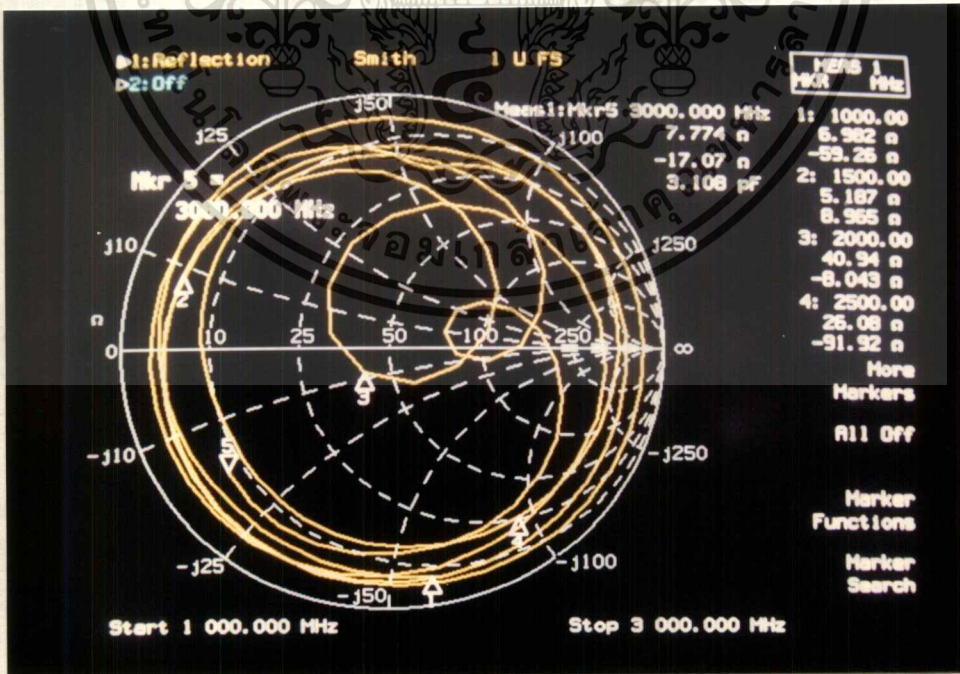
ตารางที่ 4.12 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นคูรอยด์

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	6.982
1.5 กิกะเฮิรตซ์	5.187
2 กิกะเฮิรตซ์	40.94
2.5 กิกะเฮิรตซ์	26.08
3 กิกะเฮิรตซ์	7.774

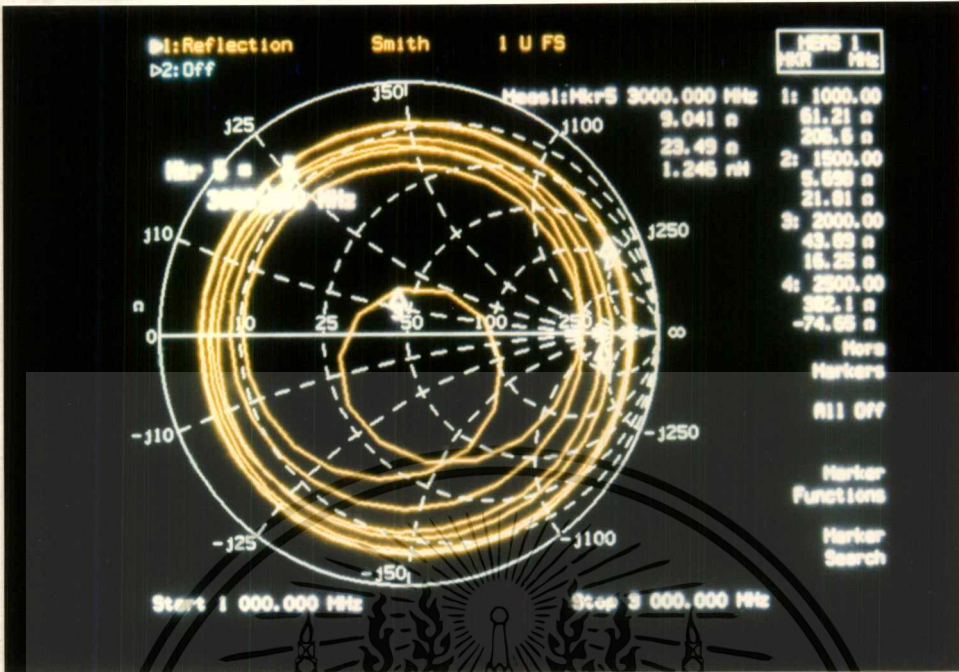
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี



รูปที่ 4.10 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีการคำนวณค่าไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี

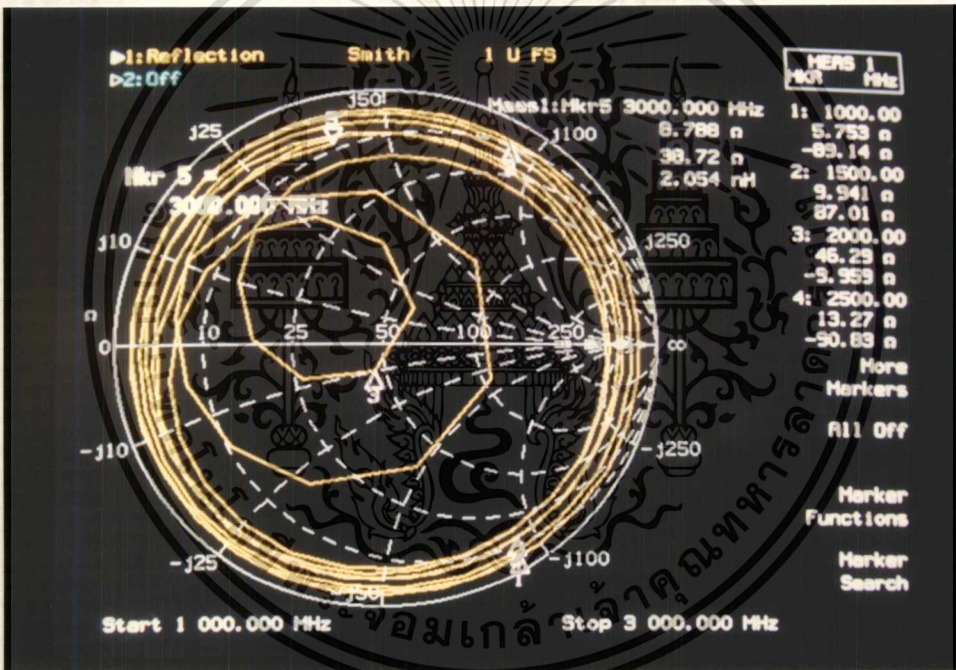
ตารางที่ 4.13 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	61.21
1.5 กิกะเฮิรตซ์	5.698
2 กิกะเฮิรตซ์	43.89
2.5 กิกะเฮิรตซ์	382.1
3 กิกะเฮิรตซ์	9.041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นคูรอยด์

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	4.496
1.5 กิกะเฮิรตซ์	9.810
2 กิกะเฮิรตซ์	46.53
2.5 กิกะเฮิรตซ์	12.71
3 กิกะเฮิรตซ์	7.248



รูปที่ 4.12 แผนภาพสมิทชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นคูรอยด์

4.5 การทดสอบวางวัสดุต่างๆ บนสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และ อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งใช้สายอากาศที่ได้ทำการทดสอบแล้ว ได้แก่ สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และ สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากแผ่นคูรอยด์ ความถี่ที่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์ ในไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การทดสอบจะใช้วัสดุชนิดต่างๆ วางอยู่บนสายอากาศ วัสดุที่ใช้เป็น กระดาษ แก้ว อีพ็อกซี

และพลาสติก และมีการปรับระยะความสูงจากวัสดุถึงตัวสายอากาศนำมาทดสอบ ซึ่งค่าความสูงนี้ จะมีค่าตามค่าความยาวคลื่น แล้วทำการวัดค่าต่างๆ ของสายอากาศที่ระยะตามที่กำหนดไว้

4.5.1 ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอ็มเอสเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas1)

3. นำแท่นปรับเลื่อนที่มีวัสดุที่ต้องการทดสอบมาวางทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ, ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยมีสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมวางอยู่ใต้วัสดุที่ต้องการทดสอบ

4. เปิดเครื่องแล้วเลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas1

5. เลือกการวัดสะท้อนกลับโดยเลือกที่ Reflection

6. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Freq เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์

7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 2 กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นทำการปรับเลื่อนระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ

8. บันทึกผลการทดลองที่ได้

9. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) โดยกดปุ่ม Format จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ SWR

10. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 2 กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นทำการปรับเลื่อนระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ

11. บันทึกผลการทดลองที่ได้

12. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม Format เลือกการวัดที่ Smithchart

13. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 2 กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นทำการปรับเลื่อนระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ

14. บันทึกผลการทดลองที่ได้ ลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอ็มเอสเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas1)

16. นำแท่นปรับเลื่อน ที่มีวัสดุที่ต้องการทดสอบมาวางทดสอบ หากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยมีสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมวางอยู่ใต้วัสดุที่ต้องการทดสอบ

17. เปิดเครื่องแล้วเลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas1

18. เลือกการวัดสะท้อนกลับ โดยเลือกที่ Reflection

19. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Freq เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์

20. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ $1 = 2$ กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นทำการปรับเลื่อนระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ

21. บันทึกผลการทดลองที่ได้

22. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) โดยกดปุ่ม Format จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ SWR

23. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ $1 = 2$ กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นทำการปรับเลื่อนระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ

24. บันทึกผลการทดลองที่ได้

25. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม Format เลือกการวัดที่ Smithchart

26. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ $1 = 2$ กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นทำการปรับเลื่อนระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ

27. บันทึกผลการทดลองที่ได้

28. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 - 27 โดยการเปลี่ยนเป็นสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นคูรอยด์ และสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี่ และคูรอยด์ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มี
สารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$	-20.314	-20.193	-20.363	-20.213
$\lambda/2 = 7.7$	-20.879	-20.684	-20.679	-20.684
$\lambda/3 = 5.2$	-20.503	-19.884	-20.478	-20.308
$\lambda/4 = 3.95$	-19.810	-18.753	-19.919	-19.494
$\lambda/5 = 3.2$	-19.816	-18.372	-19.529	-19.276
$\lambda/6 = 2.7$	-19.841	-17.883	-19.613	-19.227
$\lambda/7 = 2.34$	-19.871	-16.877	-19.182	-18.499
$\lambda/8 = 2.075$	-19.292	-15.905	-18.238	-17.613

ตารางที่ 4.16 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็น
อีพ็อกซีต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$	1.249	1.248	1.248	1.245
$\lambda/2 = 7.7$	1.237	1.229	1.230	1.230
$\lambda/3 = 5.2$	1.238	1.245	1.232	1.239
$\lambda/4 = 3.95$	1.243	1.282	1.253	1.258
$\lambda/5 = 3.2$	1.253	1.300	1.257	1.279
$\lambda/6 = 2.7$	1.260	1.323	1.269	1.285
$\lambda/7 = 2.34$	1.255	1.339	1.270	1.292
$\lambda/8 = 2.075$	1.321	1.459	1.351	1.397

ตารางที่ 4.17 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี
ต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$	42.01	42.09	42.01	42.28
$\lambda/2 = 7.7$	42.30	42.53	42.50	42.49
$\lambda/3 = 5.2$	42.53	42.49	42.85	42.59
$\lambda/4 = 3.95$	42.85	41.90	42.49	42.42
$\lambda/5 = 3.2$	42.97	42.03	42.93	42.51
$\lambda/6 = 2.7$	42.86	41.58	42.73	42.45
$\lambda/7 = 2.34$	42.99	41.10	42.58	42.10
$\lambda/8 = 2.075$	40.55	39.03	40.10	39.15

ตารางที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัว
กลางเป็นดูรอยด์ต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$	-13.370	-12.902	-13.390	-13.342
$\lambda/2 = 7.7$	-14.341	-11.962	-13.853	-13.567
$\lambda/3 = 5.2$	-12.729	-15.261	-13.890	-14.701
$\lambda/4 = 3.95$	-13.080	-21.801	-14.034	-15.818
$\lambda/5 = 3.2$	-15.262	-22.044	-16.098	-17.898
$\lambda/6 = 2.7$	-15.016	-19.089	-16.071	-16.651
$\lambda/7 = 2.34$	-15.126	-17.741	-16.191	-16.792
$\lambda/8 = 2.075$	-15.183	-17.295	-16.479	-17.605

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต กรุณาแจ้งให้ทราบล่วงหน้า

ตารางที่ 4.19 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็น
คูรอยด์ต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$	1.580	1.566	1.524	1.564
$\lambda/2 = 7.7$	1.431	1.645	1.419	1.463
$\lambda/3 = 5.2$	1.542	1.335	1.494	1.413
$\lambda/4 = 3.95$	1.584	1.375	1.508	1.477
$\lambda/5 = 3.2$	1.527	1.250	1.491	1.403
$\lambda/6 = 2.7$	1.547	1.334	1.475	1.470
$\lambda/7 = 2.34$	1.570	1.448	1.507	1.445
$\lambda/8 = 2.075$	1.557	1.425	1.476	1.392

ตารางที่ 4.20 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นคูรอยด์
ต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$	31.70	31.95	32.86	31.97
$\lambda/2 = 7.7$	34.92	30.44	35.24	34.19
$\lambda/3 = 5.2$	32.55	38.19	33.47	35.38
$\lambda/4 = 3.95$	31.70	36.78	33.34	33.85
$\lambda/5 = 3.2$	32.78	42.79	33.67	36.14
$\lambda/6 = 2.7$	32.39	42.52	34.37	35.37
$\lambda/7 = 2.34$	32.08	42.62	33.86	36.81
$\lambda/8 = 2.075$	32.44	49.09	34.46	39.25

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.21 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$	-13.700	-13.672	-14.092	-13.947
$\lambda/2 = 7.7$	-13.804	-13.027	-13.826	-13.631
$\lambda/3 = 5.2$	-13.606	-14.240	-14.382	-14.504
$\lambda/4 = 3.95$	-14.347	-15.959	-14.631	-15.119
$\lambda/5 = 3.2$	-19.367	-23.672	-20.201	-21.555
$\lambda/6 = 2.7$	-17.387	-21.831	-17.903	-18.604
$\lambda/7 = 2.34$	-19.568	-25.612	-19.988	-21.072
$\lambda/8 = 2.075$	-19.588	-25.613	-19.743	-20.794

ตารางที่ 4.22 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$	1.376	1.397	1.367	1.450
$\lambda/2 = 7.7$	1.381	1.426	1.375	1.402
$\lambda/3 = 5.2$	1.368	1.351	1.358	1.343
$\lambda/4 = 3.95$	1.266	1.250	1.317	1.308
$\lambda/5 = 3.2$	1.264	1.144	1.246	1.207
$\lambda/6 = 2.7$	1.262	1.114	1.241	1.220
$\lambda/7 = 2.34$	1.244	1.118	1.230	1.188
$\lambda/8 = 2.075$	1.294	1.162	1.267	1.239

ตารางที่ 4.23 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี
ต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$	44.29	43.61	44.22	44.01
$\lambda/2 = 7.7$	45.16	44.05	44.90	44.64
$\lambda/3 = 5.2$	45.25	43.08	45.31	44.42
$\lambda/4 = 3.95$	45.61	45.10	45.64	46.10
$\lambda/5 = 3.2$	45.90	46.95	46.34	47.07
$\lambda/6 = 2.7$	46.27	49.28	46.91	47.92
$\lambda/7 = 2.34$	45.50	50.03	46.23	47.66
$\lambda/8 = 2.075$	45.82	50.16	46.27	47.53

ตารางที่ 4.24 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัว
กลางเป็นคูรอยด์ต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$	-16.027	-15.603	-16.281	-16.642
$\lambda/2 = 7.7$	-18.034	-14.399	-17.845	-16.375
$\lambda/3 = 5.2$	-17.967	-22.407	-19.954	-22.906
$\lambda/4 = 3.95$	-18.294	-34.080	-19.720	-22.649
$\lambda/5 = 3.2$	-18.549	-21.015	-19.254	-22.126
$\lambda/6 = 2.7$	-18.630	-18.168	-18.502	-18.093
$\lambda/7 = 2.34$	-16.898	-14.702	-16.719	-15.970
$\lambda/8 = 2.075$	-17.632	-15.207	-17.024	-16.597

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็น
ดูรอยค้ต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท๋า)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี่
$\lambda/1 = 15.2$	1.285	1.334	1.287	1.311
$\lambda/2 = 7.7$	1.435	1.650	1.465	1.515
$\lambda/3 = 5.2$	1.344	1.474	1.326	1.314
$\lambda/4 = 3.95$	1.278	1.086	1.249	1.188
$\lambda/5 = 3.2$	1.283	1.102	1.259	1.221
$\lambda/6 = 2.7$	1.286	1.242	1.280	1.245
$\lambda/7 = 2.34$	1.317	1.311	1.317	1.327
$\lambda/8 = 2.075$	1.322	1.412	1.330	1.340

ตารางที่ 4.26 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยค้
ต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี่
$\lambda/1 = 15.2$	48.97	50.88	49.38	49.43
$\lambda/2 = 7.7$	51.76	52.17	52.33	52.75
$\lambda/3 = 5.2$	53.11	63.53	54.87	57.15
$\lambda/4 = 3.95$	51.93	53.75	52.17	52.43
$\lambda/5 = 3.2$	50.83	45.85	49.45	47.75
$\lambda/6 = 2.7$	49.59	41.11	48.52	46.60
$\lambda/7 = 2.34$	49.03	39.18	46.24	43.34
$\lambda/8 = 2.075$	48.76	36.50	46.16	42.57

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสำนักงานเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารตัวกลาง ที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารตัวกลางที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริปทำได้โดยการหาค่าตัวแปรคุณภาพ (Q – Factor) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงการสูญเสียของสายอากาศ ซึ่งสายอากาศที่มีค่าตัวแปรคุณภาพสูง หมายถึงสายอากาศนั้นมีแถบความถี่ที่แคบ และมีประสิทธิภาพที่ต่ำ

4.6.1 ค่าตัวแปรคุณภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

1) การหาค่าตัวแปรคุณภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมสามารถหาค่าตัวแปรคุณภาพได้จากสมการ

$$Q = \frac{Q_r \times R_c}{R_r} \quad (4.1)$$

โดยที่

$$Q_r = \frac{30 \times \sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}}{4 \times f_r \times h} \quad (4.2)$$

$$R_c = \left(0.00027 \times \sqrt{f_r} \times \frac{L}{W} \right) \times Q_r^2 \quad (4.3)$$

$$R_r = R_c - R_d \quad (4.4)$$

$$R_d = \frac{30 \times \tan \delta}{\epsilon_r} \times \frac{h}{L} \times \frac{\lambda_0}{W} \times Q_r^2 \quad (4.5)$$

เมื่อ Q_r คือ ตัวแปรคุณภาพแสดงการสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจายคลื่น

L คือ ความยาวของสายอากาศ, (เซนติเมตร)

W คือ ความกว้างของสายอากาศ, (เซนติเมตร)

$\epsilon_{r_{eff}}$ คือ ค่าคงที่สารตัวกลางสัมพัทธ์

f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ, (เฮิร์ตซ์)

h คือ ความสูงของสารตัวกลาง

$\tan \delta$ คือ ค่าการสูญเสียที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ (Loss Tangent)

λ_0 คือ ความยาวคลื่นใช้งาน, (เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี

จากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมโดยสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีจะได้ค่า W เท่ากับ 7.35 เซนติเมตร, L เท่ากับ 3.62 เซนติเมตร, h เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร, $\tan \delta$ เท่ากับ 0.0142 ที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 กิกะเฮิร์ตซ์ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.1 ถึง 4.5 จะได้ $Q = -1.23034$

3) สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์

จากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมโดยสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ จะได้ค่า W เท่ากับ 7.35 เซนติเมตร, L เท่ากับ 5.121 เซนติเมตร, h เท่ากับ 1.5748 มิลลิเมตร, $\tan \delta$ เท่ากับ 0.0009 ที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 กิกะเฮิร์ตซ์ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.1 ถึง 4.5 จะได้ $Q = -1.24783$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ จะมีค่าตัวแปรคุณภาพที่น้อยกว่าสายอากาศไมโครสตริปที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีแสดงว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ จะมีคุณภาพที่ต่ำกว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี

4.6.2 ค่าตัวแปรคุณภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

1) การหาค่าตัวแปรคุณภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมสามารถหาค่าตัวแปรคุณภาพได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q_t = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_c} \quad (4.6)$$

โดยที่

$$Q_c = \frac{w \times Z_0}{7.276\pi \times (f_r \times 10^{-14})^{1/2}} \quad (4.7)$$

$$Q_d = \left(\left(0.91 \times f_r \times \frac{\epsilon_{re} - 1}{\epsilon_{reff} - 1} \right) \times \frac{\epsilon_{reff}}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \times \tan \delta \right)^{-1} \quad (4.8)$$

$$Q_r = \frac{1.25 \times \sqrt{\epsilon_{re}}}{w \times h} \times \left(\frac{\lambda_0}{\pi} \right)^2 - \frac{0.2 \times w \times h}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \times \left(\frac{\pi}{\lambda_0} \right)^2 \quad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\epsilon_{re} = \left(\frac{\epsilon_r - \epsilon_{reff}}{1 + \frac{\epsilon_{reff}}{\epsilon_r} \times \left[\frac{h \times f_r}{1.566 \times Z_0} \right]^2} \right) \times \epsilon_r \quad (4.10)$$

เมื่อ w คือ ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นแพรกระจายคลื่น,
(เซนติเมตร)

h คือ ความสูงของสารตัวกลาง

ϵ_{reff} คือ ค่าคงที่สารตัวกลางสัมพัทธ์

f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ, (เฮิรตซ์)

$\tan \delta$ คือ ค่าการสูญเสียที่ความถี่ 10 กิกะเฮิรตซ์ (Loss Tangent)

λ_0 คือ ความยาวคลื่นใช้งาน, (เซนติเมตร)

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ของแผ่นแพรกระจายคลื่น, (โอห์ม)

Q_r คือ ตัวแปรคุณภาพแสดงการสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจาย
คลื่น

Q_d คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากสารตัวกลาง

Q_c คือ ตัวแปรแสดงการสูญเสียเนื่องจากความนำไฟฟ้า

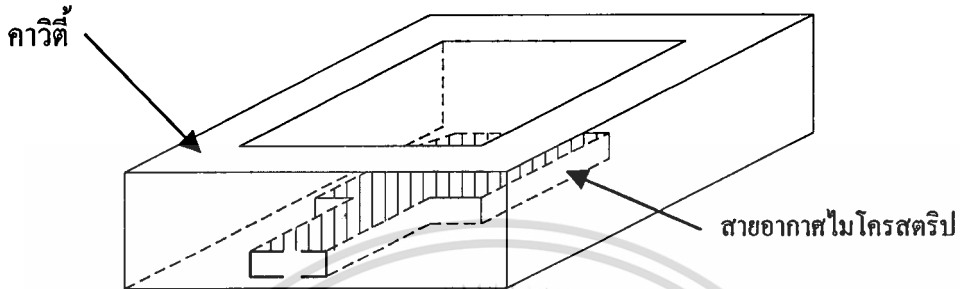
2) ตัวแปรคุณภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี จากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมโดยมีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี จะได้ค่า w เท่ากับ 4.0694 เซนติเมตร, h เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร, $\tan \delta$ เท่ากับ 0.0142, Z_0 เท่ากับ 797.788 โอห์ม ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.6 ถึง 4.10 จะได้ค่าตัวแปรคุณภาพเท่ากับ 0.0273

3) ตัวแปรคุณภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ จากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมโดยมีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซี จะได้ค่า w เท่ากับ 5.7048 เซนติเมตร, h เท่ากับ 1.5748 มิลลิเมตร, $\tan \delta$ เท่ากับ 0.0009, Z_0 เท่ากับ 496.187 โอห์ม ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.6 ถึง 4.10 จะได้ค่าตัวแปรคุณภาพเท่ากับ 0.0143567

ซึ่งจะเห็นได้ว่าสายอากาศไมโครสตริปที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ จะมีค่าตัวแปรคุณภาพต่ำกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การเปรียบเทียบผลของควาวิตีต่อสายอากาศไมโครสตริป

ในโครงการนี้ได้มีการนำควาวิตีมาใส่ให้กับสายอากาศไมโครสตริปทั้งแบบสี่เหลี่ยมและแบบวงกลม ซึ่งมีลักษณะเป็นเหล็กรูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปเมื่อนำไปใส่ในควาวิตี

โดยด้านบนของกล่องจะเปิดเพื่อเป็นส่วนแพร่กระจายคลื่น ซึ่งควาวิตีนี้จะสร้างขึ้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของสายอากาศไมโครสตริปให้มีความคงทนแข็งแรง ซึ่งได้มีการทดลอง และเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นกับสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ เมื่อนำไปใส่ในควาวิตี ดังตารางที่ 4.27 ถึง 4.30 กับไมใส่ควาวิตี ดังตารางที่ 4.31 ถึง 4.33

ตารางที่ 4.27 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีใส่ในควาวิตี

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	-0.353	49.191	2.886
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-0.827	21.032	2.464
2 กิกะเฮิรตซ์	-19.436	1.239	42.74
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.405	12.388	13.71
3 กิกะเฮิรตซ์	-4.306	4.116	12.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.28 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็น
คูรอยด์ใส่ในควาวิต

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	-1.005	17.302	6.982
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.751	9.953	5.187
2 กิกะเฮิรตซ์	-17.541	1.306	40.94
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.982	8.804	26.08
3 กิกะเฮิรตซ์	-2.429	7.197	7.774

ตารางที่ 4.29 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็น
อีพ็อกซี่ใส่ในควาวิต

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	-1.089	15.924	61.21
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.185	10.464	5.698
2 กิกะเฮิรตซ์	-13.983	1.446	43.89
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-2.239	7.939	382.1
3 กิกะเฮิรตซ์	-2.436	6.785	9.041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.30 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็น
ดูรอยดัดใส่ในควิตี

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (dB)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	-0.369	48.159	4.496
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-0.844	20.506	9.810
2 กิกะเฮิรตซ์	-16.591	1.343	46.53
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.035	17.304	12.71
3 กิกะเฮิรตซ์	-1.526	11.383	7.248

ตารางที่ 4.31 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็น
อีพ็อกซีไม่ใส่ในควิตี

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (dB)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	-1.957	8.914	12.61
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.924	9.066	5.860
2 กิกะเฮิรตซ์	-10.581	1.840	35.91
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-2.684	6.525	28.39
3 กิกะเฮิรตซ์	-3.250	5.408	9.748

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.32 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็น
 อีพ็อกซีไมใส่ในควิตี

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (dB)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	-2.074	8.416	12.45
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.748	9.971	5.257
2 กิกะเฮิรตซ์	-15.950	1.379	36.93
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-2.221	7.863	36.69
3 กิกะเฮิรตซ์	-2.641	6.628	8.148

ตารางที่ 4.33 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็น
 อีพ็อกซีไมใส่ในควิตี

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (dB)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	-3.272	5.371	12.49
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-5.033	3.548	14.46
2 กิกะเฮิรตซ์	-12.334	1.638	60.79
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-8.919	2.116	63.27
3 กิกะเฮิรตซ์	-2.412	7.250	7.548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.34 ผลการทดลองเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็น
 ครอบยัดไมใส่ในควาวิตี้

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (dB)	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	-0.437	39.733	5.753
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-0.830	20.934	9.941
2 กิกะเฮิรตซ์	-19.219	1.246	46.29
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.049	16.575	13.27
3 กิกะเฮิรตซ์	-1.857	9.391	8.788

ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อนำสายอากาศไมโครสตริปไปใส่ในควาวิตี้ จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศลดลง เป็นผลให้สายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเพิ่มขึ้น และยังทำให้แบนด์วิดท์ของสายอากาศลดลง ตามสมการที่ 4.11 ยกเว้นสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีเมื่อนำไปใส่ควาวิตี้จะทำให้คุณสมบัติของสายอากาศมีค่าที่ดีขึ้น

$$BW = \frac{S-1}{Q\sqrt{S}} \quad (4.11)$$

เมื่อ BW คือ แบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริป
 S คือ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง
 Q คือ ค่าตัวแปรคุณภาพ

บทที่ 5

บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไข และพัฒนา

5.1 บทสรุป

สายอากาศไมโครสตริปที่ได้ทำการออกแบบการสร้างและทดลอง เป็นลักษณะของสายอากาศแบบแผ่น ที่มีรูปร่างของส่วนที่ใช้แพร่กระจายคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และรูปวงกลม โดยสายอากาศแต่ละรูปแบบจะสร้างจากวัสดุฐานรอง 2 ชนิดคือ อีพ็อกซี่ และดูรอยด์ โดยสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้นนี้ จะใช้งานในช่วงความถี่ 1-3 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งได้แสดงทฤษฎีการออกแบบ การสร้าง และการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศของสายอากาศ โดยการทำทดสอบวัดค่ากำลังงานการสูญเสีย การหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ รวมทั้งการทดสอบหาผลกระทบเนื่องจากการนำวัสดุต่างๆ ที่จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปเกิดการเปลี่ยนแปลง และทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศที่สร้างจากวัสดุฐานรองทั้ง 2 ชนิด ซึ่งจากทฤษฎีการออกแบบ การสร้างสายอากาศไมโครสตริป สามารถนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบ การสร้างสายอากาศไมโครสตริป และสายอากาศย่านความถี่สูงรูปแบบอื่นๆ ต่อไป

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ

1. สามารถออกแบบ และสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม และวงกลม โดยมีความถี่ใช้งานในช่วง 1-3 กิกะเฮิรตซ์
2. สามารถนำสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้น ไปทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศได้
3. นำทฤษฎีการสร้าง, ออกแบบ, ทดลอง และผลการทดลอง ไปประยุกต์ใช้สร้างเป็นชุดฝึก และใบงานการทดลอง
4. สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่สร้างจากวัสดุฐานรองทั้ง 2 ชนิดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ปัญหา และแนวทางแก้ไข

ปัญหา

ในการจัดทำโครงการชุดนี้ สามารถที่จะสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

1. ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป เมื่อนำมาทดลอง และออกแบบสร้างผลที่ได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่ใช้คำนวณ

2. การคำนวณออกแบบสร้างสายอากาศต้องเสียเวลามาก เพราะค่าคงตัวของสารที่เป็นฉนวนมีหลายค่า ทำให้ต้องออกแบบโดยใช้ค่าคงตัวของฉนวนแต่ละค่าหลายครั้ง อย่างละเอียดก่อนที่จะทำการทดสอบ

3. การสร้างส่วนแผ่นแพร่กระจายคลื่นให้มีขนาดตรงตามที่คำนวณไว้ นั้น ทำได้ยากเพราะว่าค่าที่คำนวณได้มีความละเอียดมากกว่าที่จะออกแบบตามการคำนวณได้

4. ในการวัด และทดสอบค่าการสูญเสียกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งนั้น จะมีค่าไม่สอดคล้องกัน คือ ถ้าค่าสะท้อนกลับมีมากซึ่งเป็นผลที่ไม่ดี แต่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่วัดได้พร้อมกันจะมีค่าที่ดีซึ่งไม่ตรงตามหลักทฤษฎี

5. การบัดกรีเพื่อทำการเชื่อมต่อตัวเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ กับส่วนของสายส่งไมโครสตริปนั้นทำได้ยาก เพราะจุดเชื่อมต่อมีขนาดเล็ก และแผ่นทองแดงสามารถหลุดจากส่วนที่เป็นฉนวนได้ถ้าทำการบัดกรีใช้ความร้อนสูงเกินไป

6. เกิดคราบออกไซด์บนผิวแผ่นแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป ทำให้มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แนวทางแก้ไข

1. ในการออกแบบสายอากาศ ค่าคงตัวของสารที่ใช้เป็นฉนวนต้องกำหนดให้ได้ตรงตามค่าของสารนั้นจริง และถูกต้องมากที่สุด

2. ในส่วนของการสร้างสายอากาศไมโครสตริป จะต้องสร้างให้ได้ขนาดเท่ากับที่คำนวณให้มากที่สุด คือ ต้องออกแบบขนาดโดยใช้เครื่องมือที่สามารถกำหนด และวัดขนาดของแผ่นแพร่กระจายคลื่นที่มีความละเอียดสูงและให้เกิดค่าที่คลาดเคลื่อนจากการออกแบบที่น้อยที่สุด

3. การวัด และทดสอบถ้าจะให้ค่าต่างๆ มีความถูกต้อง และสอดคล้องกันนั้นต้องสร้างสายอากาศให้มีขนาดที่ถูกต้อง และมีความละเอียดในการสร้างให้สูงมากขึ้น

4. การบัดกรี ต้องใช้เครื่องมือบัดกรีที่ควบคุมอุณหภูมิของตัวหัวแรงได้อย่างสม่ำเสมอ เพื่อที่จะสามารถควบคุมอุณหภูมิในขณะที่ทำการเชื่อมต่อ ไม่ให้มีความร้อนสูงเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การขจัดคราบออกไซด์ทำได้โดยกรดทำความสะอาดแผ่นแพร์กระจายคลื่น และทำการเคลือบด้วยแล็คเกอร์

5.4 แนวทางการพัฒนาโครงการ

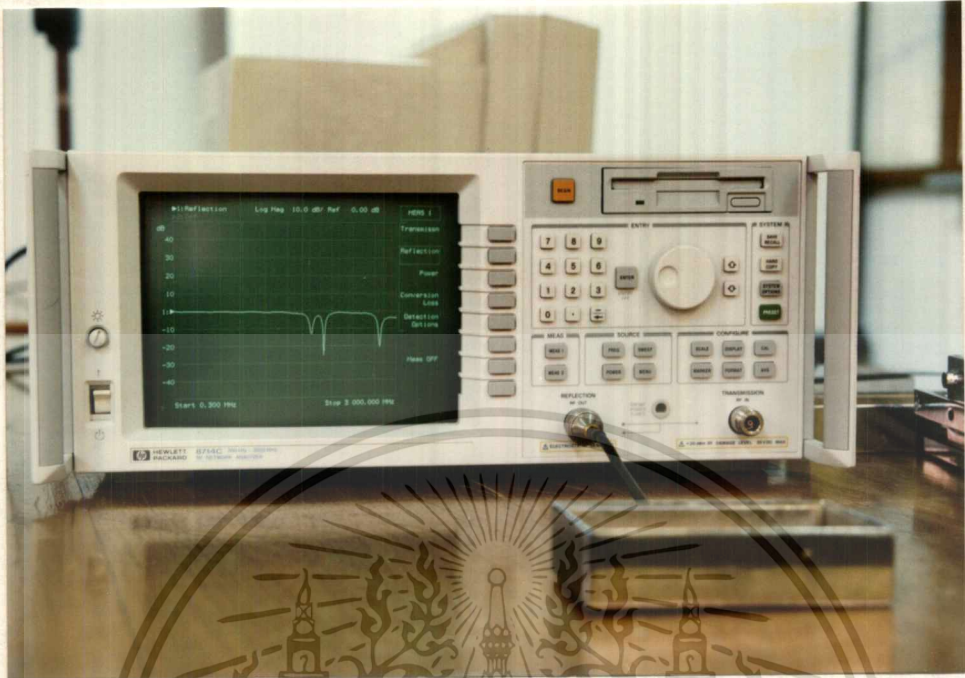
1. ในส่วนของทฤษฎีการออกแบบคำนวณสามารถออกแบบ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบเพื่อเพิ่มความถูกต้องให้มากขึ้น
2. ในการสร้างสายอากาศ สามารถสร้างสายอากาศให้มีอัตราการขยายของสายอากาศเพิ่มมากขึ้น โดยออกแบบให้สายอากาศเชื่อมต่อกันหลายๆ ตัว (Array) ซึ่งอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์เดียวกัน
3. การใช้เครื่องมือที่ใช้ในการตัดแผ่นวงจรพิมพ์ ที่สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์จะทำให้การสร้าง และออกแบบส่วนของ แผ่นแพร์กระจายคลื่นให้มีความละเอียดได้สูง สะดวก และรวดเร็วยิ่งขึ้น



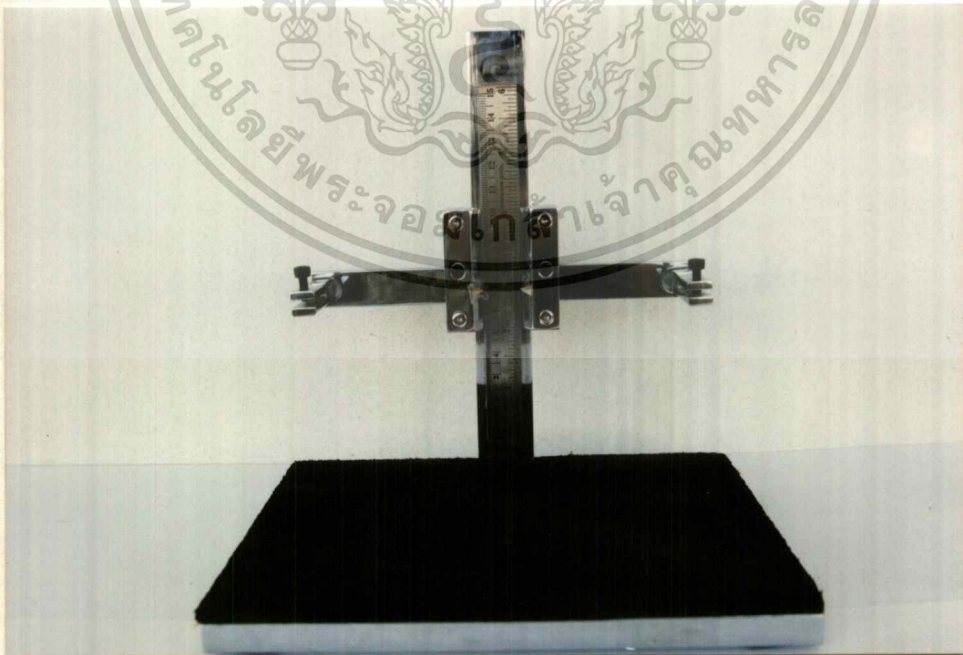
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

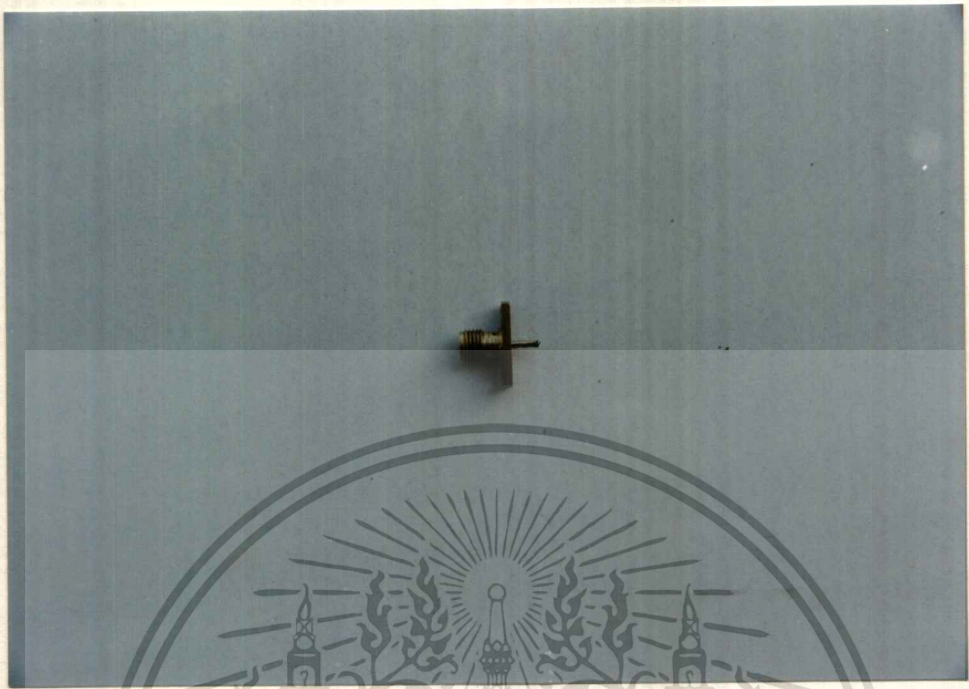


รูปที่ ก.1 เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ รุ่น HP 8714C

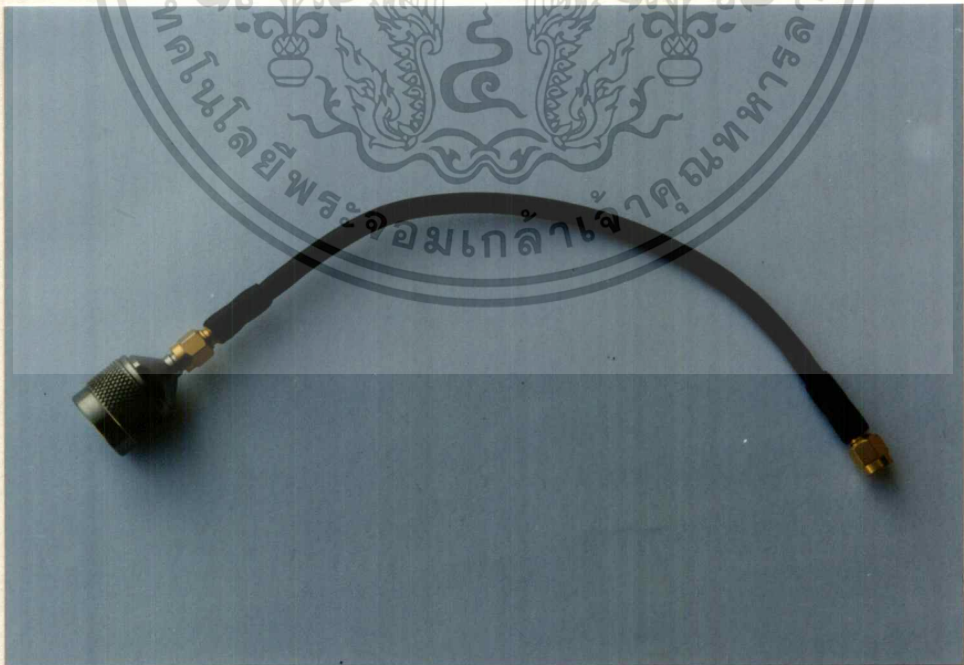


รูปที่ ก.2 แท่นสำหรับปรับเลื่อนวัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

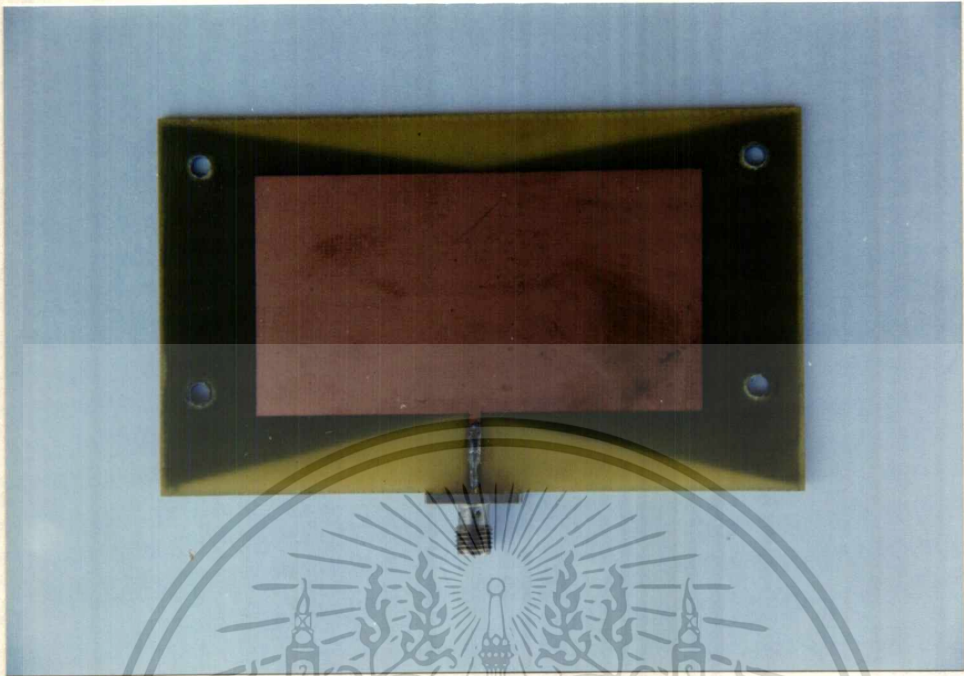


รูปที่ ก.3 ขั้วต่อ SMA

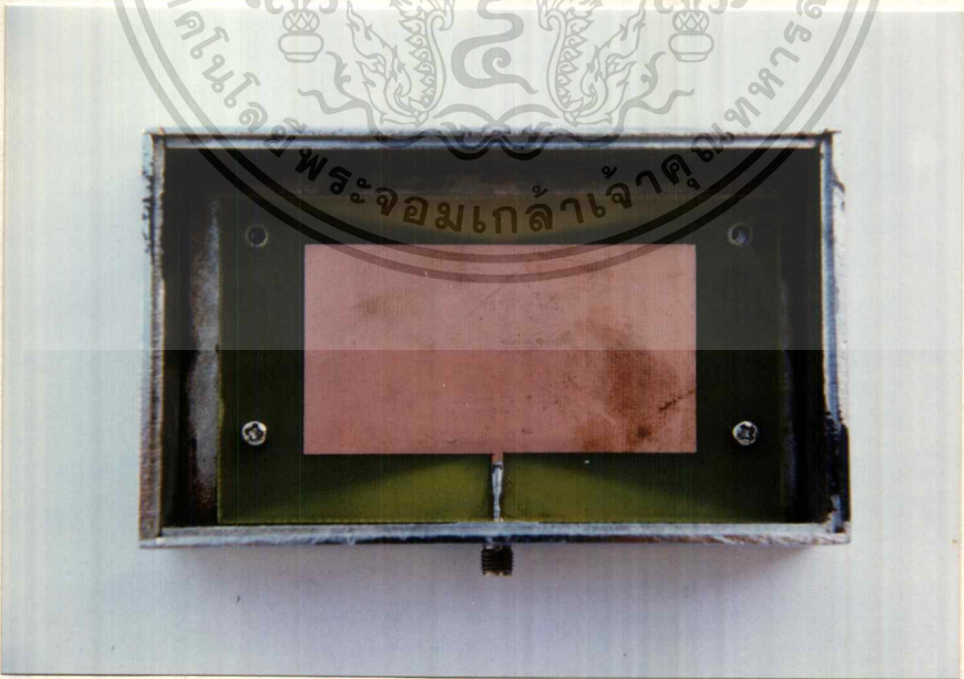


รูปที่ ก.4 สายต่อเครื่องวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดต่อสิ่งใดที่แนบมาและส่งไปยังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



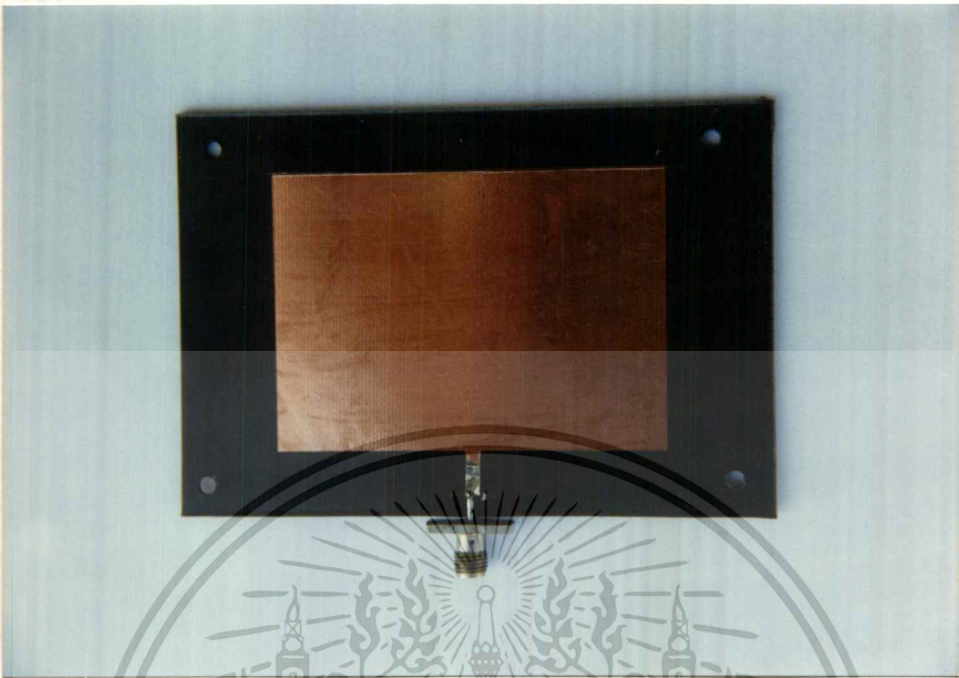
รูปที่ ก.5 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีที่ยังไม่ใส่ควาดี



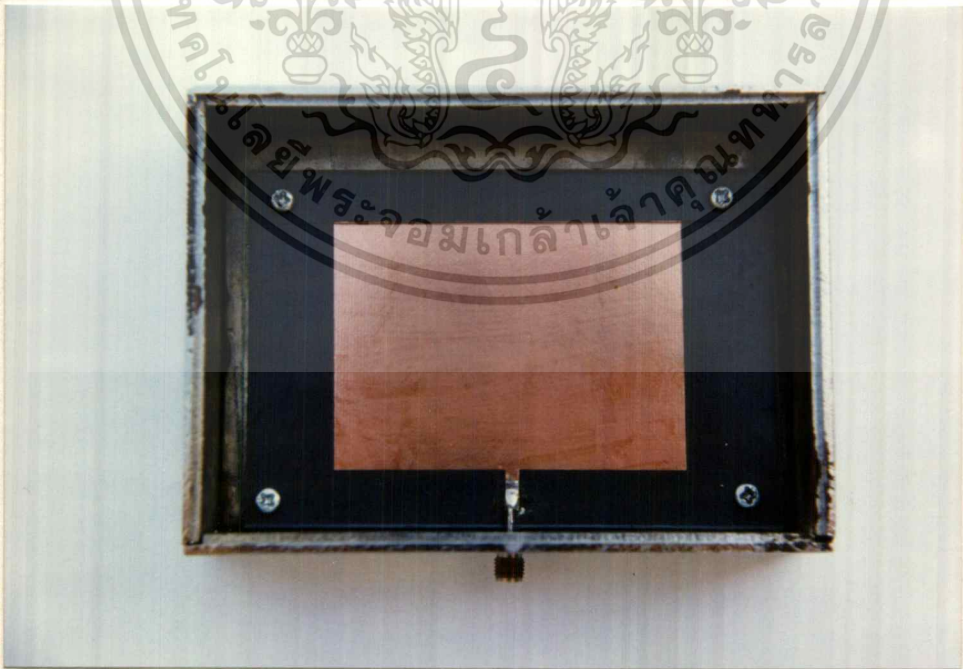
รูปที่ ก.6 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีที่ใส่ควาดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปตัดแปลงเนื้อหาและเผยแพร่ข้อมูลถึงเจ้าของเอกสารฉบับนี้ที่ส่งมอบให้

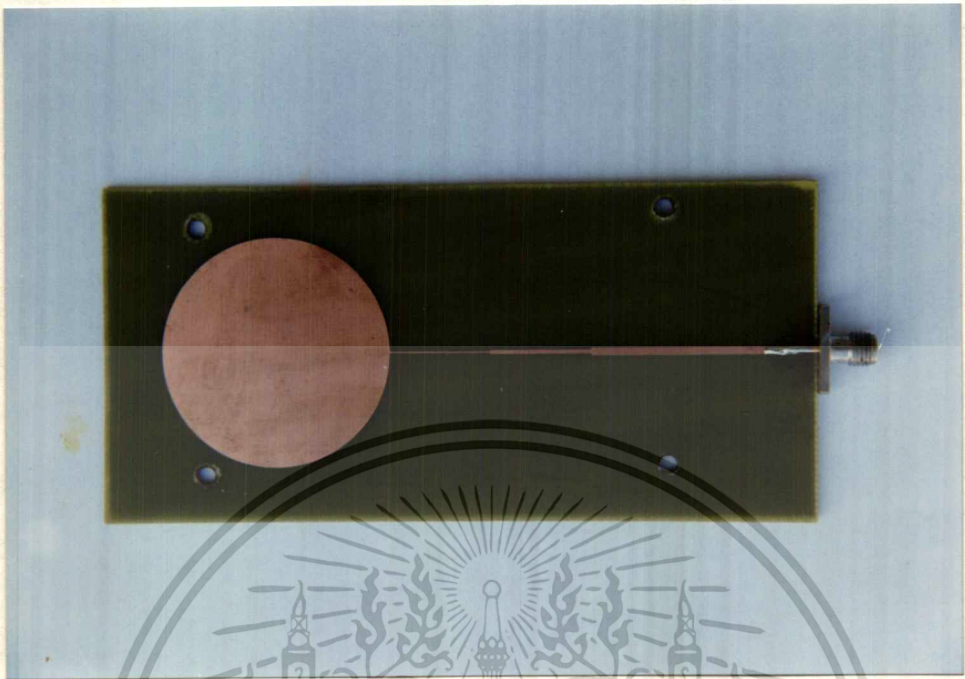


รูปที่ ก.7 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นฉนวนที่ยังไม่ใส่ค่าวิดี

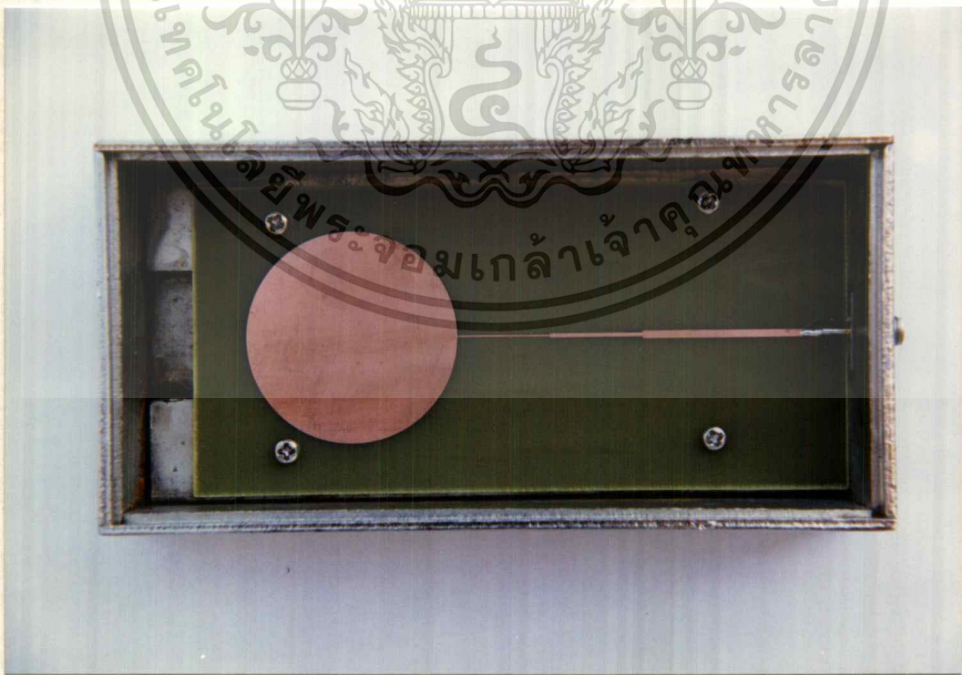


รูปที่ ก.8 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่มีสารตัวกลางเป็นฉนวนที่ใส่ค่าวิดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการณ

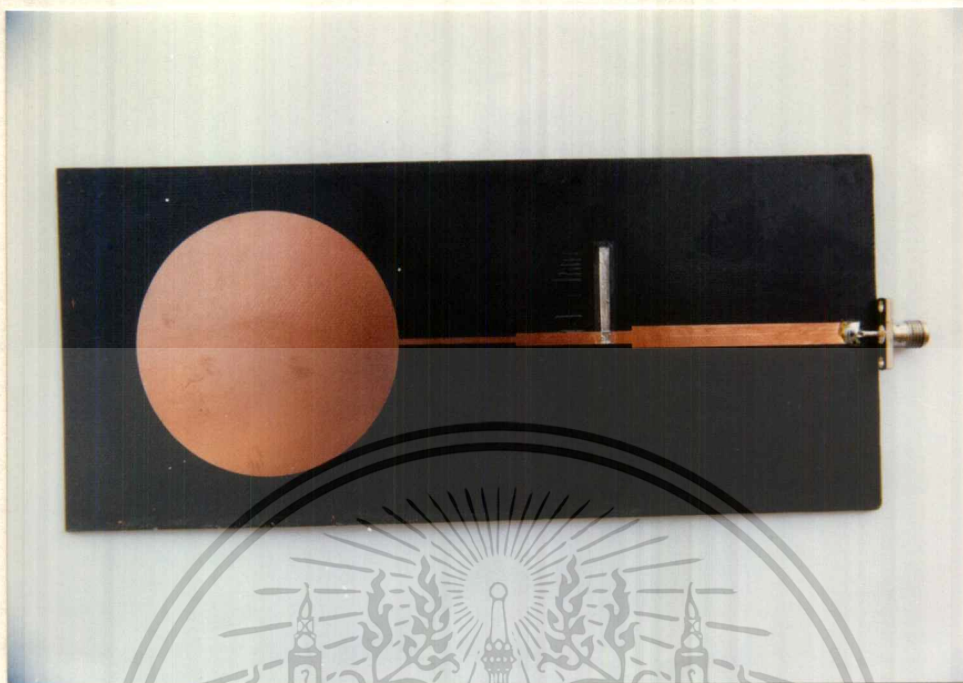


รูปที่ ก.9 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีที่ยังไม่ใส่ควอตซ์

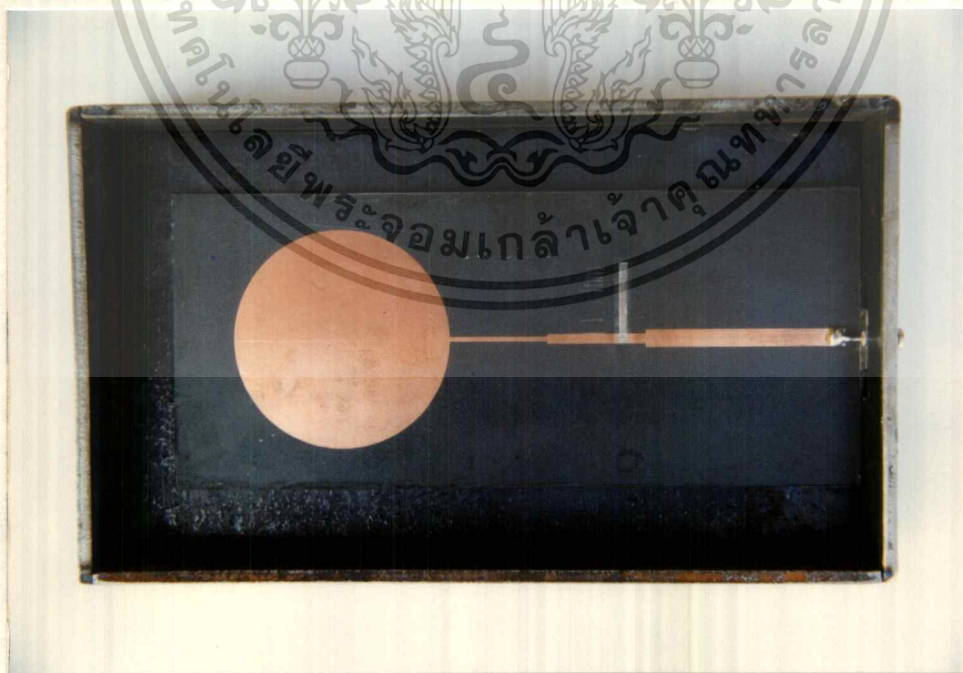


รูปที่ ก.10 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นอีพ็อกซีที่ใส่ควอตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.11 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ที่ยังไม่ใส่ควาวิตี



รูปที่ ก.12 สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่มีสารตัวกลางเป็นดูรอยด์ที่ใส่ควาวิตี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ตารางค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Characteristics of Insulating Materials*

Material Composition	T(°C)	Dielectric Constant ¹ at				Dissipation Factor ¹ at				Dielectric Strength in Volts/Mil at 25°C	DC Volume Resistivity in Ohm-cm at 25°C	Thermal Expansion (Linear) in Parts/°C	Softening Point in °C	Moisture Absorption in Percent
		(Frequency in Hertz)				(Frequency in Hertz)								
		10 ⁴	10 ⁶	3 × 10 ⁷	2.5 × 10 ¹⁰	10 ⁴	10 ⁶	3 × 10 ⁷	2.5 × 10 ¹⁰					
Ceramics:														
Aluminum oxide	25	8.80	8.80	8.79	—	0.00033	0.00030	0.0010	—	—	—	—	—	—
Barium titanate [†]	26	1143	—	600	100	0.0105	—	0.30	0.60	75	10 ¹² -10 ¹³	—	1400-1430	0.1
Calcium titanate	25	167.7	167.7	165	—	0.0002	—	0.0023	—	100	10 ¹² -10 ¹⁴	—	1510	<0.1
Magnesium oxide	25	9.65	9.65	—	—	<0.0003	<0.0003	—	—	—	—	—	—	—
Magnesium silicate	25	5.97	5.96	5.90	—	0.0005	0.0004	0.0012	—	—	>10 ¹⁴	9.2 × 10 ⁻⁶	1350	0.1-1
Magnesium titanate	25	13.9	13.9	13.8	13.7	0.0004	0.0005	0.0017	0.0065	—	—	—	—	—
Oxides of aluminum, silicon, magnesium, calcium, barium	24	6.04	—	5.90	—	0.0011	—	0.0024	—	—	—	7.7 × 10 ⁻⁶	1325	—
Porcelain (dry process)	25	5.08	5.04	—	—	0.0075	0.0078	—	—	—	—	—	—	—
Steatite 410	25	5.77	5.77	5.7	—	0.0007	0.0006	0.00089	—	—	—	—	—	—
Strontium titanate	25	232	232	—	—	0.0002	0.0001	—	—	100	10 ¹² -10 ¹⁴	—	1510	0.1
Titanium dioxide (rutile)	26	100	100	—	—	0.0003	0.00025	—	—	—	—	—	—	—
Glasses:														
Iron-sealing glass	24	8.30	8.20	7.99	7.84	0.0005	0.0009	0.00199	0.0112	—	10 ¹⁰ at 250°	132 × 10 ⁻⁷	484	poor
Soda-borosilicate	25	4.84	4.84	4.82	4.65	0.0036	0.0030	0.0054	0.0090	—	7 × 10 ⁷ at 250°	50 × 10 ⁻⁷	693	—
100% silicon dioxide (fused quartz)	25	3.78	3.78	3.78	3.78	0.0001	0.0002	0.00006	0.00025	410 (0.25°)	>10 ¹⁸	5.7 × 10 ⁻⁷	1667	—
Plastics:														
Alkyd resin	25	4.76	4.55	4.50	—	0.0149	0.0138	0.0108	—	—	—	—	—	—
Cellulose acetate-butylate, plasticized	26	3.30	3.08	2.91	—	0.018	0.017	0.028	—	250-400 (0.125°)	—	11-17 × 10 ⁻⁵	60-121	2.3
Cresylic acid-formaldehyde, 50% α-cellulose	25	4.51	3.85	3.43	3.21	0.036	0.055	0.051	0.038	1020 (0.033°)	3 × 10 ¹²	3 × 10 ⁻⁵	>125	1.2
Cross-linked polystyrene	25	2.58	2.58	2.58	—	0.0016	0.0020	0.0019	—	—	—	—	—	—
Epoxy resin (Araldite (N-501)	25	3.62	3.35	3.09	—	0.019	0.034	0.027	—	405 (0.125°)	>3.8 × 10 ⁷	4.77 × 10 ⁻⁵	109 (distortion)	0.14
Epoxy resin (Epon resin RN-48)	25	3.52	3.32	3.04	—	0.0142	0.0264	0.021	—	—	—	—	—	—
Foamed polystyrene, 0.25% filler	25	1.03	—	1.03	1.03	<0.0002	—	0.0001	—	—	—	—	85	low
Melamine-formaldehyde, α-cellulose	24	7.00	6.0	4.93	—	0.041	0.085	0.103	—	300-400	—	—	99 (stable)	0.4-0.6
Melamine-formaldehyde, 55% filler	26	5.75	5.5	—	—	0.0115	0.020	—	—	—	—	1.7 × 10 ⁻⁵	—	0.6
Phenol-formaldehyde (Bakelite BM 120)	25	4.36	3.95	3.70	3.55	0.0280	0.0380	0.0438	0.0390	300 (0.125°)	10 ¹¹	30-40 × 10 ⁻⁶	<135 (distortion)	<0.6
Phenol-formaldehyde, 50% paper laminate	26	4.60	4.04	3.57	—	0.034	0.057	0.060	—	—	—	—	—	—
Phenol-formaldehyde, 65% mica, 4% lubricants	24	4.78	4.72	4.71	—	0.0082	0.0115	0.0126	—	—	—	—	—	—
Polycarbonate	—	2.96	—	—	—	0.010	—	—	—	364 (0.125°)	2 × 10 ¹⁶	7 × 10 ⁻⁵	135 (deflection)	—
Polychlorotrifluoroethylene	25	2.42	2.32	2.29	2.28	0.0082	—	0.0028	0.0053	—	10 ¹³	—	—	—

Characteristics of Insulating Materials* (cont'd.)

Material Composition	T(°C)	Dielectric Constant ¹ at				Dissipation Factor ¹ at				Dielectric Strength in Volts/Mil at 25°C ¹	DC Volume Resistivity in Ohm-cm at 25°C ¹	Thermal Expansion (Linear) in Parts/°C ¹	Softening Point in °C ¹	Moisture Absorption, in Percent
		(Frequency in Hertz)				(Frequency in Hertz)								
		10 ¹	10 ⁶	3 × 10 ⁹	2.5 × 10 ¹⁰	10 ¹	10 ⁶	3 × 10 ⁹	2.5 × 10 ¹⁰					
Waxes:														
Beeswax, yellow	23	2.53	2.45	2.39	—	0.0092	0.0090	0.0075	—	—	—	—	45-64 (melts)	—
Dichloronaphthalenes	23	2.98	2.93	2.89	—	0.0003	0.0017	0.0037	—	—	—	—	35-63 (melts)	nil
Polybutene	25	2.34	2.30	2.27	—	0.00133	0.00133	0.0009	—	—	—	—	57	—
Vegetable and mineral waxes	25	2.3	2.3	2.25	—	0.0004	0.0004	0.00046	—	—	—	—	—	—
Rubbers:														
Butyl rubber	25	2.35	2.35	2.35	—	0.0010	0.0010	0.0009	—	—	—	—	—	—
GR-S rubber	25	2.90	2.82	2.75	—	0.0120	0.0080	0.0057	—	870 (0.040°)	—	2 × 10 ¹⁵	—	—
Gutta-percha	25	2.53	2.47	2.40	—	0.0042	0.0120	0.0060	—	—	—	10 ¹⁵	—	—
Hevea rubber (pale crepe)	25	2.4	2.4	2.15	—	0.0018	0.0050	0.0030	—	—	—	—	—	—
Hevea rubber, vulcanized (100 pts pale crepe, 6 pts sulfur)	27	2.74	2.42	2.36	—	0.0446	0.0180	0.0047	—	—	—	—	—	—
Neoprene rubber	24	6.26	4.5	4.00	4.0	0.038	0.090	0.034	0.025	300 (0.125°)	—	8 × 10 ¹²	—	nil
Organic polysulfide, fillers	23	110	30	16	13.6	0.39	0.28	0.22	0.10	—	—	—	—	—
Silicone-rubber compound	25	3.20	3.16	3.13	—	0.0030	0.0032	0.0097	—	—	—	—	—	—
Woods:²														
Balsa wood	26	1.37	1.30	1.22	—	0.0120	0.0135	0.100	—	—	—	—	—	—
Douglas fir	25	1.93	1.88	1.82	1.78	0.026	0.033	0.027	0.032	—	—	—	—	—
Douglas fir, plywood	25	1.90	—	—	1.6	0.0230	—	—	0.0220	—	—	—	—	—
Mahogany	25	2.25	2.07	1.88	1.6	0.025	0.032	0.025	0.020	—	—	—	—	—
Yellow birch	25	2.70	2.47	2.13	1.87	0.029	0.040	0.033	0.026	—	—	—	—	—
Yellow poplar	25	1.75	—	1.50	1.4	0.019	—	0.015	0.017	—	—	—	—	—
Miscellaneous:														
Amber (fossil resin)	25	2.65	—	2.6	—	0.0056	—	0.0090	—	2300 (0.125°)	Very high	—	200	—
DeKhotinsky cement	23	3.23	—	2.96	—	0.024	—	0.021	—	—	—	9.8 × 10 ⁻⁵	80-85	—
Gilsonite (99.9% natural bitumen)	26	2.58	2.56	—	—	0.0016	0.0011	—	—	—	—	—	155 (melts)	—
Shellac (natural XL)	28	3.47	3.10	2.86	—	0.031	0.030	0.0254	—	—	—	10 ¹⁶	80	low after baking
Mica, glass-bonded	25	7.39	—	—	—	0.0013	—	—	—	—	—	—	—	<0.5
Mica, glass, titanium dioxide	24	9.0	—	—	—	0.0026	—	0.0040	—	—	—	—	400	—
Ruby mica	26	5.4	5.4	5.4	—	0.0003	0.0002	0.0003	—	3800-5600 (0.040°)	—	5 × 10 ¹³	—	—
Paper, royalgrey	25	2.99	2.77	2.70	—	0.038	0.066	0.056	—	202 (0.125°)	—	—	—	—
Selenium (amorphous)	25	6.00	6.00	6.00	6.00	<0.0003	<0.0002	0.00018	0.0013	—	—	—	—	—
Asbestos fiber-chrysotile paper	25	3.1	—	—	—	0.025	—	—	—	—	—	—	—	—
Sodium chloride (fresh crystals)	25	5.90	—	—	5.90	<0.0002	—	—	<0.0005	—	—	—	—	—

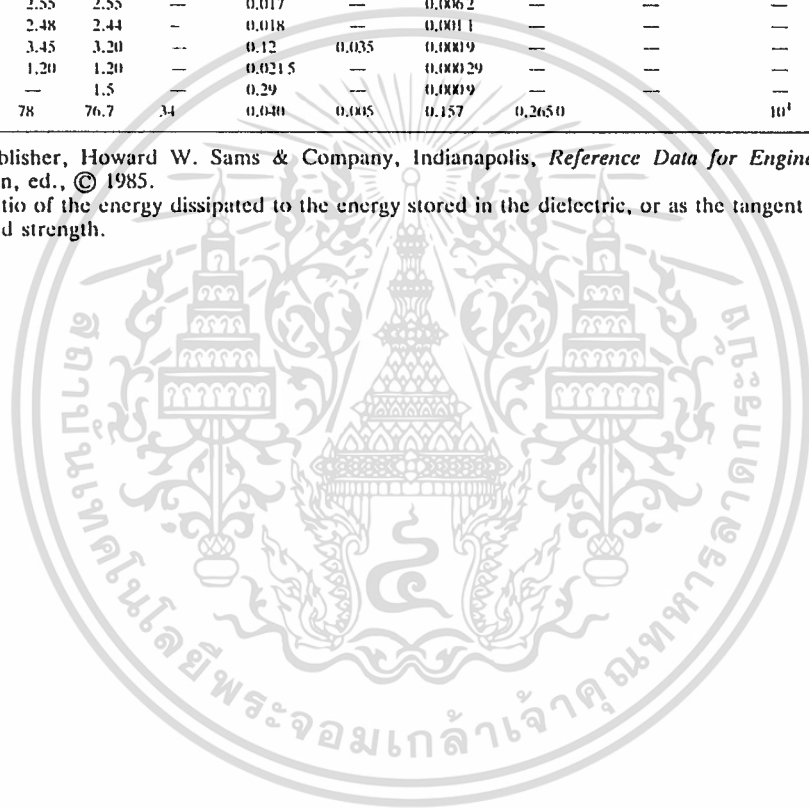
Polyethylene	25	2.26	2.26	2.26	2.26	<0.0002	0.0002	0.00031	0.0006	1200 (0.033°)	10 ¹⁷	19 × 10 ⁻⁵ (varies)	95-105 (distortion)	0.03
Polyethylene-terephthalate	—	2.98	—	—	—	0.016	—	—	—	4000 (0.002°)	—	—	—	—
Polyethylmethacrylate	22	2.55	2.52	2.51	2.5	0.0090	—	0.0075	0.0083	—	—	—	60 (distortion)	low
Polyhexamethylene-adipamide (nylon)	25	3.14	3.0	2.84	2.73	0.0218	0.0200	0.0117	0.0105	400 (0.125°)	8 × 10 ¹⁴	10.3 × 10 ⁻⁵	65 (distortion)	1.5
Polyimide	—	3.4	—	—	—	0.003	—	—	—	570	—	—	—	—
Polyisobutylene	25	2.23	2.23	2.23	—	0.0001	0.0003	0.00047	—	600 (0.010°)	—	—	25 (distortion)	low
Polymer of 95% vinyl-chloride, 5% vinyl-acetate	20	2.90	2.8	2.74	—	0.0150	0.0080	0.0059	—	—	—	—	—	—
Polymethyl methacrylate	27	2.76	—	2.60	—	0.0140	—	0.0057	—	990 (0.030°)	>5 × 10 ¹⁶	8-9 × 10 ⁻⁵	70-75 (distortion)	0.3-0.6
Polyphenylene oxide	—	2.55	—	2.55	—	0.0007	—	0.0011	—	500 (0.125°)	10 ¹⁷	5.3 × 10 ⁻⁵	195 (deflection)	—
Polypropylene	—	2.55	—	—	—	<0.0005	—	—	—	650 (0.125°)	6 × 10 ¹⁶	6-8.5 × 10 ⁻⁵	99-116 (deflection)	—
Polystyrene	25	2.56	2.55	2.55	2.54	0.00007	<0.0001	0.00033	0.0012	500-700 (0.125°)	10 ¹⁸	6-8 × 10 ⁻⁵	82 (distortion)	0.05
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	22	2.1	2.1	2.1	2.08	<0.0002	<0.0002	0.00015	0.0006	1000-2000 (0.005°-0.012°)	10 ¹⁷	9.0 × 10 ⁻⁵	66 (distortion) (stable to 300)	0.00
Polyvinylcyclohexane	24	2.25	2.25	2.25	—	<0.0002	<0.0002	0.00018	—	—	—	—	—	—
Polyvinyl formal	26	2.92	2.80	2.76	2.7	0.019	0.013	0.0113	0.0115	860 (0.034°)	>5 × 10 ¹⁶	7.7 × 10 ⁻⁵	190	1.3
Polyvinylidene fluoride	—	6.6	—	—	—	0.17	—	—	—	260 (0.125°)	2 × 10 ¹⁴	12 × 10 ⁻⁵	148 (deflection)	—
Urea-formaldehyde, cellulose	27	5.65	5.1	4.57	—	0.027	0.050	0.0555	—	375 (0.085°)	—	2.6 × 10 ⁻⁵	152 (distortion)	2
Urethane elastomer	—	6.5-7.1	—	—	—	—	—	—	—	450-500 (0.125°)	2 × 10 ¹¹	10-20 × 10 ⁻⁵	—	—
Vinylidene-vinyl chloride copolymer	23	3.18	2.82	2.71	—	0.057	0.0180	0.0072	—	300 (0.125°)	10 ¹⁴ -10 ¹⁶	15.8 × 10 ⁻⁵	150	<0.1
100% aniline-formaldehyde (Dilectane-100)	25	3.58	3.50	3.44	—	0.0061	0.0033	0.0026	—	810 (0.068°)	10 ¹⁶	5.4 × 10 ⁻⁵	125	0.06-0.08
100% phenol-formaldehyde	24	5.4	4.4	3.64	—	0.060	0.077	0.052	—	277 (0.125°)	—	8.3-13 × 10 ⁻⁵	50 (distortion)	0.42
100% polyvinyl-chloride	20	2.88	2.85	2.84	—	0.0160	0.0081	0.0055	—	400 (0.125°)	10 ¹⁴	6.9 × 10 ⁻⁵	54 (distortion)	0.05 0.15
Organic Liquids:														
Aviation gasoline (100 octane)	25	1.94	1.94	1.92	—	—	0.0001	0.0014	—	—	—	—	—	—
Benzene (pure, dried)	25	2.28	2.28	2.28	2.28	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	—	—	—	—	—
Carbon tetrachloride	25	2.17	2.17	2.17	—	<0.00004	<0.0002	0.0004	—	—	—	—	—	—
Ethyl alcohol (absolute)	25	24.5	23.7	6.5	—	0.090	0.062	0.250	—	—	—	—	—	—
Ethylene glycol	25	41	41	12	—	0.030	0.045	1.00	—	—	—	—	—	—
Jet fuel (JP-3)	25	2.08	2.08	2.04	—	0.0001	—	0.0055	—	—	—	—	—	—
Methyl alcohol (absolute analytical grade)	25	31	31.0	23.9	—	0.20	0.038	0.64	—	—	—	—	—	—
Methyl or ethyl siloxane polymer (1000 cs)	22	2.78	—	2.74	—	<0.0003	—	0.0096	—	—	—	—	—	—
Monomeric styrene	22	2.40	2.40	2.40	—	<0.0003	—	0.0020	—	300 (0.100°)	3 × 10 ¹²	—	—	0.06
Transil oil	26	2.22	2.20	2.18	—	<0.0005	0.0048	0.0028	—	300 (0.100°)	—	—	-40 (pour point)	—
Vaseline	25	2.16	2.16	2.16	—	<0.0001	<0.0004	0.00066	—	—	—	—	—	—

Soil, sandy dry	25	2.59	2.55	2.55	—	0.017	—	0.006 2	—	—	—	—	—
Soil, loamy dry	25	2.53	2.48	2.44	—	0.018	—	0.001 1	—	—	—	—	—
Ice (from pure distilled water)	-12	4.15	3.45	3.20	—	0.12	0.035	0.000 9	—	—	—	—	—
Freshly fallen snow	-20	1.20	1.20	1.20	—	0.021 5	—	0.000 29	—	—	—	—	—
Hard-packed snow followed by light rain	-6	1.55	—	1.5	—	0.29	—	0.000 9	—	—	—	—	—
Water (distilled)	25	78.2	78	76.7	34	0.040	0.005	0.157	0.265 0	10 ¹	—	—	—

*Reproduced with permission of the publisher, Howard W. Sams & Company, Indianapolis, *Reference Data for Engineers: Radio, Electronics, Computer, and Communications*, 7th ed., by E. C. Jordan, ed., © 1985.

[†]The dissipation factor is defined as the ratio of the energy dissipated to the energy stored in the dielectric, or as the tangent of the loss angle. Dielectric constant and dissipation factor depend on electrical field strength.

[‡]Field perpendicular to grain.





RT/duroid® 5880
Glass Microfiber Reinforced
Polytetrafluoroethylene Composite

RT/duroid® 5880 glass microfiber reinforced PTFE composite is designed for exacting stripline and microstrip circuit applications.

Glass reinforcing microfibers are randomly oriented to maximize benefits of fiber reinforcement in the directions most valuable to circuit producers and in the final circuit application.

The dielectric constant of RT/duroid 5880 laminates is uniform from panel to panel and is constant over a wide frequency range. Its low dissipation factor extends the usefulness of RT/duroid 5880 to Ku-band and above.

RT/duroid 5880 laminate is easily cut, sheared and machined to shape. It has excellent dimensional stability and is resistant to all solvents and reagents, hot or cold, normally used in etching printed circuits or in plating edges and holes.

Normally supplied as a laminate with electrodeposited copper of 1/4 to 2 ounces/ft.² on both sides, RT/duroid 5880 composites can also be clad with rolled copper foil for more critical electrical applications. Cladding with aluminum, copper or brass plate may also be specified.

When requested copper-clad, RT/duroid 5880 composite can be certified to MIL-S-13949 Type GRN c Type GPN microwave material specifications.

When ordering RT/duroid 5880 laminates, it is important to specify dielectric thickness, tolerance, rolled or electrodeposited copper foil, and weight of copper foil required.

(See reverse for product data)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTY	TEST METHOD	CONDITION	UNITS[1]	DIRECTION	TYPICAL VALUE[2]		
Dielectric constant, ϵ_r	1MHz, IPC-TM-650, 2.5.5.3	C 24/23/50	—	Z	2.20		
		10GHz, IPC-TM-650, 2.5.5.5	—	Z	2.20± 0.02 (± 0.01 available)		
Dissipation factor, tan δ	1MHz, IPC-TM-650-2.5.5.3	C 24/23/50	—	Z	0.0004		
		10GHz, IPC-TM-650, 2.5.5.5	—	Z	0.0009		
Volume resistivity	IPC-TM-650, 2.5.17.1	C96/35/90	Mohm cm	Z	2 x 10 ⁷		
Surface resistivity	IPC-TM-650, 2.5.17.1	C96/35/90	Mohm	X, Y	3 x 10 ⁸		
Tensile modulus	ASTM D638	A	MPa (kpsi)	Test at 23°C			
				X	1070 (156)	450 (65)	
				Y	860 (125)	380 (55)	
				ultimate stress			
				X	29 (4.2)	20 (2.9)	
				Y	27 (3.9)	18 (2.6)	
Compressive modulus	AST D695	A	MPa (kpsi)	Test at 100°C			
				X	710 (103)	500 (73)	
				Y	710 (103)	500 (75)	
				Z	940 (136)	670 (97)	
				ultimate stress			
				X	27 (3.9)	22 (3.2)	
Deformation under load	ASTM D621	24 hr/14MPa (2 kpsi)	%	Z	Test at 150°C		
					1.0		
					Water absorption		
					Thickness = 0.8mm (0.031 in.)		
					Thickness = 1.6mm (0.062 in.)		
					mg (%)		
0.9 (0.02)							
1.3 (0.015)							
Specific gravity	ASTM D792		—		2.2		
Heat distortion temperature	ASTM D648	1.82MPa (264 psi)	°C(°F)	X, Y	>260 (>500)		
Specific heat	Calculated		J/gK(BTU/lb°F)		0.96 (0.23)		
Thermal conductivity	Rogers TR2721		W/mK(BTU in/r ² hr°F)	Z	0.26 (1.8)		
Thermal expansion	ASTM D3386 (10 K/min.)	-100°C	mm/m	→	X	Y	Z
					-6.1	-8.7	-18.7
					-0.9	-1.8	-6.9
					-0.5	-0.9	-4.5
					1.1	1.5	8.7
					2.3	3.2	28.3
250	3.8	5.5	69.5				

[1] SI units given first with other frequently used units in parentheses.
 [2] References: Internal TR's 1430, 2224, 2854. Tests were at 23°C unless otherwise noted. Typical values should not be used for specification limits.

The above information is not intended to and does not create any warranties, express or implied, including any warranty of merchantability or fitness for a particular purpose. Use of RT/duroid microwave laminate in your particular application may yield different results.

These products may require a validated export license issued by the U.S. Department of Commerce for export of these materials from the United States or Canada.

RT / duroid is a registered trademark of Rogers Corporation for its microwave laminates.



Rogers Corporation
 Microwave and Circuit Materials Division, 100 S. Roosevelt Avenue, Chandler, AZ 85226, 602 961-1382, Fax: 602 961-4533

DIELECTRICS

PROPERTY	RT/duroid [®] 5880 (GR,GP)	RT/duroid [®] 5870 (GR,GP)	ULTRALAM [®] 2000 (GT,GX)	RT/duroid [®] 6002	RT/duroid [®] 6006	RT/duroid [®] 6010, 6010LM	TMM [®] Temperature Stable Microwave Laminates					
							3	4	6	10	10	
Dielectric constant and tolerance @10 GHz	2.20±0.02	2.33±0.02	2.4-2.6 ±0.04	2.94±0.04	6.15±0.15	10.2±0.25	3.27 ±0.016	4.50 ±0.045	6.00 ±0.080	9.20 ±0.230	9.80 ±0.245	
Loss tangent @10 GHz	0.0009	0.0012	0.0019	0.0012	0.0019	0.0023	⁽¹⁾ 0.0016	⁽¹⁾ 0.0017	⁽¹⁾ 0.0018	⁽¹⁾ 0.0017	⁽¹⁾ 0.0015	
Thermal coeff. of ϵ_r 0° to 100°C (ppm/K)	-129	-115	-100	+16	-450	-390	⁽¹⁾ +39	—	⁽¹⁾ -10	⁽¹⁾ -38	⁽¹⁾ -43	
Volume resistivity (Mohm-cm)	2x10 ⁷	2x10 ⁷	2x10 ⁷	10 ⁸	2x10 ⁷	5x10 ⁵	3x10 ⁸	6x10 ⁸	1x10 ⁹	2x10 ⁷	—	
Surface resistivity (Mohm)	3x10 ⁸	2x10 ⁸	4x10 ⁷	10 ⁷	7x10 ⁷	5x10 ⁶	>9x10 ⁹	1x10 ⁹	1x10 ⁹	4x10 ⁷	—	
Tensile modulus (kpsi)	X Axis	156	189	1700	120	74	135	⁽²⁾ 1916	⁽²⁾ 2000*	⁽²⁾ 2200*	⁽²⁾ 2400	—
	Y Axis	125	185	1300	120	91	81	⁽²⁾ 1916	⁽²⁾ 2000*	⁽²⁾ 2200*	⁽²⁾ 2400	—
Compressive modulus z axis (kpsi)	136	120	—	360*	155	311	742	752	736	575	—	
Moisture absorption D23/24 (%)	0.015	0.015	0.03	0.1	0.05	0.375 (LM 0.05)	⁽³⁾ 0.04	⁽³⁾ 0.010	⁽³⁾ 0.06	⁽³⁾ 0.09	⁽³⁾ 0.16	
Thermal Conductivity (W/m/K)	0.26	0.26	0.26	0.44	0.48	0.41	0.68	0.70	0.70*	0.73*	0.75*	
Coefficient of thermal expansion 0° to 100°C (ppm/K)	X Axis	31	22	15	16	47	24	16	14	16	16	16*
	Y Axis	48	28	15	16	34	24	16	14	16	16	16*
	Z Axis	237	173	200	24	117	24	20	20	20	20	20*
Specific Gravity	2.2	2.2	2.2	2.1	2.7	2.9	1.78	2.07	2.37	2.77	2.77	

1) Tested by ASTM D2520D, 3GHz waveguide perturbation
 2) Young's Modulus
 3) Testing conditions: 50°C, 48 hours, 0.50" (12.7mm) thick samples
 4) Values represent a linear approximation of CTE for the temperature ranges given, except for RT/duroid 6002 and TMM, which do have a linear behavior.
 5) Tested by IPC-TM-650 method 2.5.5.5.

*estimated

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 1

การวัดการสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาสามารถอธิบายค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่นได้
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ วัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่นในสายอากาศได้
3. เพื่อให้นักศึกษาสามารถวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ของคลื่นในสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมได้
4. เพื่อให้นักศึกษาสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่นได้

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | | |
|---|---|---------|
| 1. เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF Network Analyzers) | | |
| HEWLETT PACKARD รุ่น HP 8714C 300 kHz - 3000 MHz | 1 | เครื่อง |
| 2. สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี | 1 | ตัว |
| 3. สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (Connector Line) | 1 | เส้น |

ทฤษฎีเบื้องต้น

การสะท้อนกลับของคลื่น

การสะท้อนกลับของคลื่น หมายถึง การเปลี่ยนแปลงทิศทางการเดินทางของคลื่น โดยทันทีทันใด เมื่อคลื่นนั้นเดินทางตกกระทบที่ผิวตัวกลาง นั่นคือคลื่นเดินทางกระดอนออกจากผิวสะท้อนของตัวกลางในลักษณะเดียวกับแสงสะท้อนจากกระจกเงา

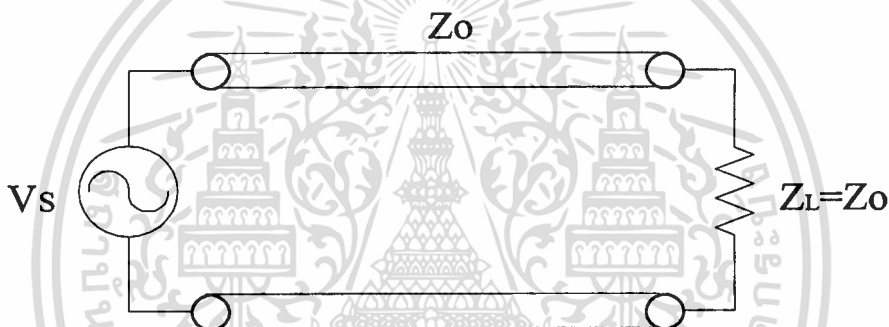
การสะท้อนกลับจากตัวภาวะความต้านทาน

การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาวะความต้านทาน (โหลด) ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าคาแรกเตอร์อิมพีแดนซ์ จะทำให้ไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณและกำลังงานสูญเสียเป็นความร้อนที่ตัวโหลด ส่วนการต่อปลายแบบปิด หรือแบบเปิด จะเกิดการสะท้อนกลับของกำลังงานทั้งหมด ส่วนแบบที่ใช้งานกันทั่วไปเป็นการต่อปลายสายด้วยโหลดตัวภาวะความต้านทานซึ่งไม่ใช่ค่าคาแรกเตอร์อิมพีแดนซ์ของสายนั้น ผลที่ได้กำลังงานจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน

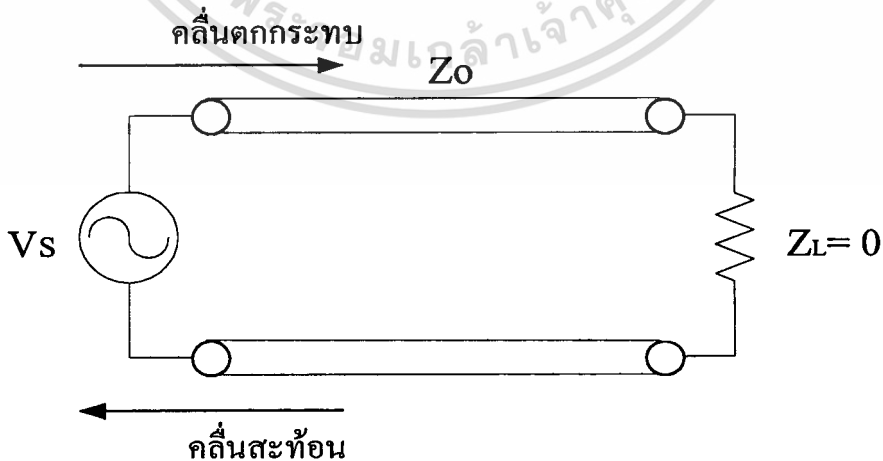
ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับไปตามสาย อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียที่โหลดเป็นความร้อน ในส่วนกำลังงานที่สะท้อนกลับจะมีปริมาณเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน (Voltage Reflection Coefficient)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \tag{1}$$

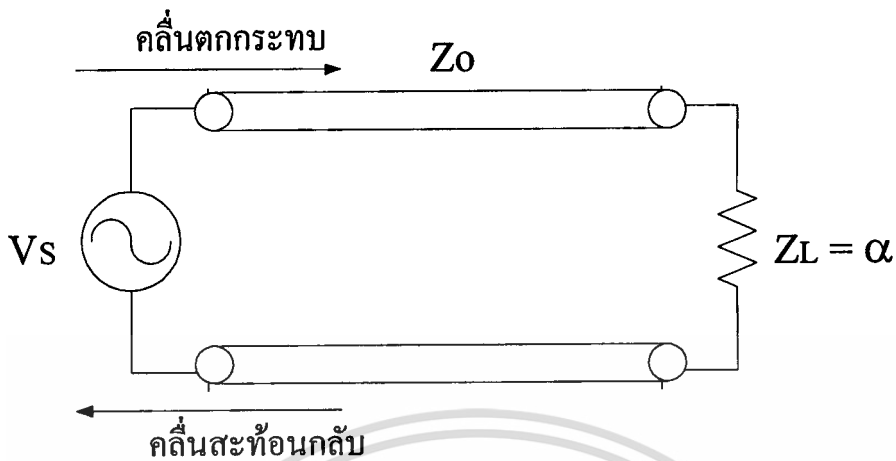
- เมื่อ Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน
 V_r = แรงดันสะท้อนกลับ, (โวลต์)
 V_i = แรงดันตกกระทบ, (โวลต์)



(ก) การต่อตัวภาระด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในกรณีฉุกเฉินเท่านั้น ไม่ควรนำออกจากรั้วมหาวิทยาลัยฯ (ข) การต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปลายปิด
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) การต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปลายเปิด

รูปที่ 1 การต่อตัวภาวะความต้านทาน

จากสมการที่ 1 ถ้าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันมีค่าเป็นบวก แสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกัน แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบแรงดันสะท้อนกลับจะกลับเฟสตรงกันข้าม การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของคลื่นแรงดันสะท้อนกลับได้เท่ากับ

$$\text{เปอร์เซ็นต์แรงดันสะท้อนกลับ} = \Gamma \times 100 \quad (2)$$

กำลังงานหาได้จากแรงดันยกกำลังสองหารด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ Z_0

$$P = \frac{V^2}{Z_0} \quad (3)$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลังงาน (Power Reflection Coefficient) จะมีค่าเท่ากับกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

$$\Gamma^2 = \frac{P_r}{P_i} \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\Gamma^2 =$ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลังงาน
 $P_r =$ กำลังงานสะท้อนกลับ, (วัตต์)
 $P_i =$ กำลังงานตกกระทบ, (วัตต์)

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ได้โดย

$$\text{เปอร์เซ็นต์กำลังงานสะท้อนกลับ} = \Gamma^2 \times 100 \quad (\%) \quad (5)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่างต่อผลรวมระหว่างค่าของตัวภาวะความต้านทานกับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสาย

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (6)$$

เมื่อ $\Gamma =$ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน
 $Z_L =$ ภาวะอิมพีแดนซ์, (โอห์ม)
 $Z_0 =$ อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณ, (โอห์ม)

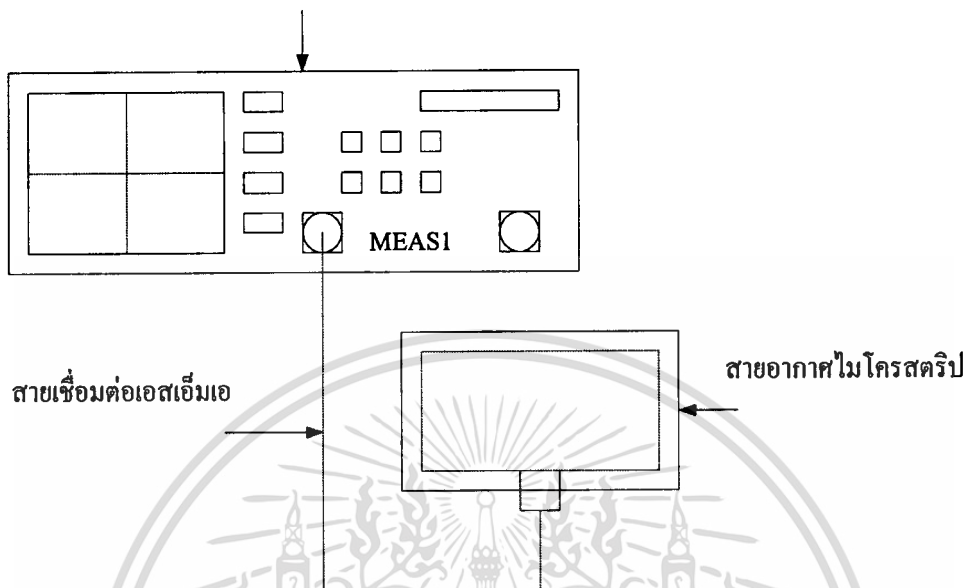
จากสูตร จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเป็นบวก เมื่อ Z_L มากกว่า Z_0 และเป็นลบเมื่อ Z_L น้อยกว่า Z_0

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูปที่ 2
2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas1)
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas1
4. เลือกการวัดสะท้อนกลับโดยเลือกที่ Reflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RF Network Analyzers



รูปที่ 2 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องมือวัด

5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Frequency เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
6. สังเกตรูปสัญญาณที่ได้จากจอภาพแสดงผล ทำการปรับมุมมองการแสดงผลจนารูปสัญญาณให้สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนขึ้น บันทึกรูปสัญญาณ
7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
8. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 7 ลงในตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

Start = GHz Stop = GHz

รูปที่ 3 สัญญาณสัมพันธ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)
1 กิกะเฮิรตซ์	
1.5 กิกะเฮิรตซ์	
2 กิกะเฮิรตซ์	
2.5 กิกะเฮิรตซ์	
3 กิกะเฮิรตซ์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

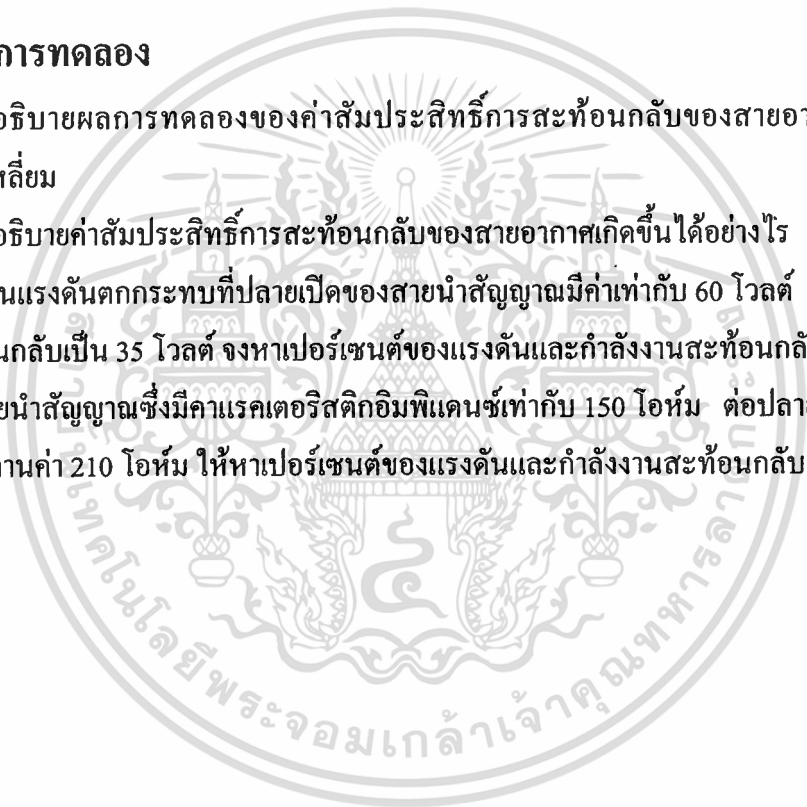
.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโคร สตรีปแบบสี่เหลี่ยม
2. จงอธิบายค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเกิดขึ้นได้อย่างไร
3. คลื่นแรงดันตกกระทบที่ปลายเปิดของสายนำสัญญาณมีค่าเท่ากับ 60 โวลต์ ส่วนคลื่นแรงดันสะท้อนกลับเป็น 35 โวลต์ จงหาเปอร์เซ็นต์ของแรงดันและกำลังงานสะท้อนกลับ
4. สายนำสัญญาณซึ่งมีคาแวลอร์สติคิมพีแดนซ์เท่ากับ 150 โอห์ม ต่อปลายสายไว้ด้วยตัวความต้านทานค่า 210 โอห์ม ให้หาเปอร์เซ็นต์ของแรงดันและกำลังงานสะท้อนกลับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 2

การวัดการสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาสามารถอธิบายค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่นได้
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ วัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่นในสายอากาศได้
3. เพื่อให้นักศึกษาสามารถ วัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่น ในสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมได้
4. เพื่อให้นักศึกษาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับคลื่นได้

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | | |
|---|---|---------|
| 1. เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF Network Analyzers) | | |
| HEWLETT PACKARD รุ่น HP 8714C 300 kHz – 3000 MHz | 1 | เครื่อง |
| 2. สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี | 1 | ตัว |
| 3. สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (Connector Line) | 1 | เส้น |

ทฤษฎีเบื้องต้น

การสะท้อนกลับของคลื่น

การสะท้อนกลับของคลื่น หมายถึง การเปลี่ยนแปลงทิศทางการเดินทางของคลื่นโดยทันทีทันใด เมื่อคลื่นนั้นเดินทางตกกระทบที่ผิวตัวกลาง นั่นคือคลื่นเดินทางกระดอนออกจากผิวสะท้อนของตัวกลางในลักษณะเดียวกับแสงสะท้อนจากกระจกเงา

การสะท้อนกลับจากตัวภาวะความต้านทาน

การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาวะความต้านทาน (โหลด) ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าคาเรคเตอริสติกอิมพีแดนซ์ จะทำให้ไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณและกำลังงาน

สูญเสียเป็นความร้อนที่ตัวโหลด ส่วนต่อปลายแบบปิด หรือแบบเปิด จะเกิดการสะท้อนกลับของกำลังงานทั้งหมด ส่วนแบบที่ใช้งานกันทั่วไปเป็นการต่อปลายสายด้วยโหลดตัวความต้านทานซึ่งไม่ใช้คาเรคเตอริสติกอิมพีแดนซ์ของสายนั้น ผลที่ได้กำลังงานจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน

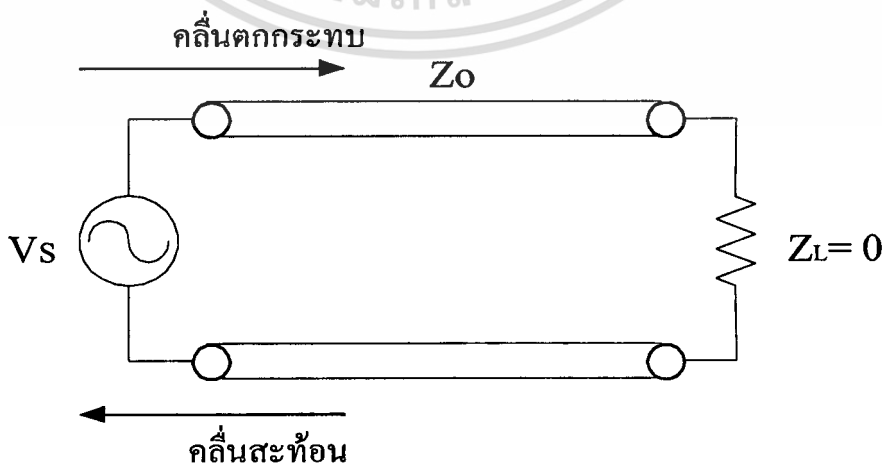
ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับมาตามสาย อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียที่โหลดเป็นความร้อน ในส่วนกำลังงานที่สะท้อนกลับจะมีปริมาณเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน (Voltage Reflection Coefficient)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \quad (7)$$

เมื่อ Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน
 V_r = แรงดันสะท้อนกลับ, (โวลต์)
 V_i = แรงดันตกกระทบ, (โวลต์)

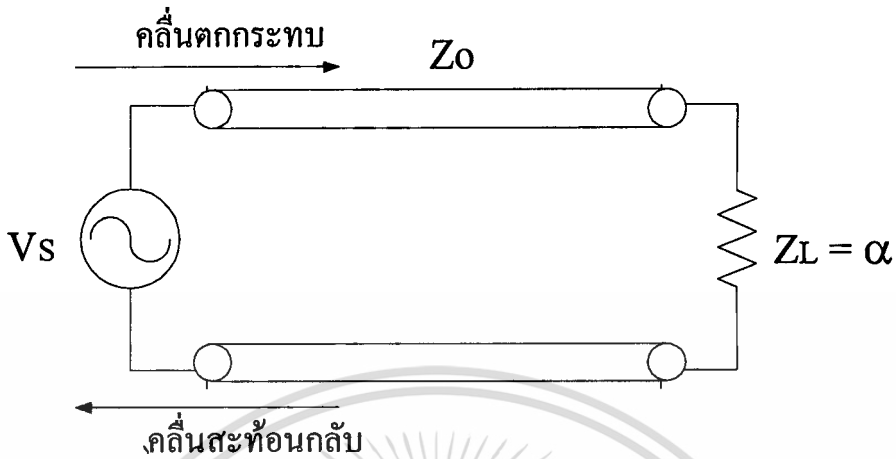


(ก) การต่อตัวภาระด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่สิ่งนี้ไปยังสื่อหรือช่องทางอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) การต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปลายปิด



(ค) การต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปลายเปิด

รูปที่ 4 การต่อตัวภาวะความต้านทาน

จากสมการที่ 7 ถ้าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันมีค่าเป็นบวก แสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกัน แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบแรงดันสะท้อนกลับจะกลับเฟสตรงกันข้าม

การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของคลื่นแรงดันสะท้อนกลับ ได้เท่ากับ

$$\text{เปอร์เซ็นต์แรงดันสะท้อนกลับ} = \Gamma \times 100 \quad (\%) \quad (8)$$

กำลังงานหาได้จากแรงดันยกกำลังสองหารด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ Z_o

$$P = \frac{V^2}{Z_o} \quad (9)$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลังงาน (Power Reflection Coefficient) จะมีค่าเท่ากับกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Gamma^2 = \frac{P_r}{P_i} \quad (10)$$

เมื่อ $\Gamma^2 =$ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลังงาน
 $P_r =$ กำลังงานสะท้อนกลับ, (วัตต์)
 $P_i =$ กำลังงานตกกระทบ, (วัตต์)

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ได้โดย

$$\text{เปอร์เซ็นต์กำลังงานสะท้อนกลับ} = \Gamma^2 \times 100 \quad (\%) \quad (11)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่างต่อผลรวมระหว่างค่าของตัวภาวะความต้านทานกับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสาย

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (12)$$

เมื่อ $\Gamma =$ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน
 $Z_L =$ ภาวะอิมพีแดนซ์, (โอห์ม)
 $Z_0 =$ อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณ, (โอห์ม)

จากสูตร จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเป็นบวก เมื่อ Z_L มากกว่า Z_0 และเป็นลบเมื่อ Z_L น้อยกว่า Z_0

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่ง ใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูปที่ 5

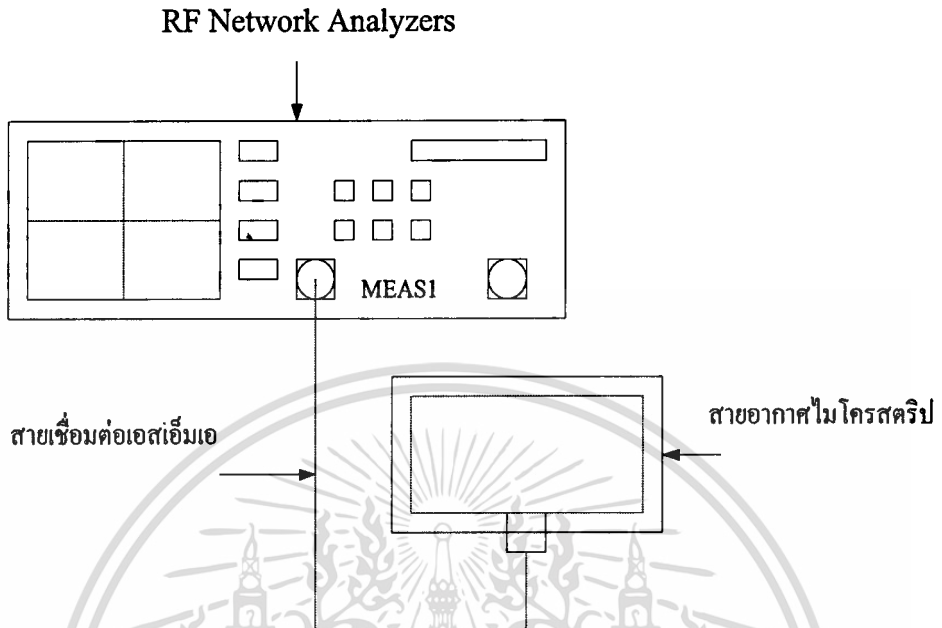
2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas1

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เลือกการวัดสะท้อนกลับโดยเลือกที่ Reflection



รูปที่ 5 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องมือวัด

5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Frequency เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์
6. สังเกตรูปสัญญาณที่ได้จากจอภาพแสดงผล ทำการปรับมุมมองการแสดงผลจนสามารถเห็นภาพได้ชัดเจนขึ้น บันทึกรูปสัญญาณ
7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ
8. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 7 ลงในตารางที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

Start = GHz

Stop = GHz

รูปที่ 6 สัญญาณสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)
1 กิกะเฮิรตซ์	
1.5 กิกะเฮิรตซ์	
2 กิกะเฮิรตซ์	
2.5 กิกะเฮิรตซ์	
3 กิกะเฮิรตซ์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายผลการทดลองของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม
2. ถ้าป้อนแรงดันอินพุตเท่ากับ 70 โวลต์ ให้กับสายนำสัญญาณซึ่งมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเป็น 0.15 จงหาค่าแรงดันการสะท้อนกลับ



ใบงานที่ 3

การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของ สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาสามารถอธิบายค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ วัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศได้
3. เพื่อให้นักศึกษาสามารถวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป แบบสี่เหลี่ยมได้
4. เพื่อให้นักศึกษาสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | | |
|---|---|---------|
| 1. เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF Network Analyzers)
HEWLETT PACKARD รุ่น HP 8714C 300 kHz – 3000 MHz | 1 | เครื่อง |
| 2. สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี่ | 1 | ตัว |
| 3. สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (Connector Line) | 1 | เส้น |

ทฤษฎีเบื้องต้น

การต่อสายนำสัญญาณด้วยตัวกระจายความต้านทานที่มีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ดังรูปที่ 7 (ก) จะเกิดจากการสะท้อนกลับขึ้น และมีคลื่นนิ่งเพิ่มขึ้นในสาย

คลื่นนิ่ง เกิดจากการรวมหรือบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับ โดยมีจุดโนคอยู่กึ่งกลางระหว่างจุดโนคทั้งหลาย ลูกคลื่นจะเปลี่ยนขึ้นไปถึงจุดสูงสุด และลดลงจนถึงจุดต่ำสุด ดังรูปที่ 7 (ข)

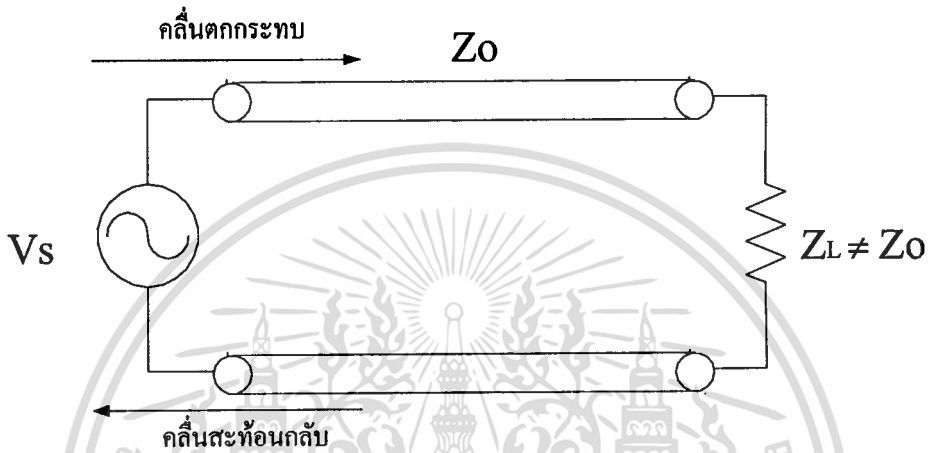
ค่าแรงดันสูงสุด V_{\max} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดเพื่อนำมาใช้เป็นเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข (13)

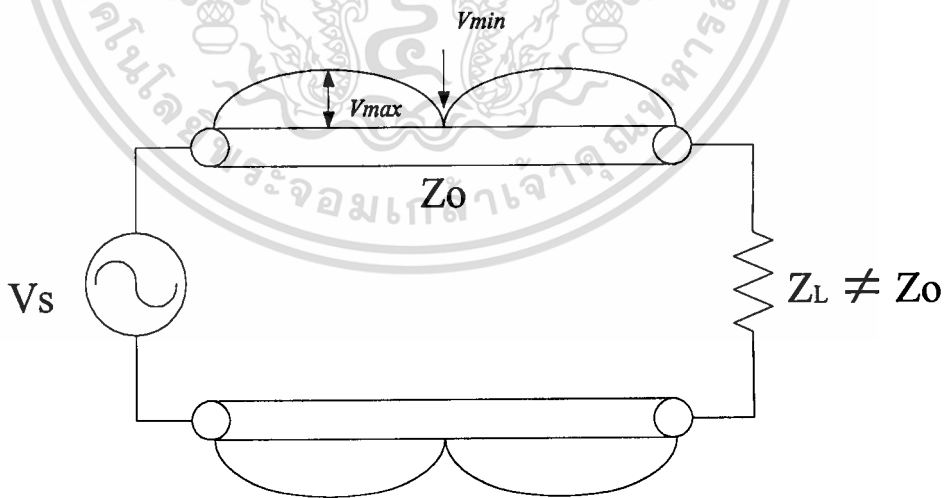
$$V_{\max} = V_i + V_r \quad (\text{โวลต์})$$

ค่าแรงดันต่ำสุด V_{\min} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงข้ามกัน

$$V_{\min} = V_i - V_r \quad (\text{โวลต์}) \quad (14)$$



(ก) การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาระที่ไม่เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ



(ข) จุดแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นนิ่ง

อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุด เรียกว่า อัตราส่วนของคลื่นนิ่งแรงดัน
(Voltage Standing Wave Ratio : VSWR)

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (15)$$

เมื่อ V_{\max} = ค่าแรงดันสูงสุด, (โวลต์)

V_{\min} = ค่าแรงดันต่ำสุด, (โวลต์)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันแสดงในหน่วย เดซิเบล (dB) จะมีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง
(Standing Wave Ratio : SWR)

$$SWR = 20 \log VSWR \quad (\text{dB}) \quad (16)$$

สามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันกับสัมประสิทธิ์การสะท้อน
กลับได้ดังนี้

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (17)$$

จะได้ค่า Γ เป็นดังนี้

$$\Gamma = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (\text{dB}) \quad (18)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน กับ Z_L กับ Z_0 สามารถหาได้โดย

เมื่อ $Z_L > Z_0$

$$VSWR = \frac{Z_L}{Z_0} \quad (19)$$

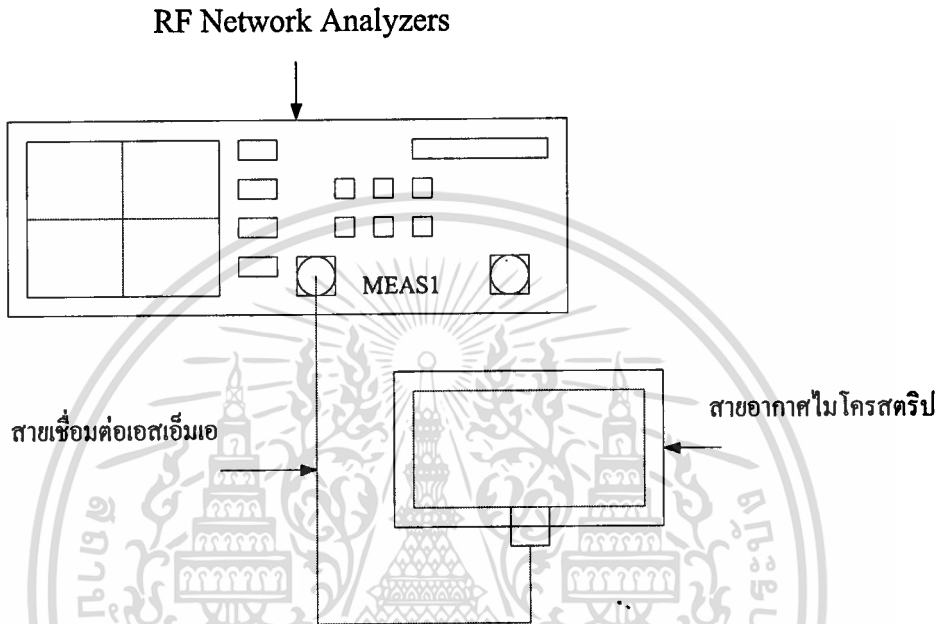
เมื่อ $Z_L < Z_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ Z_L ลงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$VSWR = \frac{Z_0}{Z_L} \quad (20)$$

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัด ที่หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูปที่ 8



2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas1)
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas1
4. เลือกการวัดสะท้อนกลับ โดยเลือกที่ Reflection
5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Frequency เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่ เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้าย ที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
6. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) โดยกดปุ่ม Format จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัด ที่ SWR สังเกตรูปสัญญาณแล้วบันทึกผลการทดลอง
7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้ง ความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์ ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

8. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 7 ลงในตารางที่ 3

ผลการทดลอง

Start = GHz

Stop = GHz

รูปที่ 9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 3 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ (เท่า)
1 กิกะเฮิรตซ์	
1.5 กิกะเฮิรตซ์	
2 กิกะเฮิรตซ์	
2.5 กิกะเฮิรตซ์	
3 กิกะเฮิรตซ์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

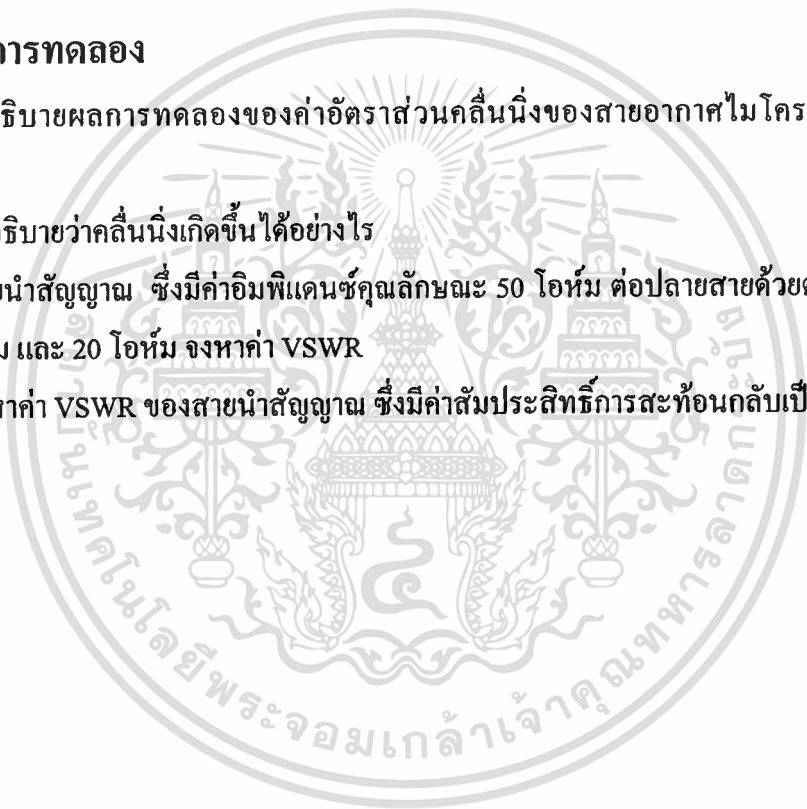
.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายผลการทดลองของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม
2. จงอธิบายว่าคลื่นนิ่งเกิดขึ้นได้อย่างไร
3. สายนำสัญญาณ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 50 โอห์ม ต่อปลายสายด้วยตัวความต้านทาน 150 โอห์ม และ 20 โอห์ม จงหาค่า VSWR
4. จงหาค่า VSWR ของสายนำสัญญาณ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเป็น 0.477



ใบงานที่ 4

การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของ สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาสามารถอธิบายค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศได้
3. เพื่อให้นักศึกษาสามารถวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ของสายอากาศไมโครสตริป แบบวงกลมได้
4. เพื่อให้นักศึกษาสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | | |
|---|---|---------|
| 1. เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF Network Analyzers) | | |
| HEWLETT PACKARD รุ่น HP 8714C 300 kHz – 3000 MHz | 1 | เครื่อง |
| 2. สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี | 1 | ตัว |
| 3. สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (Connector Line) | 1 | เส้น |

ทฤษฎีเบื้องต้น

การต่อสายนำสัญญาณด้วยตัวภาหะความต้านทาน ที่มีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ดังรูปที่ 10 (ก) จะเกิดจากการสะท้อนกลับขึ้น และมีคลื่นนิ่งเพิ่มขึ้นในสาย

คลื่นนิ่ง เกิดจากการรวมหรือบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับ โดยมีจุดโนดอยู่กับที่ระหว่างจุดโนดทั้งหลาย ลูกคลื่นจะเปลี่ยนขึ้นไปถึงจุดสูงสุด และลดลงจนถึงจุดต่ำสุด ดังรูปที่ 10 (ข)

ค่าแรงดันสูงสุด V_{max} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกัน

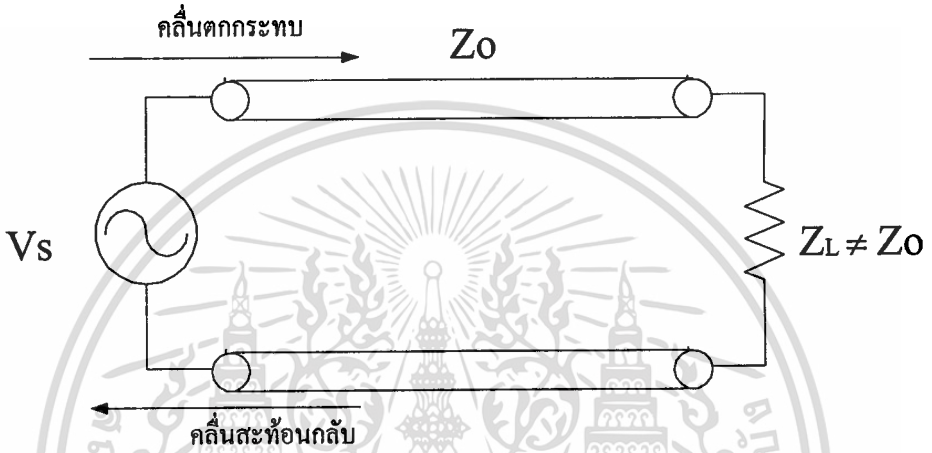
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการอ้างอิงใช้

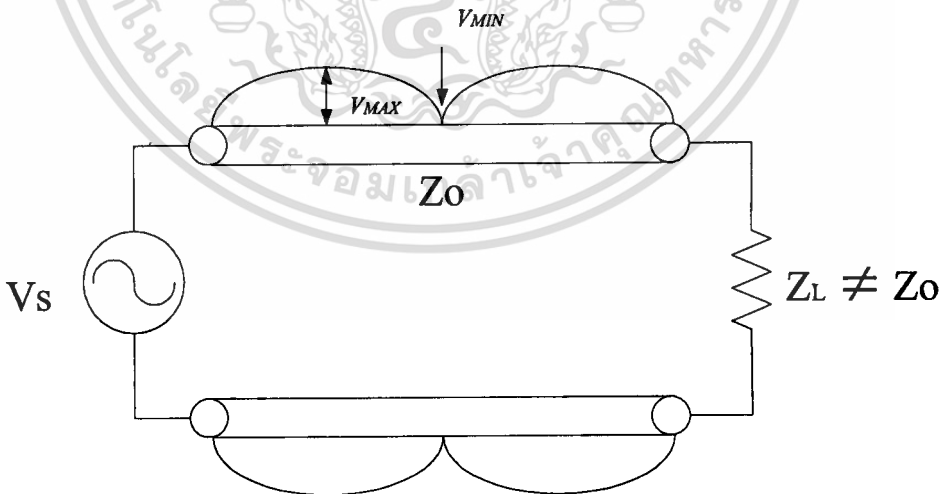
$$V_{max} = V_i + V_r \quad (\text{โวลต์}) \quad (21)$$

ค่าแรงดันต่ำสุด V_{\min} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงข้ามกัน

$$V_{\min} = V_i - V_r \quad (\text{โวลต์}) \quad (22)$$



(ก) การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาระที่ไม่เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ



(ข) แสดงจุดแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

รูปที่ 10 การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาระที่ไม่เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุด เรียกว่า อัตราส่วนของคลื่นนิ่งแรงดัน
(Voltage Standing Wave Ratio : VSWR)

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (23)$$

เมื่อ V_{\max} = ค่าแรงดันสูงสุด, (โวลต์)
 V_{\min} = ค่าแรงดันต่ำสุด, (โวลต์)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันแสดงในหน่วย เดซิเบล (dB) จะมีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง
(Standing Wave Ratio : SWR)

$$SWR = 20 \log VSWR \quad (\text{dB}) \quad (24)$$

สามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันกับสัมประสิทธิ์การสะท้อน
กลับ ได้ดังนี้

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (25)$$

จะได้ค่า Γ เป็นดังนี้

$$\Gamma = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (\text{dB}) \quad (26)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน กับ Z_L กับ Z_0 สามารถหาได้โดย

เมื่อ $Z_L > Z_0$

$$VSWR = \frac{Z_L}{Z_0} \quad (27)$$

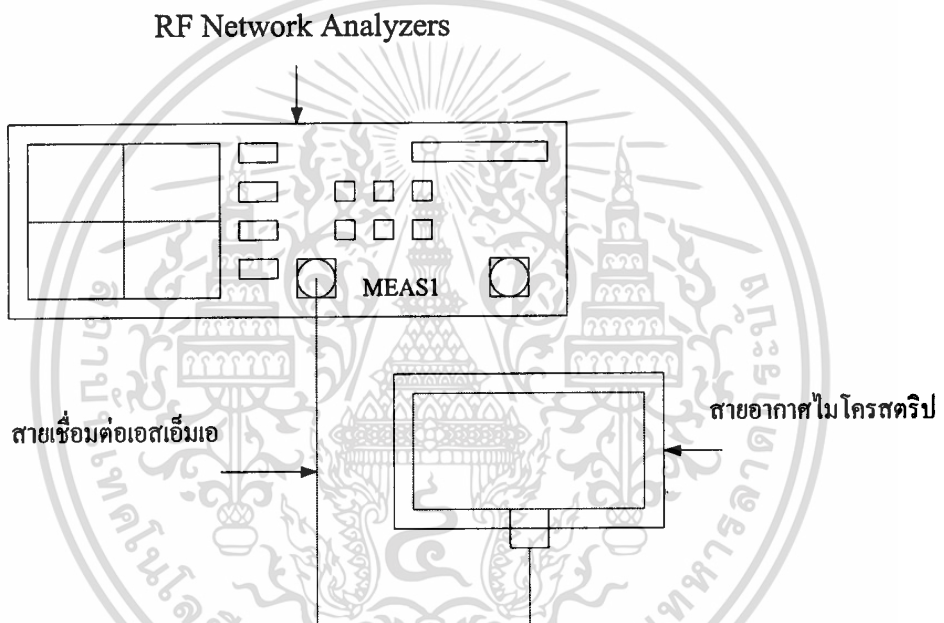
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $Z_L < Z_0$

$$VSWR = \frac{Z_0}{Z_L} \quad (28)$$

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่ง ใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องมือวัด

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas 1)

3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas 1

4. เลือกการวัดสะท้อนกลับโดยเลือกที่ Reflection

5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Frequency เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์

6. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) โดยกดปุ่ม Format จากนั้นกดปุ่มเลือก การวัดที่ SWR สังเกตรูปสัญลักษณ์แล้วบันทึกผลการทดลอง

7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

8. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 7 ลงในตารางที่ 4

ผลการทดลอง

Start = GHz

Stop = GHz

รูปที่ 12 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

ตารางที่ 4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ (เท่า)
1 กิกะเฮิรตซ์	
1.5 กิกะเฮิรตซ์	
2 กิกะเฮิรตซ์	
2.5 กิกะเฮิรตซ์	
3 กิกะเฮิรตซ์	

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

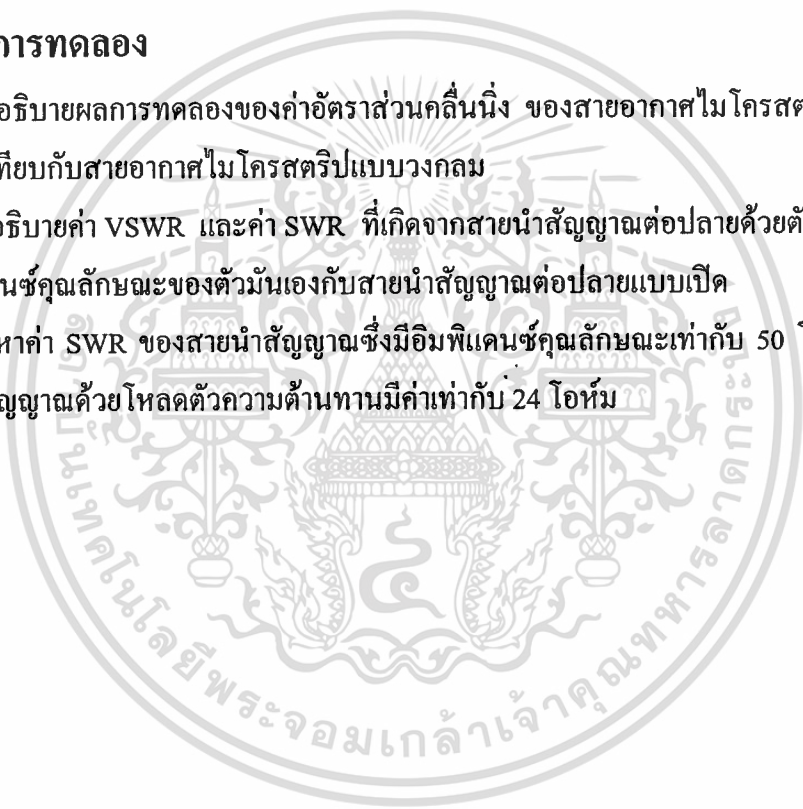
.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายผลการทดลองของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ของสายอากาศไมโครสตริปแบบ สี่เหลี่ยมเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม
2. จงอธิบายค่า VSWR และค่า SWR ที่เกิดจากสายนำสัญญาณต่อปลายด้วยตัวภาระที่มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของตัวเองกับสายนำสัญญาณต่อปลายแบบเปิด
3. จงหาค่า SWR ของสายนำสัญญาณซึ่งมีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม โดยต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยโหลดตัวความต้านทานมีค่าเท่ากับ 24 โอห์ม



ใบงานที่ 5

การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาสามารถอธิบายค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ วัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้
3. เพื่อให้นักศึกษาสามารถ วัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมได้
4. เพื่อให้นักศึกษาสามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | | |
|---|---|---------|
| 1. เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF Network Analyzers) | | |
| HEWLETT PACKARD รุ่น HP 8714C 300 kHz – 3000 MHz | 1 | เครื่อง |
| 2. สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี | 1 | ตัว |
| 3. สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (Connector Line) | 1 | เส้น |

ทฤษฎีเบื้องต้น

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

การหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งใดๆ บนสายนำสัญญาณหาได้โดยใช้ค่าแรงดันรวมทั้งจุดนั้นหารด้วยค่ากระแสรวมทั้งจุดเดียวกันนั้น

$$Z = \frac{V}{I} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (29)$$

คลื่นไฟฟ้าเดินทางไปตามสายนำสัญญาณด้วยความเร็วที่ติดต่อกับหน่วยความยาวเท่านั้น ณ ช่วงเวลาขณะนั้น ดังนั้น อิมพีแดนซ์ที่ใช้จึงเป็นอิมพีแดนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณนั้น และมีค่าตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (30)$$

ค่าของอัตราส่วนจากสูตรข้างต้นที่กล่าวมา มีความหมายอย่างยิ่งต่อสายนำสัญญาณไม่ว่าจะมีความยาวเพียงใดก็ตาม ที่เวลาหนึ่งๆ คลื่นที่ผ่านจะมีผลต่อความยาวหนึ่งหน่วยเท่านั้นและแต่ละหนึ่งหน่วยความยาว จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานได้จากสูตรข้างต้นเสมอ โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้ ณ ตำแหน่งใดบนสายนำสัญญาณ มีชื่อเรียกว่า ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ สัญลักษณ์ คือ Z_0 ดังนั้น ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบแท่งตัวนำคู่ขนาน จะแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (31)$$

การต่อสายนำสัญญาณด้วยตัวกระที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะทำให้เกิดการสมมูลย์ทางอิมพีแดนซ์ จึงไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณ และกำลังงานสูญเสียเป็นความร้อนที่ตัวกระความต้านทาน ส่วนการต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปิด หรือแบบเปิด จะเกิดการสะท้อนกลับของกำลังงานทั้งหมด

อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม โดยทั่วไปแล้วอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์หลายอย่าง ได้แก่ ความถี่ที่ใช้งาน, รูปร่าง, วิธีการป้อนกระแส และวัสดุที่อยู่ข้างเคียง เนื่องจากรูปร่างที่ซับซ้อนจึงพบว่ามีสายอากาศไม่มากที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการคำนวณ ส่วนใหญ่ต้องวิเคราะห์จากการทดลอง อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่จุดใดๆ ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดนั้นๆ หรือที่อิมพีแดนซ์ที่คู่ขั้วหนึ่งๆ จะเป็นอัตราส่วนของศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วนั้นๆ เราสามารถคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ที่ถูกป้อนสัญญาณด้วยสายโคแอกเชียล คือ

$$Z_{in} = R_a + jX_a \quad (32)$$

เมื่อ Z_{in} = คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ, (โอห์ม)

R_a = คือ ความต้านทานของสายอากาศ, (โอห์ม)

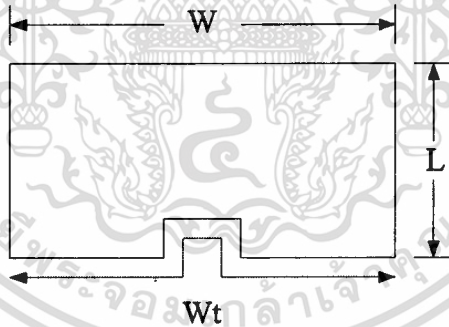
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ X_a = คือ รีแอกแตนซ์ของสายอากาศ, (โอห์ม) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปสามารถกำหนดได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองโพรง ซึ่งหาได้จากสมการที่ 32 โดยส่วนใหญ่แล้วความต้านทานของสายอากาศคือความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งหมายถึงความต้านทานของปริมาณกำลังที่แผ่พลังงานจากสายอากาศโดยทั่วๆ ไปซึ่งเป็นค่าของความต้านทานโดยสมมุติ โดยเป็นตัวที่บอกให้ทราบถึงการเกิดการสูญเสียปริมาณกำลังที่ส่งเข้าไปเท่ากับกำลังที่แผ่พลังงานออก เมื่อมีกระแสไหลในความต้านทานเท่ากับกระแสสูงสุดที่ไหลในสายอากาศ ดังนั้น ค่าความต้านทานการแผ่พลังงานที่สูง จึงเป็นคุณสมบัติที่ต้องการของสายอากาศ สำหรับสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม โดยการลัดวงจร (Short) นั้น สามารถที่จะหาความต้านทานของสายอากาศได้ดังนี้คือ

$$R_a = \frac{22.5}{\pi^2} \left(\frac{1}{(wt/\lambda_d)^2 (1/4 - h/\lambda_o)^2} \right) \quad (33)$$

โดยที่จะเห็นได้ว่า wt ในสมการที่ 33 นั้นคือความกว้างโดยรวมของสายอากาศทางด้านที่มีการป้อนสัญญาณดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ความกว้างโดยรวมของสายอากาศด้านที่มีการป้อนสัญญาณ

เมื่อ

$$\lambda_d = \frac{c_o}{f_r \sqrt{\epsilon_{ef} w}} \quad (34)$$

$$\lambda_o = \frac{1}{f_r \sqrt{\mu_o \epsilon_o}} \quad (35)$$

ค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศสามารถหาได้ดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Xa = -\frac{1}{R_c} \cot\left(\frac{\pi h}{2 \lambda_d}\right) \tag{36}$$

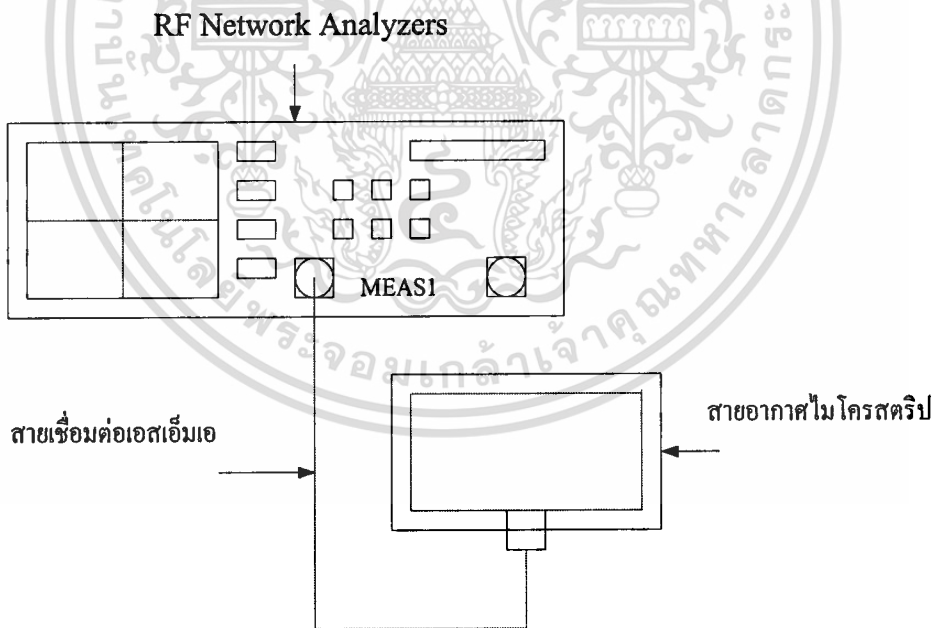
โดยที่ $R_c = R_o (\epsilon_{ef}(w))^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{h}{w}\right)$ (37)

$$R_o = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} \tag{38}$$

เมื่อ R_o = ความต้านทานเมื่อตัวกลางเป็นสูญญากาศ, (โอห์ม)
 R_c = ความต้านทานคุณลักษณะ, (โอห์ม)

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่ง ใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องมือวัด

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas1)

3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas1

4. เลือกการวัดสะท้อนกลับ โดยเลือกที่ Reflection

5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Frequency เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์

6. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม Format เลือกการวัดที่ Smitchart

7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

8. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 7 ลงในตารางที่ 5

ผลการทดลอง

Start = GHz

Stop = GHz

รูปที่ 15 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	
1.5 กิกะเฮิรตซ์	
2 กิกะเฮิรตซ์	
2.5 กิกะเฮิรตซ์	
3 กิกะเฮิรตซ์	

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

- จงอธิบายผลการทดลองของค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม
- อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ คืออะไร
- สายนำสัญญาณที่ใช้ในย่านความถี่คลื่นวิทยุมีค่าอินดักแตนซ์เท่ากับ 198.58 nH/m และค่าคาปาซิแตนซ์เท่ากับ 71.43 pF/m จงคำนวณค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 6

การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาสามารถอธิบายค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้
3. เพื่อให้นักศึกษาสามารถ วัดหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมได้
4. เพื่อให้นักศึกษาสามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | | |
|---|---|---------|
| 1. เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF Network Analyzers) | | |
| HEWLETT PACKARD รุ่น HP 8714C 300 kHz – 3000 MHz | 1 | เครื่อง |
| 2. สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี | 1 | ตัว |
| 3. สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (Connector Line) | 1 | เส้น |

ทฤษฎีเบื้องต้น

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

การหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งใดๆ บนสายนำสัญญาณหาได้โดยใช้ค่าแรงดันรวมทั้งจุดนั้นหารด้วยค่ากระแสรวมทั้งจุดเดียวกันนั้น

$$Z = \frac{V}{I} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (39)$$

คลื่นไฟฟ้าเดินทางไปตามสายนำสัญญาณด้วยความเร็วที่คิดต่อหน่วยความยาวเท่านั้น ณ ช่วงเวลานั้น ดังนั้น อิมพีแดนซ์ที่ใช้จึงเป็นอิมพีแดนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณนั้น และมีค่าตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (40)$$

ค่าของอัตราส่วนจากสูตรข้างต้นที่กล่าวมา มีความหมายอย่างยิ่งต่อสายนำสัญญาณไม่ว่าจะมีความยาวเพียงใดก็ตาม ที่เวลาหนึ่งๆ คลื่นที่ผ่านจะมีผลต่อความยาวหนึ่งหน่วยเท่านั้น และแต่ละหนึ่งหน่วยความยาว สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานได้จากสูตรข้างต้นเสมอ โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้ ณ ตำแหน่งใดบนสายนำสัญญาณ มีชื่อเรียกว่า ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสัญลักษณ์ คือ Z_0 ดังนั้น ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบแท่งตัวนำคู่ขนาน จะแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (41)$$

การต่อสายนำสัญญาณด้วยตัวภาวะที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ทำให้เกิดการสมมูลย์ทางอิมพีแดนซ์ จึงไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณ และกำลังงานสูญเสียเป็นความร้อนที่ตัวภาวะความต้านทาน ส่วนการต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปิด หรือแบบเปิด จะเกิดการสะท้อนกลับของกำลังงานทั้งหมด

อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันและกระแสตรงจุดที่ป้อนสัญญาณของสายอากาศ ถ้ากระแสและแรงดันมีเฟสตรงกันจะทำให้อินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าความต้านทาน แต่ถ้ามีเฟสต่างกันค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จะมีค่ารีแอกแตนซ์เพิ่มขึ้นมาจากค่าความต้านทานด้วย

เนื่องจากการคำนวณหาอิมพีแดนซ์โดยตรงจะมีตัวแปรที่ยุ่งยาก เช่น เบสเซลฟังก์ชัน ดังนั้น จะใช้ค่าประมาณจากแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสแทน

อินพุตอิมพีแดนซ์ของการป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป

อินพุตอิมพีแดนซ์ของการป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปนั้น ความกว้างของสายอากาศไมโครสตริป จะเป็นตัวกำหนดค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยสมการในการคำนวณหาเป็นดังนี้

$$R = \frac{J_n(k_a)h}{J'_n(k_a)\sin(w)} \quad (42)$$

เอกสารนี้เป็นเมื่อสารที่สงวนไว้สำหรับคณาจารย์และบุคลากรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (โหฬาร) ระเบียบด้านการค้าไม่อาจกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง $J'_n(k_a)$ = อนุพันธ์อันดับ 1 ของเบสเซลฟังก์ชันอันดับ n ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- λ_o = ความยาวคลื่นในอากาศ, (เมตร)
 λ_d = ความยาวคลื่นที่เดินทางเข้ามายังไมโครสตริป, (เมตร)
 w = ความกว้างของสายอากาศไมโครสตริป, (เมตร)
 h = ความหนาของสารตัวกลาง, (เมตร)

อินพุตอิมพีแดนซ์ของการป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียล

อินพุตอิมพีแดนซ์ของการป้อนสัญญาณแบบนี้ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ต้องการจะขึ้นอยู่กับจุดที่ป้อนสัญญาณ โดยสมการในการคำนวณหาเป็นดังนี้

$$R = \frac{E_o h^2 J_n (k_o \rho_o)^2}{2P_T} \quad (43)$$

- เมื่อ
- P_T = กำลังการสูญเสียรวม, (วัตต์)
 - ρ_o = จุดป้อนสัญญาณ, (เมตร)
 - k_o = เวฟนัมเบอร์ในอากาศ, (เรเดียน/เมตร)
 - h = ความหนาของสารตัวกลาง, (เมตร)
 - E_o = ค่าคงที่ของสนามไฟฟ้า, (โวลต์/เมตร)

สำหรับ P_T ประกอบไปด้วย กำลังการแพร่กระจายคลื่น กำลังการสูญเสียจากแผ่นตัวนำ และกำลังการสูญเสียจากวัสดุที่ไม่เป็นสื่อทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถเขียนสมการของกำลังสูญเสียรวมได้ดังนี้

$$P_T = P_r + P_c + P_d \quad (44)$$

- เมื่อ
- P_r = กำลังการแพร่กระจายคลื่น, (วัตต์)
 - P_c = กำลังการสูญเสียของแผ่นตัวนำ, (วัตต์)
 - P_d = กำลังการสูญเสียของวัสดุ, (วัตต์)

กำลังการแพร่กระจายคลื่นสามารถคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_r = \frac{(hE_0 J_n(k_a) a k_0)^2}{1920} I_1 \quad (45)$$

- เมื่อ P_r = กำลังการแพร่กระจายคลื่น, (วัตต์)
 k_0 = เวฟนัมเบอร์ของอากาศ, (เรเดียน/เมตร)
 h = ความหนาของสารตัวกลาง, (เมตร)
 E_0 = ค่าคงที่ของสนามไฟฟ้า, (โวลต์/เมตร)
 a = รัศมีของสายอากาศแบบวงกลม, (เมตร)
 $J_n(k_a)$ = อนุพันธ์อันดับ 1 ของเบสเซลฟังก์ชันอันดับ n

โดยที่

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\{J_{n+1}(k_0 a \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a \sin \theta)\}^2 + \cos^2 \theta \{J_{n+1}(k_0 a \sin \theta) + J_{n-1}(k_0 a \sin \theta)\}^2 \right] \sin \theta d\theta \quad (46)$$

สำหรับกำลังการสูญเสียของแผ่นตัวนำนั้นจะเกิดจากแผ่นตัวนำแบบวงกลมกับแผ่นกราวด์
 ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$P_c = 1.68 \times 10^{-7} f^{\frac{3}{2}} \quad (47)$$

- เมื่อ P_c = กำลังการสูญเสียของแผ่นตัวนำ, (วัตต์)
 f = ความถี่, (กิกะเฮิรตซ์)

สำหรับกำลังสูญเสียของวัสดุที่ไม่เป็นสื่อทางไฟฟ้า มีสมการดังนี้

$$P_d = 0.805 \times 10^{-4} \frac{h \tan \delta}{f} \quad (48)$$

- เมื่อ P_d = กำลังการสูญเสียของวัสดุ, (วัตต์)
 h = ความหนาของสารตัวกลาง, (เมตร)
 $\tan \delta$ = เป็นค่า Loss Tangent ของสารตัวกลาง
 f = ความถี่, (กิกะเฮิรตซ์)

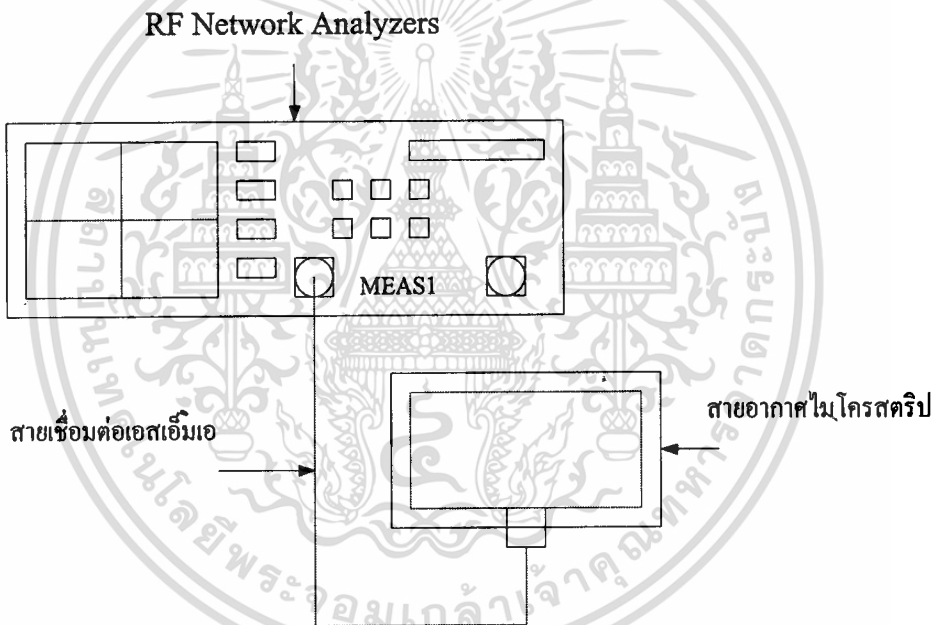
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Loss Tangent ของสารตัวกลาง ซึ่งค่านี้จะแสดงให้เห็นว่าสารตัวกลางนั้นมีการ สูญเสีย เนื่องจากการนำกระแสมาน้อยเพียงใดโดยที่ยิ่งต่ำก็ยิ่งดี

นำสมการที่ 44,45,46,47 และ 48 แทนลงในสมการ 43 ก็จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของการป้อน สัญญาณแบบโคแอกเซียล

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่ หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องมือวัด

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas1)

3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas1

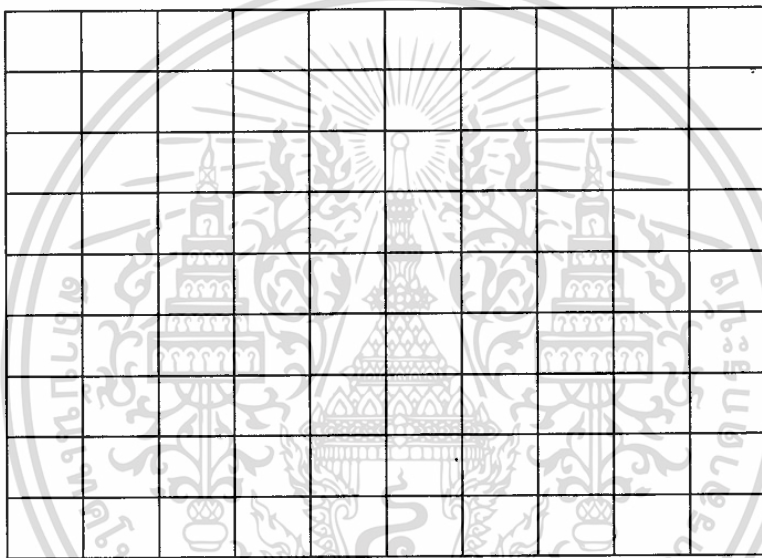
4. เลือกการวัดสะท้อนกลับโดยเลือกที่ Reflection

5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Frequency เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่ม

ต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 ไมกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม Format เลือกการวัดที่ Smitchart
7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
8. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 7 ลงในตารางที่ 6

ผลการทดลอง



รูปที่ 17 แผนภาพสมิทชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

ตารางที่ 6 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	
1.5 กิกะเฮิรตซ์	
2 กิกะเฮิรตซ์	
2.5 กิกะเฮิรตซ์	
3 กิกะเฮิรตซ์	

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

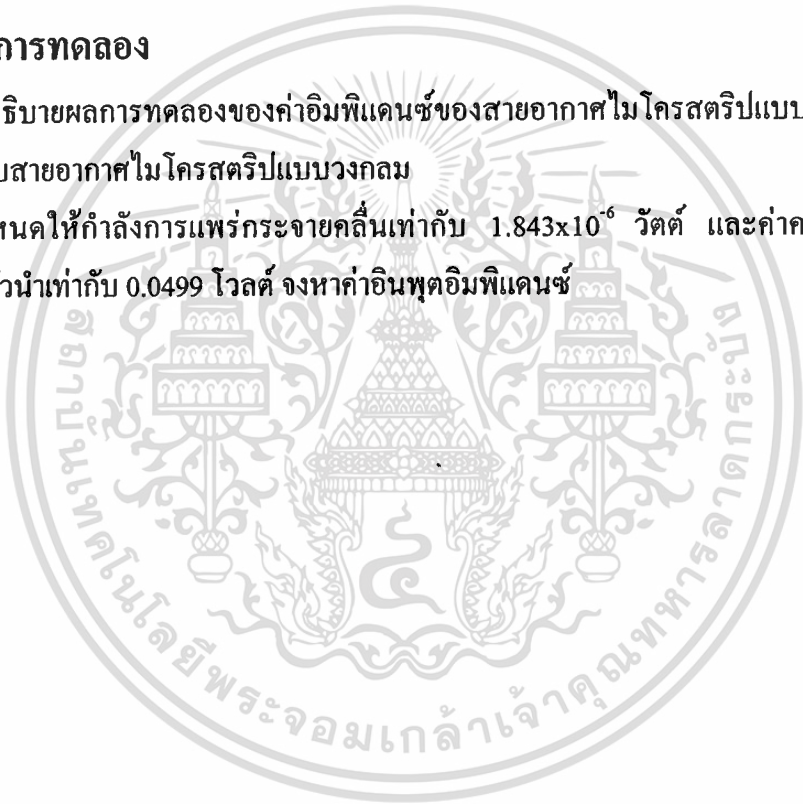
.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

- 1.จงอธิบายผลการทดลองของค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม
- 2.กำหนดให้กำลังการแพร่กระจายคลื่นเท่ากับ 1.843×10^{-6} วัตต์ และค่าความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำเท่ากับ 0.0499 โวลต์ จงหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 7

การทดสอบวางวัสดุต่างๆ บนสายอากาศไมโครสตริป แบบสี่เหลี่ยม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาสามารถอธิบายผลจากการทดสอบการวางวัสดุต่างๆ บนสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมได้
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ วัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมได้

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | | |
|---|---|---------|
| 1. เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF Network Analyzers)
HEWLETT PACKARD รุ่น HP 8714C 300 kHz - 3000 MHz | 1 | เครื่อง |
| 2. สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี | 1 | ตัว |
| 3. สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (Connector Line) | 1 | เส้น |
| 4. แท่นสำหรับปรับเลื่อนวัสดุทดสอบ | 1 | อัน |
| 5. แผ่นกระดาษ (ขนาด 20x12x0.2 ซม.) | 1 | แผ่น |
| 6. แผ่นแก้ว (ขนาด 20x12x0.2 ซม.) | 1 | แผ่น |
| 7. แผ่นพลาสติก (ขนาด 20x12x0.2 ซม.) | 1 | แผ่น |
| 8. แผ่นอีพ็อกซี (ขนาด 20x12x0.2 ซม.) | 1 | แผ่น |

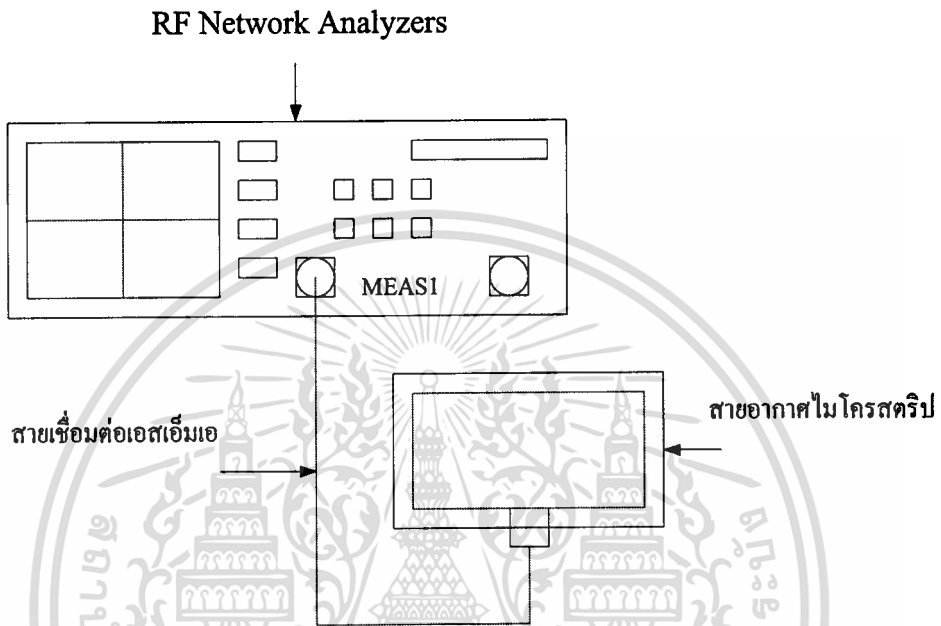
ทฤษฎีเบื้องต้น

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะใช้สายอากาศที่ออกแบบด้วยค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวนเท่ากับ 2.2 ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์ การทดสอบจะใช้วัสดุอื่นๆ มาวางอยู่บนสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม วัสดุที่ใช้เป็นกระดาษ, แก้ว, อีพ็อกซี และพลาสติก วางอยู่บนสายอากาศ และมีการปรับระยะความสูงจากวัสดุถึงตัวสายอากาศที่นำมาทดสอบ ซึ่งค่าระยะความสูงนี้จะมีค่าตามค่าความยาวคลื่นที่ขนาดต่างๆ

แล้วทำการวัดค่าต่างๆ ของสายอากาศที่จุดระยะห่างนั้นๆ ต่อไป

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่ง ใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูปที่ 18



2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas1)

3. นำแท่นปรับเลื่อนที่มีวัสดุที่ต้องการทดสอบมาวางทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยมีสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมวางอยู่ได้วัสดุที่ต้องการทดสอบ

4. เปิดเครื่องแล้วเลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas1

5. เลือกการวัดสะท้อนกลับ โดยเลือกที่ Reflection

6. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Frequency เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์

7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 2 กิกะเฮิรตซ์ หลังจากนั้นทำการปรับเลื่อนระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 7 ลงในตารางที่ 7

9. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) โดยกดปุ่ม Format จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ SWR

10. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ 2 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 2 กิกะเฮิร์ตซ์ จากนั้นทำการปรับเลื่อนระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ

11. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 10 ลงในตารางที่ 8

12. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม Format เลือกการวัดที่ Smithchart

13. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ 2 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 2 กิกะเฮิร์ตซ์ จากนั้นทำการปรับเลื่อนระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ

14. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 13 ลงในตารางที่ 9

หมายเหตุ ค่าระยะความห่างของวัสดุจะบวกเพิ่ม 2 มิลลิเมตรจากค่าระยะความห่างจริงของวัสดุ

ผลการทดลอง

ตารางที่ 7 ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมต่อระยะห่างของวัสดุต่างๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$				
$\lambda/2 = 7.7$				
$\lambda/3 = 5.2$				
$\lambda/4 = 3.95$				
$\lambda/5 = 3.2$				
$\lambda/6 = 2.7$				
$\lambda/7 = 2.34$				
$\lambda/8 = 2.075$				

ตารางที่ 8 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม
ต่อระยะห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$				
$\lambda/2 = 7.7$				
$\lambda/3 = 5.2$				
$\lambda/4 = 3.95$				
$\lambda/5 = 3.2$				
$\lambda/6 = 2.7$				
$\lambda/7 = 2.34$				
$\lambda/8 = 2.075$				

ตารางที่ 9 ผลการทดลองค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมต่อระยะ
ห่างของวัสดุต่าง ๆ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$				
$\lambda/2 = 7.7$				
$\lambda/3 = 5.2$				
$\lambda/4 = 3.95$				
$\lambda/5 = 3.2$				
$\lambda/6 = 2.7$				
$\lambda/7 = 2.34$				
$\lambda/8 = 2.075$				

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

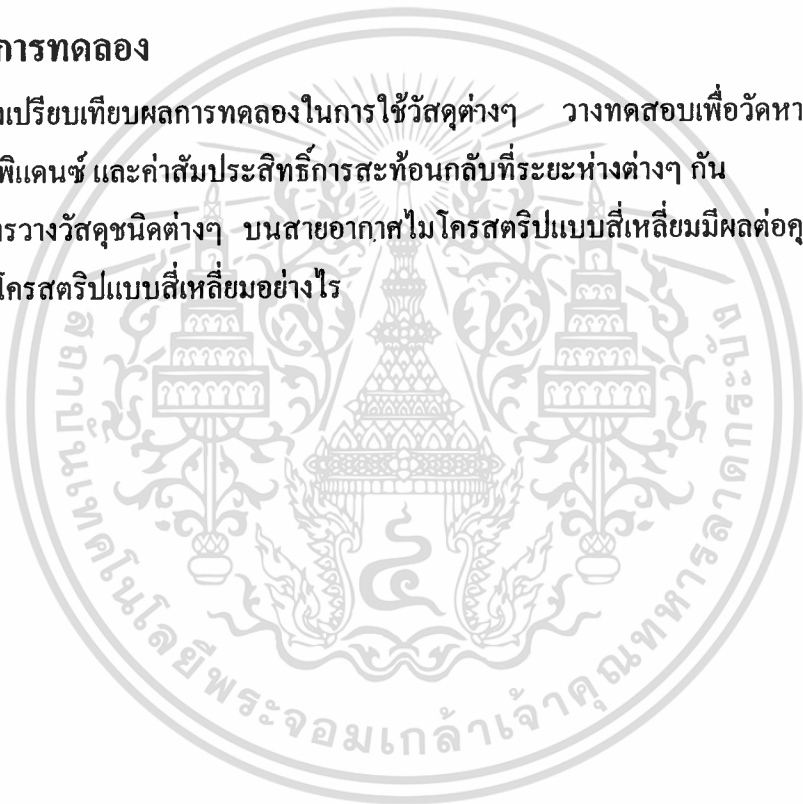
.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงเปรียบเทียบผลการทดลองในการใช้วัสดุต่างๆ วางทดสอบเพื่อวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ระยะห่างต่างๆ กัน
2. การวางวัสดุชนิดต่างๆ บนสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมมีผลต่อคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมอย่างไร



ใบงานที่ 8

การทดสอบวางวัสดุต่างๆ บนสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถอธิบายผลจากการทดสอบวางวัสดุต่างๆ บนสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมได้
2. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมได้

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | | |
|---|---|---------|
| 1. เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF Network Analyzers) | | |
| HEWLETT PACKARD รุ่น HP 8714C 300 kHz – 3000 MHz | 1 | เครื่อง |
| 2. สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี่ | 1 | ตัว |
| 3. สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (Connector Line) | 1 | เส้น |
| 4. แท่นสำหรับปรับเลื่อนวัสดุทดสอบ | 1 | อัน |
| 5. แผ่นกระดาษ (ขนาด 20x12x0.2 ซม.) | 1 | แผ่น |
| 6. แผ่นแก้ว (ขนาด 20x12x0.2 ซม.) | 1 | แผ่น |
| 7. แผ่นพลาสติก (ขนาด 20x12x0.2 ซม.) | 1 | แผ่น |
| 8. แผ่นอีพ็อกซี่ (ขนาด 20x12x0.2 ซม.) | 1 | แผ่น |

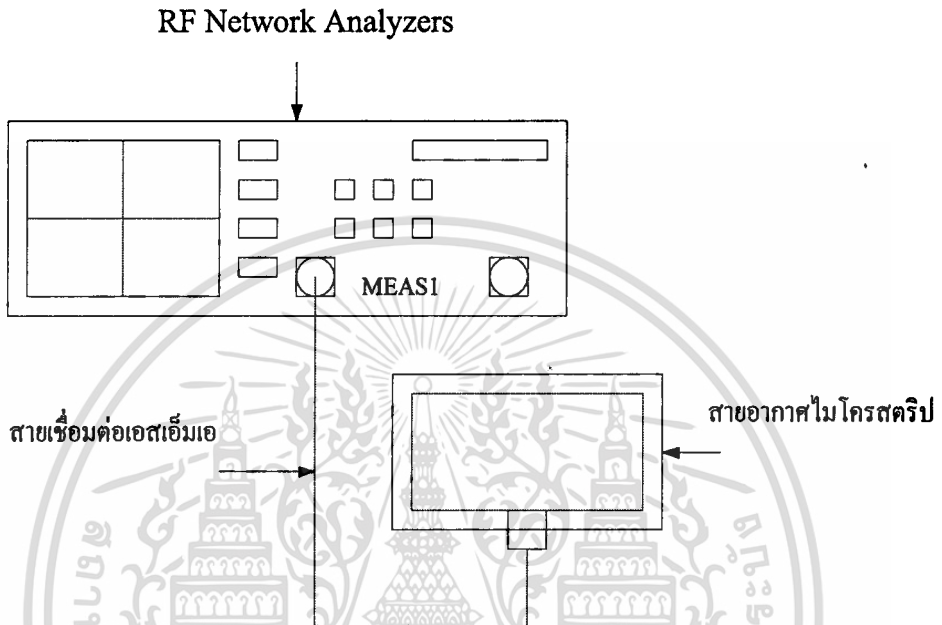
ทฤษฎีเบื้องต้น

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จะใช้สายอากาศที่ออกแบบด้วยค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวนเท่ากับ 2.2 ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์ การทดสอบจะใช้วัสดุอื่นๆ มาวางอยู่บนสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม วัสดุที่ใช้เป็นกระดาษ แก้ว อีพ็อกซี่ และพลาสติก วางอยู่บนสายอากาศ และมีการปรับระยะความสูงจากวัสดุถึงตัวสายอากาศที่นำมาทดสอบ ซึ่งค่าระยะความสูงนี้จะมีค่าตามค่าความยาวคลื่นที่ขนาดต่างๆ แล้วทำการวัดค่าต่างๆ ของสายอากาศที่จุดระยะห่างนั้นๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่ง ใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูปที่ 19



2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas1)

3. นำแท่นปรับเลื่อนที่มีวัสดุที่ต้องการทดสอบมาวางทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยมีสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมวางอยู่ได้วัสดุที่ต้องการทดสอบ

4. เปิดเครื่องแล้วเลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยการกดปุ่ม Meas1

5. เลือกการวัดสะท้อนกลับโดยเลือกที่ Reflection

6. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม Frequency เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์

7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 2 กิกะเฮิรตซ์ หลังจากนั้นทำการปรับเลื่อนระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยเริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ

8. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 7 ลงในตารางที่ 10

9. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) โดยกดปุ่ม Format หลังจากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ SWR

10. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 2 กิกะเฮิรตซ์ หลังจากนั้นทำการปรับเลื่อนระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ

11. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 10 ลงในตารางที่ 11

12. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม Format เลือกการวัดที่ Smithchart

13. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดย กดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 2 กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นทำการปรับเลื่อนระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ

14. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 13 ลงในตารางที่ 12

หมายเหตุ ค่าระยะความห่างของวัสดุจะบวกเพิ่ม 2 มิลลิเมตรจากค่าระยะความห่างจริงของวัสดุ

ผลการทดลอง

ตารางที่ 10 ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป แบบวงกลม

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$				
$\lambda/2 = 7.7$				
$\lambda/3 = 5.2$				
$\lambda/4 = 3.95$				
$\lambda/5 = 3.2$				
$\lambda/6 = 2.7$				
$\lambda/7 = 2.34$				
$\lambda/8 = 2.075$				

ตารางที่ 11 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$				
$\lambda/2 = 7.7$				
$\lambda/3 = 5.2$				
$\lambda/4 = 3.95$				
$\lambda/5 = 3.2$				
$\lambda/6 = 2.7$				
$\lambda/7 = 2.34$				
$\lambda/8 = 2.075$				

ตารางที่ 12 ผลการทดลองค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพ็อกซี
$\lambda/1 = 15.2$				
$\lambda/2 = 7.7$				
$\lambda/3 = 5.2$				
$\lambda/4 = 3.95$				
$\lambda/5 = 3.2$				
$\lambda/6 = 2.7$				
$\lambda/7 = 2.34$				
$\lambda/8 = 2.075$				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

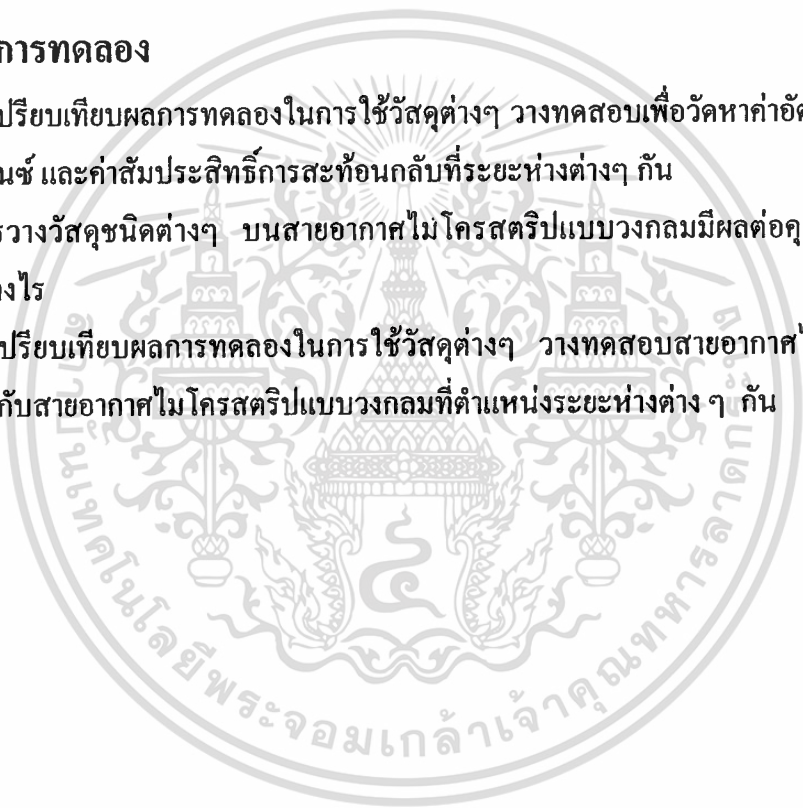
.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงเปรียบเทียบผลการทดลองในการใช้วัสดุต่างๆ วางทดสอบเพื่อวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ระยะห่างต่างๆ กัน
2. การวางวัสดุชนิดต่างๆ บนสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมมีผลต่อคุณสมบัติของสายอากาศอย่างไร
3. จงเปรียบเทียบผลการทดลองในการใช้วัสดุต่างๆ วางทดสอบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม กับสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ตำแหน่งระยะห่างต่างๆ กัน



ใบงานที่ 9

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารตัวกลางที่ใช้ทำ สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้ให้นักศึกษาสามารถอธิบายผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารตัวกลางที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมได้
2. เพื่อให้ให้นักศึกษาสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดค่าคุณสมบัติของสารตัวกลางที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมได้

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | | |
|---|---|---------|
| 1. เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF Network Analyzers)
HEWLETT PACKARD รุ่น HP 8714C 300 kHz – 3000 MHz | 1 | เครื่อง |
| 2. สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากแผ่นคูรอยด์ | 1 | ตัว |
| 3. สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี | 1 | ตัว |
| 4. สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (Connector Line) | 1 | เส้น |

ทฤษฎีเบื้องต้น

วัสดุที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริป

วัสดุที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม ที่นำมาใช้เป็นอุปกรณ์ย่านความถี่ไมโครเวฟจะต้องถูกเลือกอย่างเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งเป็นแผ่นวงจรพิมพ์เหนือแผ่น PCB ซึ่งย่อมาจาก Printed Circuit Board

โดยพื้นฐานของวงจรมินิที่นำมาใช้ทำเป็นวัสดุไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมเป็นแผ่นวงจรพิมพ์แบบ 2 หน้า ที่มีทองแดงอยู่ทั้งสองด้าน การจำแนกวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์นั้นสามารถแยกออกเป็นการแบ่งเกรดต่างๆ ดังนี้

เกรด XXX PC แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ ทำขึ้นจากกระดาษยึดรวมตัวกันด้วยฟีนอลิกเรซิ่น เป็นชนิดที่ใช้งานทั่วๆ ไป ทนความร้อนได้ไม่สูงนัก มีความต้านทานค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเกรดอื่นๆ ที่สูงขึ้นไป

แผ่นวงจรพิมพ์ที่ทำมาจากวัสดุชนิดอื่น สามารถใช้กับความถี่สูงได้ถึงย่านความถี่วิทยุ ออกแบบมาให้ตัดเจาะได้ที่อุณหภูมิต่ำ

เกรด FR-2 ทำจากฟีนอลิก ลักษณะทั่วไป คล้ายกับเกรด XXX PC แต่ออกแบบมาให้ติดไฟได้ยากกว่า ทำให้สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิที่สูงได้

เกรด FR-3 แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ทำมาจากกระดาษบางๆ ยึดติดด้วยอีพ็อกซีเรซินที่มีความแข็งแรงสูงสามารถใช้กับแรงดันสูง และความชื้นสูงได้ดีกว่าเกรด XXX PC

เกรด FR-4 พัฒนามาจากเกรด FR-3 ทำจากใยแก้วยึดติดด้วยอีพ็อกซีเรซิน สามารถใช้กับงานได้หลายประเภท ทนต่อความชื้นและอุณหภูมิสูงได้ และใช้กับแรงดันสูงได้ดีกว่าเกรด XXX PC, FR-2 และ FR-3

เกรด FR-5 พัฒนาขึ้นมาจากเกรด FR-4 โดยยังคงใช้เส้นใยแก้วยึดด้วยอีพ็อกซีเรซินแต่มีความแข็งแรงสูงกว่าทั้งทางกลและทางไฟฟ้า

เกรด FR-6 ทำจากแผ่นใยแก้วบางๆ ยึดรวมกันด้วยเทอร์โมเซตติ้งโพลีเอสเตอร์ มีค่าคงที่ทางสารตัวกลางต่ำ มีความแข็งแรงต่ำ แต่ทนต่อความชื้นสูงได้ดี

เกรด CEM1 แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ใช้เซลลูโลสเป็นแกนกลางมีใยแก้วทอเป็นผิวสองหน้า ยึดติดด้วยอีพ็อกซีเรซินเช่นเดิม ทำให้เจาะตัดง่าย แต่ทนต่อความชื้นต่ำ

เกรด G-10 เป็นชนิดอีพ็อกซีไฟเบอร์กลาส มีความแข็งแรงทางกลสูง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม ลักษณะโดยทั่วไปคล้ายกับ FR-4 แต่ติดไฟยากกว่า

แต่เกรดแผ่นวงจรพิมพ์ที่กล่าวมายังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับการนำไปออกแบบเป็นแผ่นไมโครสตริป ที่ใช้งานย่านความถี่สูงเป็นกิกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีเกรดที่ถูกพัฒนามาให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมขึ้นมาอีกสองเกรด คือ

เกรด G-30 ใช้ใยแก้วยึดด้วยโพลีเอไมด์เรซินมีความคงตัว ด้านทานความชื้นสูง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม เหมาะกับการใช้ทำวงจรพิมพ์ชนิดมัลติเลเยอร์

เกรด G-60 เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดพิเศษที่ใช้สารโพลีซัลโฟนเทอร์โมพลาสติก ทำเป็นสารตัวกลาง เนื่องจากมีค่าความสูญเสียต่ำ สามารถควบคุมคุณสมบัติของสารตัวกลางได้ง่าย ซึ่งนิยมใช้กับงานความถี่สูงมากๆ เป็นกิกะเฮิรตซ์ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้สร้างสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในย่านความถี่สูงๆ

วัสดุที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริปเป็นแผ่น RT/Duroid 5880 และแผ่น Epoxy FR-4 ซึ่งแสดงคุณสมบัติของสารตัวกลางในตารางที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

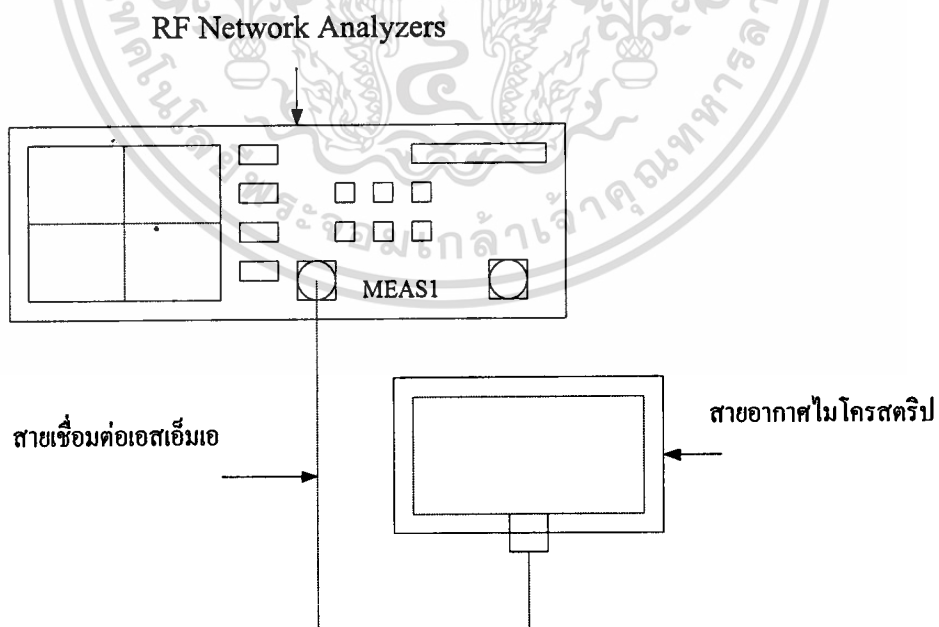
ตารางที่ 13 คุณสมบัติของสารตัวกลาง

วัสดุ	ค่าคงตัวสารตัวกลาง สัมพัทธ์	Loss Factor ($\tan \delta$)	ความสูงของสาร ตัวกลาง (ซม.)
RT/Duroid 5880	2.2	0.0009	0.159
Epoxy FR-4 GE313	4.4	0.01	0.145

ในการทดลองนี้เปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่น RT/Duroid 5880 และแผ่น Epoxy FR-4 โดยทำการวัดการสะท้อนกลับของคลื่น การวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และการวัดอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากแผ่นปรินท์อิพ็อกซี่ โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas 1) ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม Meas 1
3. เลือกการวัดสะท้อนกลับ โดยเลือกที่ Reflection
4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัดกดปุ่ม Frequency เพื่อกำหนดความถี่เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
5. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ต่าง ๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
6. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 6 ลงในตารางที่ 14
7. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) โดยกดปุ่ม Format จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ SWR
8. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
9. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 8 ลงในตารางที่ 14
10. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม Format เลือกการวัดที่ Smitchart
11. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
12. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 11 ลงในตารางที่ 14
13. เปลี่ยนสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี่เป็นแผ่นดูรอยด์ แล้วทำการทดลองตั้งแต่ข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 12 บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

ตารางที่ 14 ผลการทดลองของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี่

ความถี่ที่ทดสอบ	คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป		
	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์			
1.5 กิกะเฮิรตซ์			
2 กิกะเฮิรตซ์			
2.5 กิกะเฮิรตซ์			
3 กิกะเฮิรตซ์			

ตารางที่ 15 ผลการทดลองของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากแผ่นคูรอยด์

ความถี่ที่ทดสอบ	คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป		
	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์			
1.5 กิกะเฮิรตซ์			
2 กิกะเฮิรตซ์			
2.5 กิกะเฮิรตซ์			
3 กิกะเฮิรตซ์			

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงเปรียบเทียบผลการทดลองของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากแผ่นอิพ็อกซี่กับแผ่นดูรอยด์
2. การนำสายอากาศที่ทำจากแผ่นอิพ็อกซี่กับแผ่นดูรอยด์ มีผลต่อคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมอย่างไร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบงานที่ 10

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารตัวกลางที่ใช้ทำ สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้ให้นักศึกษาสามารถอธิบายผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารตัวกลางที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมได้
2. เพื่อให้ให้นักศึกษาสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดค่าคุณสมบัติของสารตัวกลางที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมได้

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | | |
|---|---|---------|
| 1. เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF Network Analyzers) | | |
| HEWLETT PACKARD รุ่น HP 8714C 300 kHz – 3000 MHz | 1 | เครื่อง |
| 2. สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากแผ่นดูรอยด์ | 1 | ตัว |
| 3. สายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี | 1 | ตัว |
| 4. สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (Connector Line) | 1 | เส้น |

ทฤษฎีเบื้องต้น

วัสดุที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริป

วัสดุที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่นำมาใช้ การทำอุปกรณ์ย่านความถี่ไมโครเวฟจะต้องถูกเลือกอย่างเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งเป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่มักเรียกว่าแผ่น PCB ซึ่งย่อมาจาก Printed Circuit Board

โดยพื้นฐานของวงจรพิมพ์ที่นำมาใช้ทำเป็นวัสดุไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมเป็นแผ่นวงจรพิมพ์แบบ 2 หน้า ที่มีทองแดงอยู่ทั้งสองด้าน การจำแนกวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์นั้นสามารถแยกออกเป็นการแบ่งเกรดต่างๆ ดังนี้

เกรด XXX PC แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ ทำขึ้นจากกระดาษอีครวมตัวกันด้วยฟีนอลิกเรซิ่น เป็นชนิดที่ใช้งานทั่วไป ทนความชื้นได้ไม่สูงนักมีความต้านทานค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ

แผ่นวงจรพิมพ์ที่ทำมาจากวัสดุชนิดอื่น สามารถใช้กับความถี่สูงได้ถึงย่านความถี่วิทยุ ออกแบบมาให้ตัดเจาะได้ที่อุณหภูมิต่ำ

เกรด FR-2 ทำจากฟีนอลิก ลักษณะทั่วไป คล้ายกับเกรด XXX PC แต่ออกแบบมาให้ติดไฟได้ยากกว่า ทำให้สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิที่สูงได้

เกรด FR-3 แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ทำมาจากกระดาษบางๆ ยึดติดด้วยอีพ็อกซีเรซินที่มีความแข็งแรงสูงสามารถใช้กับแรงดันสูง และความชื้นสูงได้ ดีกว่าเกรด XXX PC

เกรด FR-4 พัฒนามาจากเกรด FR-3 ทำจากใยแก้วยึดติดด้วยอีพ็อกซีเรซิน สามารถใช้งานได้หลายประเภท ทนต่อความชื้นและอุณหภูมิสูงได้ และใช้กับแรงดันสูงได้ดีกว่าเกรด XXX PC, FR-2 และ FR-3

เกรด FR-5 พัฒนาขึ้นมาจากเกรด FR-4 โดยยังคงใช้เส้นใยแก้วยึดด้วยอีพ็อกซีเรซินแต่มีความแข็งแรงสูงกว่าทั้งทางกลและทางไฟฟ้า

เกรด FR-6 ทำจากแผ่นใยแก้วบางๆ ยึดรวมกันด้วยเทอร์โมเซตติ้งโพลีเอสเตอร์ มีค่าคงที่ทางสารตัวกลางต่ำ มีความแข็งแรงต่ำ แต่ทนต่อความชื้นสูงได้ดี

เกรด CEM1 แผ่นวงจรพิมพ์ชนิดนี้ใช้เซลลูโลสเป็นแกนกลางมีใยแก้วทอเป็นผิวสองหน้า ยึดติดด้วยอีพ็อกซีเรซินเช่นเดิม ทำให้เจาะตัดง่าย แต่ทนต่อความชื้นต่ำ

เกรด G-10 เป็นชนิดอีพ็อกซีไฟเบอร์กลาส มีความแข็งแรงทางกลสูง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม ลักษณะโดยทั่วไปคล้ายกับ FR-4 แต่ติดไฟยากกว่า

แต่เกรดแผ่นวงจรพิมพ์ที่กล่าวมายังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับการนำไปออกแบบเป็นแผ่นไมโครสตริป ที่ใช้งานย่านความถี่สูงเป็นกิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีเกรดที่ถูกพัฒนาขึ้นมาให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมขึ้นมาอีกสองเกรด คือ

เกรด G-30 ใช้ใยแก้วยึดตัวด้วยโพลีเอไมด์เรซินมีความคงตัว ด้านทานความชื้นสูง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม เหมาะกับการใช้ทำวงจรพิมพ์ชนิดมัลติเลเยอร์

เกรด G-60 เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดพิเศษที่ใช้สารโพลีซัลโฟนเทอร์โมพลาสติก ทำเป็นสารตัวกลางเนื่องจากมีค่าความสูญเสียต่ำ สามารถควบคุมคุณสมบัติของสารตัวกลางได้ง่าย ซึ่งนิยมใช้กับงานความถี่สูงมากๆ เป็นกิกะเฮิร์ตซ์ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้สร้างสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในย่านความถี่สูงๆ

วัสดุที่ใช้ทำสายอากาศไมโครสตริปเป็นแผ่น RT/Duroid 5880 และแผ่น Epoxy FR-4 ซึ่งแสดงคุณสมบัติของสารตัวกลางในตารางที่ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 16 คุณสมบัติของสารตัวกลาง

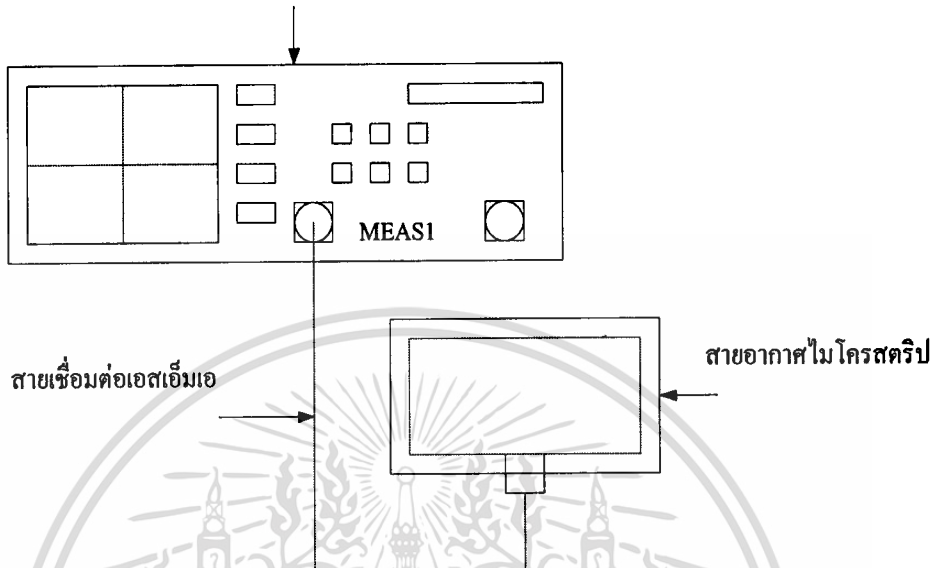
วัสดุ	ค่าคงตัวสารตัวกลาง สัมพัทธ์	Loss Factor ($\tan \delta$)	ความสูงของสาร ตัวกลาง (cm.)
RT/Duroid 5880	2.2	0.0009	0.159
Epoxy FR-4 GE313	4.4	0.01	0.145

ในการทดลองนี้เปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่น RT/Duroid 5880 และแผ่น Epoxy FR-4 โดยทำการวัดการสะท้อนกลับของคลื่น การวัดอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และการวัดอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี่ โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (Meas 1) ดังรูปที่ 21
2. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม Meas 1
3. เลือกการวัดสะท้อนกลับ โดยเลือกที่ Reflection
4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัดกดปุ่ม Frequency เพื่อกำหนดความถี่เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์
5. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ
6. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 6 ลงในตารางที่ 17
7. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) โดยกดปุ่ม Format จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ SWR
8. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์, ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ
9. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 8 ลงในตารางที่ 17

RF Network Analyzers



รูปที่ 21 การต่อสายอากาศไมโครสตริปกับเครื่องมือวัด

10. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม Format เลือกการวัดที่ Smithchart
11. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยกดปุ่ม Marker แล้วตั้งความถี่ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์ และ ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
12. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 11 ลงในตารางที่ 17
13. เปลี่ยนสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี่เป็นแผ่นดูรอยด์ แล้วทำการทดลองตั้งแต่ข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 12 บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

ตารางที่ 17 ผลการทดลองของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี่

ความถี่ที่ทดสอบ	คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป		
	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์			
1.5 กิกะเฮิรตซ์			
2 กิกะเฮิรตซ์			
2.5 กิกะเฮิรตซ์			
3 กิกะเฮิรตซ์			

ตารางที่ 18 ผลการทดลองของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมที่ทำจากแผ่นดูรอยด์

ความถี่ที่ทดสอบ	คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป		
	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์			
1.5 กิกะเฮิรตซ์			
2 กิกะเฮิรตซ์			
2.5 กิกะเฮิรตซ์			
3 กิกะเฮิรตซ์			

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำถามท้ายการทดลอง

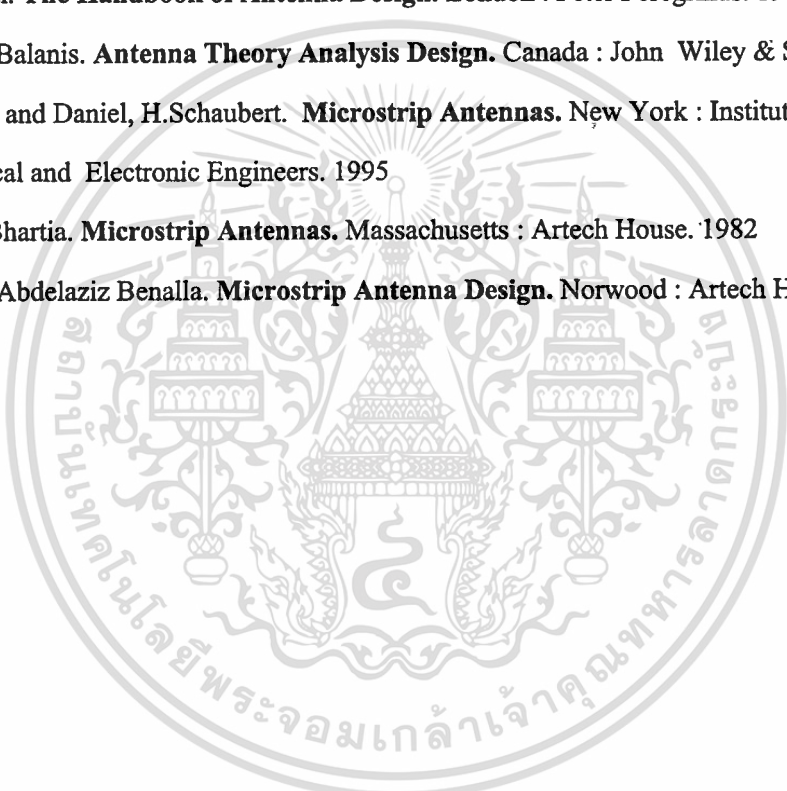
1. จงเปรียบเทียบผลการทดลองของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม ที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซี กับ แผ่นดูรอยด์
2. จงอธิบายผลการทดลองที่ใช้แผ่นอีพ็อกซี และแผ่นดูรอยด์ กับสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลม
3. การนำสายอากาศที่ทำจากแผ่นอีพ็อกซีกับแผ่นดูรอยด์ มีผลต่อคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปแบบวงกลมอย่างไร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- นฤนารถ พูลเพ็ง และคณะ. สายอากาศไมโครสตริป. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง. 2540
- ประภาส วงศ์วิศว์. สายอากาศแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก. กรุงเทพฯ : สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2539
- A.W.Rudge et.al. **The Handbook of Antenna Design**. London : Peter Peregrinus. 1982
- Constantine, A.Balanis. **Antenna Theory Analysis Design**. Canada : John Wiley & Sons. 1997
- David, M.Pozar and Daniel, H.Schaubert. **Microstrip Antennas**. New York : Institute of
Electrical and Electronic Engineers. 1995
- I.J.Bahl and P.Bhartia. **Microstrip Antennas**. Massachusetts : Artech House. 1982
- K.C.Gupta and Abdelaziz Benalla. **Microstrip Antenna Design**. Norwood : Artech House. 1988



ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นายณรงค์ เครือกันทา
วัน เดือน ปี เกิด	27 ธันวาคม 2519
สถานที่เกิด	ลำปาง
ภูมิลำเนาเดิม	163 หมู่ 10 ต.ล้อมแรด อ.เถิน จ.ลำปาง 52160
ที่อยู่ปัจจุบัน	163 หมู่ 10 ต.ล้อมแรด อ.เถิน จ.ลำปาง 52160
โทรศัพท์	054-333276
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านท่านาง
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนเถินวิทยา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคลำปาง
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคลำปาง
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับ	-
คติพจน์	หากหนึ่งวันมี 24 ชั่วโมงจงทำ 24 ชั่วโมงนี้ให้ดีที่สุดเท่าที่ชีวิตนี้จะทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นายธีรพล ทรัพย์บุญ
วัน เดือน ปี เกิด	25 พฤศจิกายน 2518
สถานที่เกิด	พระนครศรีอยุธยา
ภูมิลำเนาเดิม	ช 25/6 หมู่ที่ 2 ต.หัวรอ อ.พระนครศรีอยุธยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	จ.พระนครศรีอยุธยา 13000 ช 25/6 หมู่ที่ 2 ต.หัวรอ อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000
โทรศัพท์	-
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนอนุบาลพระนครศรีอยุธยา
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนอยุธยาอนุสรณ์
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมวิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับ	-
คติพจน์	การทำงานอันใดที่ยังไม่ถึงที่สุดด้วยความ พยายามการทำงานนั้นก็ไร้ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้ที่พิมพ์หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปฏิญาณพันธ	นายเสกสรรค์ เจียรสุวรรณ
วัน เดือน ปี เกิด	7 กุมภาพันธ์ 2519
สถานที่เกิด	ฉะเชิงเทรา
ภูมิลำเนาเดิม	5/1 หมู่ 1 ต.หัวไทร อ.บางคล้า จ.ฉะเชิงเทรา 24110
ที่อยู่ปัจจุบัน	003/11 ถ.ศรีเมือง ต.ท่าประคู้ อ.เมือง จ.ระยอง 21000
โทรศัพท์	038-622550,01-6217091
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนวัดหัวไทร (คงรัตนประชา นุกูล) ฉะเชิงเทรา
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎ์ ฉะเชิงเทรา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคระยอง
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคระยอง
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สิ่งประดิษฐ์คนรุ่นใหม่ กรมอาชีวศึกษา
ผลงานที่ได้รับ	

คติพจน์

ไม่มีชีวิตใครที่จะสมหวังและผิดหวัง

เอกุศลกรรมอันเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่ทรงพิมพ์นี้ไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นายอาทิตย์ คำรงเวชศักดิ์
วัน เดือน ปี เกิด	7 กุมภาพันธ์ 2520
สถานที่เกิด	ชลบุรี
ภูมิลำเนาเดิม	56/3 หมู่1 ถ.ชลบุรี-บ้านบึง ต.หนองรี อ.เมือง จ.ชลบุรี 2000
ที่อยู่ปัจจุบัน	56/3 หมู่1 ถ.ชลบุรี-บ้านบึง ต.หนองรี อ.เมือง จ.ชลบุรี 2000
โทรศัพท์	038-272713
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนเทศบาลอินทปัญญาวัดใหญ่ อินทราราม
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนชลราษฎรอำรุง
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคนิคสัตหีบ
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคสัตหีบ
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับ	-
คติพจน์	ทำวันนี้ให้ดีที่สุด เพื่อวันข้างหน้าจะได้ สบาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้