

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ปริญญาานิพนธ์ สาขาอากาศไมโครสตริป

MICROSTRIP ANTENNA

- ชื่อนักศึกษา 1. นายณนารณ พูลเพ็ง รหัสประจำตัว 39031215
- 2. นายประพจน์ แป้นศรี รหัสประจำตัว 39031218
- 3. นายพิทยา กั่นกา รหัสประจำตัว 39031222
- 4. นางสาวภาวิณี ปานันตา รหัสประจำตัว 39031224

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

- 1. ผศ.วิสุทธิ อธิพรรธรม
- 2. อาจารย์ประเสริฐ เคนพันค้อ
- 3. อาจารย์ปิยะ ศุภวาราสวัฒน์



คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
1. ผศ.วิสุทธิ อธิพรรธรม	
2. อาจารย์ประเสริฐ เคนพันค้อ	
3. อาจารย์ปิยะ ศุภวาราสวัฒน์	
4. อาจารย์ปิยะ จิตธรรมมาภิรมย์	
5. อาจารย์พงษ์เกียรติ เชนฐพิทักษ์สกุล	

วันเดือนปีที่สอบ วันที่ 1 พฤษภาคม 2541 เวลา 14.00 น. ถึง 16.00 น.

สถานที่สอบ ห้อง ค.310 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....30135
วัน, เดือน, ปี- 8 ส.ย. 2541



ผศ.วิชารับรองแล้ว

ลงนาม.....

(ผศ.ดร. ชีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา)

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา... เดือน... พ.ศ. 4/...

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

สายอากาศไมโครสตริป

MICROSTRIP ANTENNA



นายอนุชา
นายประพนธ์
นายพิทยา
นางสาวภาวิณี

พูลเพ็ญ
แป้นศรี
กันกา
ปานันตา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง สายอากาศไมโครสตริป
MICROSTRIP ANTENNA

ผู้จัดทำ

1. นายณนารต พูลเพ็ง
2. นายประพจน์ แป้นศรี
3. นายพิทยา กั่นกา
4. นางสาวภาวิณี ปานันตา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงนาม
(ผศ. วิสุทธิ์ อธิพรธรรม)

ลงนาม
(อาจารย์ประเสริฐ เคนพันค้อ)

ลงนาม
(อาจารย์ปิยะ สุภวาราสುವັນ)

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

ลงนาม
(ผศ.ดร. ชีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง สายอากาศไมโครสตริบ

MICROSTRIP ANTENNA

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาโครงสร้าง และคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริบ
2. เพื่อวิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างสายอากาศไมโครสตริบ
3. นำสายอากาศไมโครสตริบที่สร้างขึ้นไปทดลอง เพื่อหาค่า
 - 3.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ
 - 3.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง
 - 3.3 ค่าอิมพีแดนซ์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความเข้าใจ โครงสร้าง และคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ ไมโครสตริบ
2. สามารถออกแบบ และสร้างสายอากาศไมโครสตริบได้
3. สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริบที่สร้างขึ้นได้

สายอากาศไมโครสตริป

นายอนุารถ	พูลเพ็ง
นายประพนธ์	แป้นศรี
นายพิทยา	กัณกา
นางสาวภาวิณี	ปานันตา

อาจารย์ที่ปรึกษา	
ผศ. วิสุทธิ์	อิทธิธรรม
อาจารย์ประเสริฐ	เคนพั่นก่อ
อาจารย์ปิยะ	สุภวาราสวัฒน์
ปีการศึกษา 2540	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอการออกแบบสร้าง และทดลองหาคูสมบัตินของสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นสี่เหลี่ยม โดยสร้างสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีขนาดเล็ก ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์ และมีความต้านทานภายใน 50 โอห์ม ในปริญญานิพนธ์นี้ได้เสนอการทดลองใช้วัสดุอื่นๆ มาวางอยู่เหนือสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้น วัสดุที่ใช้ได้แก่ แก้ว กระดาษ และพลาสติก ซึ่งพบว่าเมื่อผลการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป

II

MICROSTRIP ANTENNA

MR. NARUNART	PULPENG
MR. PRAPOT	PANSREE
MR. PITTAYA	KANKA
MISS PAWINEE	PANUNTA

ADVISORS

Assist.Prof. WISUIT	ATIPORNTUM
MR. PRASERT	KENPANKHO
MR. PIYA	SUPAVARASUWAT

1997

ABSTRACT

This thesis presents the implementation and quality testing of a rectangular microstrip antenna, by making the antenna on the small print circuit board, frequency are 2 GHz and resistance are within 50Ω . The thesis also propose to put material on construction antennas, the material are glass, paper and plastic which have the effect to the microstrip impedance change.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ถูกล่วงไปด้วยดี เนื่องมาจากความร่วมมือของสมาชิกภายในกลุ่มทุกท่าน ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการวัด และทดสอบรวมทั้งยังให้คำแนะนำ แนวความคิด แนวทางการแก้ไขปัญหา และความรู้ต่างๆ ในการจัดทำปริญญานิพนธ์ ขอขอบคุณห้องสมุดคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ช่วยอำนวยความสะดวก และเอื้อเพื่อสถานที่ในการค้นคว้าข้อมูลสุดท้ายที่ควรระลึกถึงอย่างยิ่ง บิดา และมารดา ที่เป็นผู้ให้ความสนับสนุนด้านการศึกษา และเป็นผู้ให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปริญญาโท	1
1.2 ชัดความสามารถของโครงการ	1
1.3 เนื้อหาโดยสังเขป	1
บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ	3
2.1 ความรู้พื้นฐาน	3
2.1.1 แลสปเบกตรัมความถี่	3
2.1.2 สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามเวลา	5
2.1.3 ตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญสำหรับการวัดในย่านความถี่ไมโครเวฟ	11
2.1.4 ความถี่	11
2.1.5 ความยาวคลื่น และความถี่คลื่น	11
2.1.6 ค่าอิมพีแดนซ์จริง ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	13
2.1.7 เดซิเบล	14
2.1.8 สัญญาณรบกวน	17
2.2 ทฤษฎีสายนำสัญญาณ	19
2.2.1 ความแตกต่างในการวิเคราะห์วงจรที่ใช้สัญญาณความถี่ต่ำและสูง	19
2.2.2 สายนำสัญญาณ	20
2.2.3 สมการที่ใช้ในการหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.2.4 ลักษณะสมบัติของสายนำสัญญาณครึ่งคลื่น และหนึ่งส่วนสี่คลื่น	33
2.2.5 ความสูญเสียบนสายนำสัญญาณ	36
2.3 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป	38
2.3.1 วงจรสมมูลย์ทางกายภาพ	41
2.3.2 การส่งผ่านของคลื่นไมโครสตริป	47
2.3.3 การลดทอนกำลังสัญญาณของไมโครสตริป	54
บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน	57
3.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	57
3.1.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	57
3.1.2 การสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	61
3.2 คุณสมบัติ และการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	62
บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง	63
4.1 กล่าวนำ	63
4.2 การวัด และทดสอบค่าการสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป	63
4.2.1 ลำดับขั้นการทดลอง	63
4.2.2 ผลการทดลอง	64
4.3 การวัด และทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป	66
4.3.1 ลำดับขั้นการทดลอง	66
4.3.2 ผลการทดลอง	66
4.4 การวัด และทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป	68
4.4.1 ลำดับขั้นการทดลอง	68
4.4.2 ผลการทดลอง	69

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.5 การทดสอบค่าคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป โดยการทดสอบวาง วัสดุต่าง ๆ บนสายอากาศ	70
4.5.1 ลำดับขั้นการทดลอง	70
4.5.2 ผลการทดลอง	71
บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไข และพัฒนา	75
5.1 บทสรุป	75
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ	75
5.3 ปัญหา และแนวทางแก้ไข	75
5.4 แนวทางการพัฒนา โครงการ	76
ภาคผนวก ก ใบงานการทดลอง	78
ภาคผนวก ข เฉลยใบงานการทดลอง	102
ภาคผนวก ค รูปต้นแบบของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	126
ภาคผนวก ง ตารางค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวน	129
ประวัติผู้แต่ง	134
บรรณานุกรม	138

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 คำเรียกแถบความถี่แต่ละย่านที่ใช้กันทั่วไป	3
ตารางที่ 2.2 คำเรียกแถบความถี่ย่านไมโครเวฟเมื่อเริ่มแรก	4
ตารางที่ 2.3 การแบ่งแถบความถี่ย่อย ของ IEEE	5
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนในรูป V (dB) และ P (dB)	16
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบค่า กำลังวัตต์กับค่ากำลัง dBm	18
ตารางที่ 2.6 ค่าความต้านทานของโลหะตัวนำ	37
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของแผ่นรองรับแบบต่าง ๆ	39
ตารางที่ 2.8 ค่า ϵ_R และ $\sigma/\omega\epsilon$ ของสารชนิดต่างๆ	40
ตารางที่ 4.1 ค่าการสะท้อนกลับของสายอากาศออกแบบที่ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์	65
ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ออกแบบที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์	68
ตารางที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศออกแบบที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์	70
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ	71
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	72
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองค่าอิมพีแดนซ์	73
ตารางที่ ก.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ	83
ตารางที่ ก.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	89
ตารางที่ ก.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	95
ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองค่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ	99
ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	100
ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองค่าอิมพีแดนซ์	100
ตารางที่ ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ	107
ตารางที่ ข.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	113
ตารางที่ ข.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	119

เอกสารตารางที่ ข.4 ผลการทดลองค่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 123

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VIII

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	124
ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองค่าอิมพีแดนซ์	124



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กรอบๆ แท่ง สายอากาศ	6
รูปที่ 2.2 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ระยะไกลจากสายอากาศ	7
รูปที่ 2.3 การรวม P(dBm) เข้ากับ P (dB)	17
รูปที่ 2.4 สายนำสัญญาณที่แบ่งออกเป็นส่วนๆ	21
รูปที่ 2.5 แบบจำลองของตัวแปรแบบรวมกลุ่มก้อน	21
รูปที่ 2.6 การประจุของตัวเก็บประจุในแต่ละหนึ่งหน่วยความยาว	22
รูปที่ 2.7 การป้อนแรงดันไฟตรงให้แก่สายนำสัญญาณ	22
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลรูปคลื่นแรงดัน และกระแสที่เกิดขึ้นในสาย	25
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในสมการที่ 2.35	32
รูปที่ 2.10 หนึ่งรอบ หรือหนึ่งคาบเวลาของคลื่น โดยใช้หน่วยวัดทั้งสองแบบ	33
รูปที่ 2.11 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสายนำสัญญาณหนึ่งส่วนสี่คลื่น	34
รูปที่ 2.12 การลดทอนของคลื่นแรงดันเนื่องจากความสูญเสียในสาย	36
รูปที่ 2.13 การลดทอนของความหนาแน่นกระแสเนื่องจากความลึกของพื้นผิว	37
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป	39
รูปที่ 2.15 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	42
รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลสายส่ง	43
รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลที่นำคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป	46
รูปที่ 2.18 ขั้นตอนในการออกแบบสายอากาศโดยใช้วงจรสมมูลที่นำคลื่น	48
รูปที่ 2.19 รูปแบบโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ	49
รูปที่ 2.20 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริป	50
รูปที่ 2.21 ไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$ และ $w/h \ll 1$	53
รูปที่ 2.22 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าพารามิเตอร์ประสิทธิผล	53
รูปที่ 2.23 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 3.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	60
รูปที่ 3.2 สายอากาศไมโครสตริปที่มองจากด้านบน	61
รูปที่ 3.3 การแพร่คลื่นสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	62
รูปที่ 4.1 สัญญาณการสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปที่ค่า $\epsilon_r = 3$	64
รูปที่ 4.2 สัญญาณการสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปที่ค่า $\epsilon_r = 4.45$	65
รูปที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ค่า $\epsilon_r = 3$	67
รูปที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ค่า $\epsilon_r = 4.45$	67
รูปที่ 4.5 แผนภาพสมิตชาร์ตของสายอากาศที่มีค่า $\epsilon_r = 3$	69
รูปที่ 4.6 แผนภาพสมิตชาร์ตของสายอากาศที่มีค่า $\epsilon_r = 4.45$	69
รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ	73
รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	74
รูปที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์	74
รูปที่ ก.1 การต่อภาระความต้านทาน	80
รูปที่ ก.2 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด	82
รูปที่ ก.3 สัญญาณสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ	83
รูปที่ ก.4 การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาระที่ไม่ใช่ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ	86
รูปที่ ก.5 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด	88
รูปที่ ก.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	89
รูปที่ ก.7 การต่อภาระความต้านทานแบบต่างๆ	93
รูปที่ ก.8 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด	94
รูปที่ ก.9 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์	95
รูปที่ ก.10 การต่อสายอากาศกับ เครื่องวัด	98

เอกสารรูปที่ ข.1 การต่อภาระความต้านทาน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 104

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ ข.2 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด	106
รูปที่ ข.3 สัญญาณสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ	107
รูปที่ ข.4 การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาระที่ไม่ใช่ค่าอิมพีแดนซ์ คุณสมบัติ	110
รูปที่ ข.5 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด	112
รูปที่ ข.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	113
รูปที่ ข.7 การต่อภาระความต้านทานแบบต่างๆ	117
รูปที่ ข.8 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด	118
รูปที่ ข.9 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์	119
รูปที่ ข.10 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด	122
รูปที่ ค.1 ตัวเชื่อมต่อเอสเอ็มเอ	127
รูปที่ ค.2 แผ่นสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	127
รูปที่ ค.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ลงกล่องแล้ว	128
รูปที่ ค.4 แทนปรับเลื่อนวัสดุทดสอบ	128

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญญานิพนธ์

ปัจจุบันในการสื่อสารผ่านไมโครเวฟมีบทบาทสำคัญมาก การที่จะศึกษา และทดลอง จะต้องใช้อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับในการทดลองอย่างครบถ้วน จึงจะได้ผลการศึกษา และวิเคราะห์ อย่างมีบทสรุปที่แน่นอน ซึ่งอุปกรณ์แต่ละชิ้นในการทดลองมีราคาสูงมาก

ไมโครสตริปเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการสื่อสารผ่านไมโครเวฟปัจจุบันมีราคา แพง และยังไม่แพร่หลาย ไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ใช้ในการ เชื่อมโยงชิ้นส่วนวงจรต่างๆ ของวงจรไมโครเวฟ เนื่องจากไมโครสตริปมีขนาดเล็ก จึงเหมาะ สำหรับทำวงจรรวมของไมโครเวฟ

ดังนั้น ถ้าสามารถคิดค้น วิเคราะห์ และทดลองนำไมโครสตริปมาใช้งานจริงได้ จะสามารถประหยัดต้นทุนในการสร้าง และนำไมโครสตริปที่ได้จากการทดลองไปเป็นแบบ อย่างในการศึกษา และค้นคว้าต่อไป

1.2 ขีดความสามารถของโครงการ

โครงการนี้มีขีดความสามารถดังต่อไปนี้

1. สายอากาศไมโครสตริปสามารถใช้งานในย่านความถี่ไม่เกิน 2 กิกะเฮิรตซ์
2. สายอากาศไมโครสตริปสามารถใช้งานแทนสายอากาศที่มีขนาดใหญ่
3. สายอากาศไมโครสตริปประยุกต์เป็นชุดการทดลองของนักศึกษาระดับปริญญาตรี

1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

เนื้อหาภายในปัญญานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็นบทต่างๆ เพื่อความสะดวกต่อ การศึกษา และทำความเข้าใจในแต่ละบทจะประกอบด้วยเนื้อหาที่สำคัญ ดังนี้

บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ ประกอบด้วยเนื้อหาในทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งทำให้ผู้ อ่านได้มีความรู้ ความเข้าใจเป็นพื้นฐานก่อน อันเป็นประโยชน์ต่อการทำความเข้าใจกับการใช้ งานจริงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การออกแบบ และการสร้าง โดยกล่าวถึงการสร้างชิ้นงาน และรวมทั้งหลักการออกแบบในส่วนต่างๆ ของชิ้นงาน ทำให้ผู้อ่านมีความเข้าใจการออกแบบชิ้นงานของโครงการนี้

บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง กล่าวถึงขั้นตอนการทดลอง การทดสอบประสิทธิภาพ และคุณสมบัติของชิ้นงาน ในโครงการนี้ เพื่อตรวจสอบว่าโครงการนี้สามารถทำได้ตรงตามวัตถุประสงค์หรือไม่

บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไข และพัฒนา เป็นการสรุปผลการทำงาน และได้เสนอแนะแนวทางในการแก้ไข และแนวทางในการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ และการใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น

ภาคผนวก ก ใบงานการทดลอง

ภาคผนวก ข เป็นรายละเอียดของชิ้นงานต้นแบบของสายอากาศไมโครสตริป

ภาคผนวก ก ตารางแสดงค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวนชนิดต่างๆ ที่ใช้ทำแผ่นวงจรพิมพ์

บทที่ 2

ทฤษฎี และหลักการ

2.1 ความรู้พื้นฐาน

2.1.1 แถบสเปกตรัมความถี่

แถบความเข้ม (Spectrum) ของความถี่เริ่มตั้งแต่ 30 เฮิรตซ์ (Hz) ในย่านต่ำกว่าความถี่เสียง ขึ้นไปถึง 1×10^{28} เฮิรตซ์ ในย่านรังสีคอสมิก

ตารางที่ 2.1 คำเรียกแถบความถี่แต่ละย่านที่ใช้กันทั่วไป

แถบความถี่	ชื่อเรียกแถบความเข้มความถี่
3-30 Hz	VLF (Very Low Frequency)
30-30 kHz	LF (Low Frequency)
300kHz-3 MHz	MF (Medium Frequency)
3-30 MHz	HF (High Frequency)
30-300 MHz	VHF (Very High Frequency)
300 MHz-3 GHz	UHF (Ultra High Frequency)
3-30 GHz	SHF (Super High Frequency)
30-300	EHF (Extremely High Frequency)

กรณีแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กันตามบ้านเรือนทั่วไป ซึ่งส่งมาจากโรงจักรผลิตกระแสไฟฟ้า มีความถี่ระหว่าง 50 ถึง 60 เฮิรตซ์ ตามสภาพความเหมาะสมของแต่ละประเทศ จัดอยู่ในแถบความถี่เสียง (AF) ซึ่งกำหนดช่วงความถี่ตั้งแต่ 15 เฮิรตซ์ ถึง 20 กิโลเฮิรตซ์ สำหรับวิทยุระบบเอเอ็ม (AM) อยู่ในช่วง 550 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1.6 เมกะเฮิรตซ์ จัดอยู่ในย่านความถี่ปานกลาง (MF) แต่ความถี่วิทยุ เอฟเอ็ม (FM) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 88 ถึง 108 เมกะเฮิรตซ์ และความถี่วิทยุโทรทัศน์ที่ใช้ความถี่ตั้งแต่ 54 ถึง 210 เมกะเฮิรตซ์ จัดอยู่ในย่านความถี่สูงมาก (VHF) ส่วนวิทยุโทรทัศน์ใช้ความถี่ตั้งแต่ 470 ถึง 880 เมกะเฮิรตซ์ จัดอยู่ในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นแถบความถี่ที่เรียกว่า ความถี่ย่านไมโครเวฟ แต่เดิมกำหนดให้เริ่มตั้งแต่ 1.12 ถึง 40 กิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) แบ่งออกเป็น 12 แถบความถี่ย่อยจากซ้ายไปขวา หรือจากความถี่ต่ำสุดไปจนถึงความถี่สูงสุดของย่านไมโครเวฟ โดยมีการกำหนดชื่อเรียกแต่ละแถบความถี่ย่อยนี้ด้วย แต่ปัจจุบันนี้ได้มีการกำหนดย่านความถี่ไมโครเวฟขึ้นมาใหม่ เพื่อให้เห็นขอบเขตได้ชัดเจน และสะดวกต่อการอ้างอิงมากยิ่งขึ้น โดยกำหนดให้เริ่มจาก 1 ไปจนถึง 100 หรือมากกว่า 100 กิกะเฮิร์ตซ์ขึ้นไป

ตารางที่ 2.2 คำเรียกแถบความถี่ย่าน ไมโครเวฟเมื่อเริ่มแรก

ชื่อเรียกแถบความถี่	ช่วงความถี่, (กิกะเฮิร์ตซ์)
L	1.12-2.7
S	2.6-3.95
G	3.95-5.85
C	4.9-7.05
J	5.85-8.2
H	7.05-10.0
X	8.2-12.4
M	10.0-15.0
P	12.4-18.0
N	15.0-22.0
K	18.0-26.5
R	26.5-40.0

สำหรับตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการจัดแถบสเปกตรัมความถี่ตามมาตรฐานของ IEEE (International of Electrical and Electrical Engineering) ในปัจจุบัน มีชื่อเรียกแถบความถี่ย่อยจาก L ถึง Ka สำหรับความถี่ตั้งแต่ 300 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 40 กิกะเฮิร์ตซ์

ตารางที่ 2.3 การแบ่งแถบความถี่ย่อย ของ IEEE

แถบความถี่	การเรียกชื่อแถบความถี่ของ IEEE ย่านความถี่ , (กิกะเฮิรตซ์)
HF	0.003-0.030
VHF	0.030-0.300
UHF	0.300-1.00
L	1.00-2.00
S	2.00-4.00
C	4.00-8.00
X	8.00-12.0
Ku	12.0-18.0
K	18.0-27.0
Ka	27.0-40.0
Millimeter	40.0-300.0
Submillimeter	มากกว่า 300

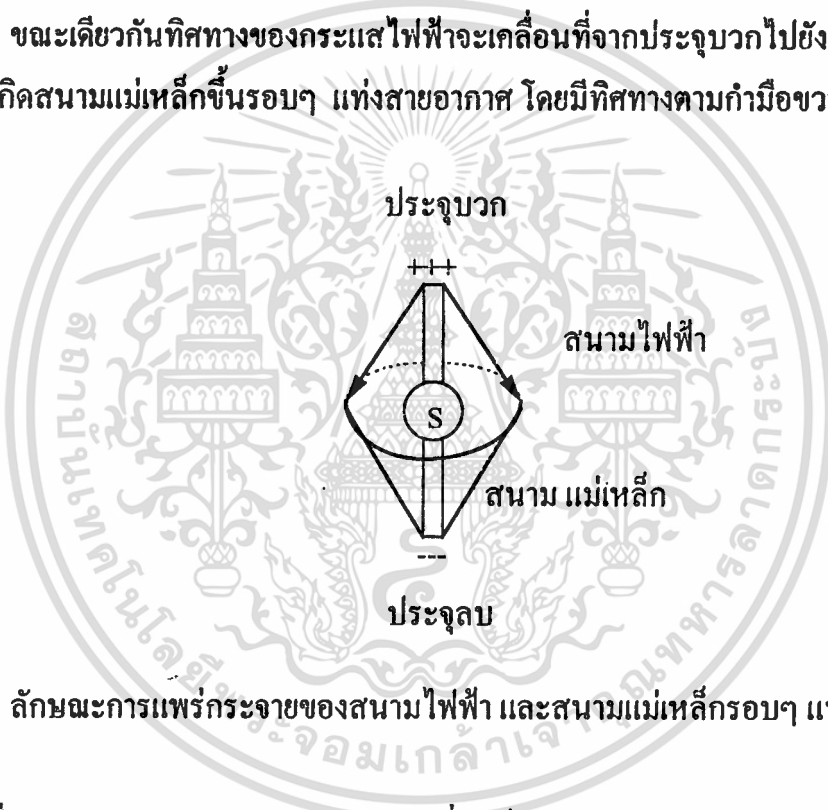
ความถี่ที่อยู่เหนือขึ้นไปจากย่านไมโครเวฟมีชื่อเรียกว่า แถบรังสีความร้อน หรือ เรียกว่า แถบความถี่ย่านอินฟราเรด มีแถบสเปกตรัมความถี่ตั้งแต่ 0.3-4.30 เทราเฮิรตซ์ (THz: เทรา มีค่าเท่ากับ 1×10^{12}) ความถี่ย่านแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ (Visible Light) เป็นแถบความถี่ที่อยู่เหนือย่านอินฟราเรดมีแถบความถี่ตั้งแต่ 430 เทราเฮิรตซ์ จนถึง 1 เพนตะเฮิรตซ์ (PHz : เพนตะ มีค่าเท่ากับ 1×10^{15}) ซึ่งย่านความถี่ที่กล่าวนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานด้านเลเซอร์ (Laser) และเส้นใยแสง (Fiber optic)

2.1.2 สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามเวลา

การเปลี่ยนแปลงจากสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กในสถานะคงที่ไปเป็นสถานะที่แปรกระจายออก อธิบายได้โดยพิจารณาจากการแพร่กระจายของพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดพิจารณาที่สำคัญจะอธิบายการแพร่กระจายของทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก เทียบกับเวลาให้เข้าใจได้ คือ ทำการต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟสลับเข้ากับแท่งสายอากาศ และพิจารณาที่เวลาชั่วขณะหนึ่งในคาบเวลาใดๆ จะพบว่าที่ปลายด้านบนสุดของสายอากาศจะมีประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่งออกอยู่มากที่สุด ในขณะที่เวลาเดียวกันที่ปลายด้านล่างสุดของสายอากาศ จะมีประจุไฟฟ้าชนิดตรงข้ามอยู่มากที่สุดเช่นกัน ในที่นี้ สมมติให้ปลายด้านบนสุดของสายอากาศในเวลาชั่วขณะที่พิจารณานี้เป็นบวกมากที่สุด และปลายด้านล่างสุดของสายอากาศ มีประจุลบอยู่มากที่สุด ดังนั้น สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางพุ่งออกจากประจุบวกเข้าสู่ประจุลบ ขณะเดียวกันทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่จากประจุบวกไปยังประจุลบ เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ แท่งสายอากาศ โดยมีทิศทางตามกำมือขวา



รูปที่ 2.1 ลักษณะการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กรอบๆ แท่งสายอากาศ

เมื่อพิจารณาว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เป็นแรงดันไฟสลับ ปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นในช่วงเวลาใดๆ การแพร่กระจาย หรือการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้ามีทิศทางกลับไปกลับมา การกลับทิศทางไปมานี้เป็นไปตามความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แท่งสายอากาศมีผลให้ทิศทางของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสลับทิศทางตามไปด้วย การอธิบายการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้างกล่าวจะใช้ในกรณีของสนามที่เกิดรอบๆ แท่งสายอากาศเท่านั้น แต่ที่ระยะไกลออกไปจากตัวสายอากาศมากๆ เรียกว่า สนามระยะไกล (Far field) ไม่สามารถอธิบายการคงสภาพของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กด้วยการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในแท่งสายอากาศต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

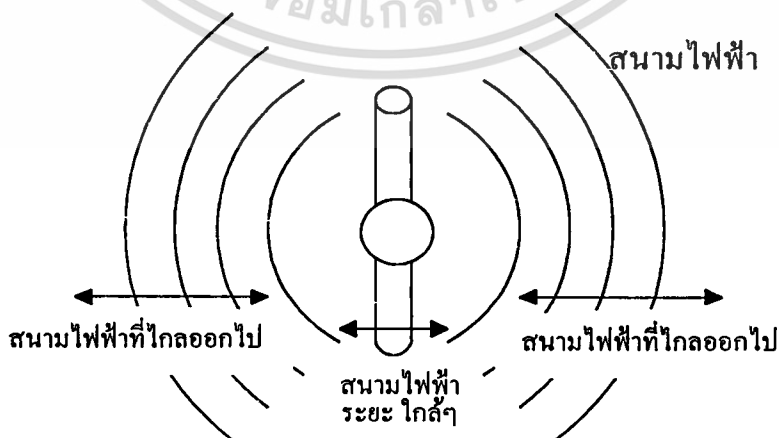
การเกิดสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ สนามไฟฟ้าแปรเปลี่ยนตามเวลาในสุญญากาศจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลาหรือในทางกลับกัน สนามไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำขึ้นด้วยสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามเวลา ซึ่งสนามที่ถูกให้เหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นนี้อยู่รอบๆ โกลั้กับกับสนามที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ สามารถอธิบายให้เห็นภาพของสนามเหล่านี้ได้อย่างง่าย ๆ โดยเทียบกับห่วงโซ่คล้องกันไว้ การเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันของทั้งสองสนาม คือ สนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า ซึ่งแปรเปลี่ยนตามเวลาสามารถอธิบายในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ หรือสมการของเวกเตอร์ ดังสมการที่ 2.1

ในสมการที่ 2.1 การ \times (คูณ หรือ cross) ระหว่าง v และ E หรือระหว่าง v และ H แสดงให้ทราบว่าสมการทั้งสองนี้ คือ Cross products หรือ Vector products โดยที่ผลคูณของเวกเตอร์ทั้งสองให้ผลลัพธ์เป็นเวกเตอร์ด้วย และทิศทางของเวกเตอร์จะตั้งฉากกับระนาบที่ผ่านเวกเตอร์ทั้งสอง ดังนั้น เวกเตอร์ v , E และ H จึงทำมุมฉากซึ่งกันและกัน ทิศทางของเวกเตอร์ลัพธ์หาได้จากกฎมือขวา

$$H = \epsilon(v \times E) \quad (2.1)$$

โดยที่

H	= ความเข้มสนามแม่เหล็ก	(แอมป์แปร์/เมตร)
E	= ความเข้มสนามไฟฟ้า	(โวลต์/เมตร)
v	= ความเร็วของรูปคลื่น	(เมตร/วินาที)
ϵ	= ค่าเพอมีตติวิตี	(ฟารัด/เมตร)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 2.2 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ระยะไกลจากสายอากาศ ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = -\mu(v \times H) \quad (2.2)$$

โดยที่	H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก	(แอมป์แปร์/เมตร)
	E = ความเข้มสนามไฟฟ้า	(โวลต์/เมตร)
	v = ความเร็วรูปคลื่น	(เมตร/วินาที)
	μ = ค่าเพอมีอะบิลิตี	(เฮนรี/เมตร)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปคลื่นสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าที่ได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า ซึ่งเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือในทางกลับกันมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กทำให้มีการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า โดยจะเกิดการเหนี่ยวนำกลับไปกลับมา และมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก เช่นนี้ตลอดไปไม่มีที่สิ้นสุด ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะแผ่ออกไปเป็นรูปคลื่นรวม เรียกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางด้วยความเร็วเท่ากับแสงในที่ว่าง คือ 3×10^8 เมตรต่อวินาที และจะแผ่ขยายคลื่นออกไปอย่างต่อเนื่องจนกว่าพลังงานของคลื่นจะลดทอนไปจนหมดสิ้น ทั้งรูปคลื่นสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า โดยจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางขวา เป็นไปตามสมการที่ 2.1 และ 2.2

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีชื่อเรียกต่างกันหลายแบบด้วยกัน พิจารณาจากการจัด หรือการวางตัวของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กเทียบกับทิศทางการเดินทาง หรือการแพร่กระจายของคลื่น ถ้าสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กถูกจัดวางในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นนี้เรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวขวาง (Transverse Electromagnetic Wave : TEM) ถ้าสนามไฟฟ้าทำมุมฉากกับทิศทางการแพร่กระจายคลื่น โดยมีเพียงส่วนหนึ่งของสนามแม่เหล็กทำมุมฉาก และอีกส่วนประกอบที่เหลืออยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่า คลื่นไฟฟ้าในแนวขวาง (Transverse Electric Wave : TE) พิจารณาได้ตามรูป กรณีสสนามแม่เหล็กทำมุมฉากกับทิศทางการแพร่กระจายของคลื่น และมีส่วนประกอบ หรือเวกเตอร์ย่อย 2 เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าทำมุมฉาก และอยู่ในแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น เรียกคลื่นในลักษณะนี้ว่า คลื่นแม่เหล็กในแนวขวาง (Transverse Magnetic Wave : TM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าคลื่น (Wave Front)

ในการพิจารณาการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวสายอากาศ ที่เวลาชั่วขณะใด ๆ ณ จุดซึ่งอยู่ห่างออกมาเป็นระยะทางคงที่ค่าหนึ่งจะสามารถกำหนดรูปร่างกลม ซึ่งเสมือนเป็นตัวแทนของการมีเฟสของสนามไฟฟ้าเดียวกัน (In phase) ตลอดทั่วทั้งผิวของรูปร่างกลม และรูปร่างกลมของเฟสที่เหมือนกันนี้จะเคลื่อนที่ขยายตัวออกจากสายอากาศด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสงด้วยทิศทางที่หาจากเวกเตอร์ทิศทางพื้นผิวทรงกลมนี้ เรียกว่า หน้าคลื่น (Wave front) เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างจากตัวสายอากาศออกไปที่ส่วนเล็กๆ ส่วนหนึ่งของพื้นผิวจะไม่เป็นระนาบโค้งอีกแล้วนั้น จะได้สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากต่อกัน จะเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟาลักษณะนี้ว่า คลื่นระนาบ

การจัดขั้วคลื่น

เพื่อที่จะนิยาม หรือระบุลักษณะของหน้าคลื่น (Wave front) วิธีหนึ่งที่ใช้ คือ อ้างอิงจากการจัดวางตัวของสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็ก มีชื่อเรียกว่า การจัดขั้วคลื่น โดยวิธีที่นิยมใช้ และเป็นหลักการปฏิบัติทั่วไปจะอ้างอิงทิศทางของสนามไฟฟ้า ถ้าคลื่นระนาบที่พิจารณามีสนามไฟฟ้าในแกน y หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งสนามไฟฟ้ามีทิศตั้งขึ้น เรียกคลื่นลักษณะนี้ว่า การจัดขั้วคลื่นแบบแนวตั้ง (Vertical Polarization) แต่กรณีสนามไฟฟ้าวางตัวอยู่ในแนวแกน x หรือสนามไฟฟ้ามีทิศทางขนานไปกับแนวระนาบ เรียกคลื่นลักษณะนี้ว่า ขั้วคลื่นแนวนอน (Horizontal Polarization)

เพื่อให้สายอากาศส่ง และสายอากาศรับทำงานได้ผลดีที่สุด คือ สามารถรับส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด สายอากาศทั้งส่ง และรับจำเป็นต้องมีการจัดวางขั้วคลื่นเหมือนกัน ถ้าสายอากาศส่งทำการส่งขั้วคลื่นแบบแนวนอน ทางด้านสายอากาศรับก็จะต้องวางตัวในแนวที่รับขั้วคลื่นแบบแนวนอนด้วย หรือถ้าสายอากาศส่งทำการส่งขั้วคลื่นแบบแนวตั้ง ทางด้านสายอากาศรับจะต้องวางตัวในแนวที่รับขั้วคลื่นแบบแนวตั้งด้วย สัญญาณวิทยุที่ใช้การผสมคลื่นทางแอมพลิจูด (Amplitude Modulation) จะมีการจัดวางขั้วคลื่นแบบแนวตั้ง ส่วนสัญญาณโทรทัศน์ที่ส่งออกอากาศจากสถานีต่างๆ จะมีการจัดขั้วคลื่นเป็นแบบแนวนอน สภาวะของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่รอยต่อ

เพื่อความเข้าใจในเรื่องการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณ (Transmission Line) และการก่อตัว หรือจัดเรียงตัวของคลื่นไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็กในท่อนำคลื่น (Wave Guide) ต้องศึกษาเกี่ยวกับสภาวะสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่รอยต่อซึ่งเชื่อมระหว่างสัญญาณอากาศกับพื้นผิวดำ ถ้าให้

สนามไฟฟ้าทำมุมตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวนำเวกเตอร์สนามไฟฟ้านี้ต้องเชื่อมต่อกับประจุไฟฟ้าบนพื้นผิว ดังนั้น เวกเตอร์สนามไฟฟ้าจึงไม่สามารถจะทำแนวขนานไปกับพื้นผิวของตัวนำได้ เงื่อนไขของสนามไฟฟ้า ที่พื้นผิวของตัวนำ สรุปได้ดังนี้

1. สนามไฟฟ้า ที่พื้นผิวของตัวนำมีได้เฉพาะสนามไฟฟ้าที่ทำมุมฉากกับพื้นผิวของตัวนำเท่านั้น

2. สนามไฟฟ้า ที่ขนานกับพื้นผิวตัวนำต้องมีค่าเท่ากับศูนย์

สำหรับกรณีสนามแม่เหล็กที่พื้นผิวตัวนำจะมีได้กรณีเดียว คือ สนามที่มีทิศทางขนานไปกับพื้นผิวตัวนำ เพราะว่าสนามแม่เหล็กจะเกิดล้อมรอบกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจึงเป็นไปได้ที่สนามแม่เหล็กจะทำมุมฉากกับพื้นผิวตัวเหนี่ยวนำ เงื่อนไข มีดังนี้

1. สนามแม่เหล็กมีได้กรณีเดียวเท่านั้น คือ มีทิศทางขนานเป็นวงล้อมรอบพื้นผิวของตัวนำ

2. สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวตัวนำจะต้องเท่ากับศูนย์ คือ ไม่เกิดขึ้นเลย

การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านสุญญากาศ โดยที่พลังงานทั้งหมดของคลื่นแบ่งอยู่ในสนามไฟฟ้าครึ่งหนึ่ง และในสนามแม่เหล็กอีกครึ่งหนึ่ง ถ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีทิศพุ่งเข้าสู่พื้นผิวของตัวนำ พลังงานทั้งหมดจะสะท้อนกลับที่พื้นผิวนั้น เนื่องจากพื้นผิวที่เป็นตัวนำไม่มีความต้านทานพลังงาน จึงไม่มีการสูญเสีย พิจารณาการสะท้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่พื้นผิวซึ่งเป็นตัวนำ จากเงื่อนไขที่รอยต่อของสนามไฟฟ้ากล่าวไว้ว่า สนามไฟฟ้าขนานที่พื้นผิวของตัวนำต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชั่วคราวคลื่นเป็นแบบแนวตั้ง ดังนั้นมีเพียงวิธีเดียวเท่านั้นที่สนามไฟฟ้าขนานจะมีค่าเท่ากับศูนย์ที่พื้นผิวตัวนำ คือ คลื่นสะท้อนที่สะท้อนออกมาจากพื้นผิวตัวนำจะต้องกลับเฟสตรงข้ามกับเฟสของคลื่นตกกระทบ ผลรวมของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนซึ่งกลับเฟส ทำให้สนามไฟฟ้าที่พื้นผิวของตัวนำมีค่าเป็นศูนย์ และเวกเตอร์ทิศทางแสดงให้เห็นว่าทิศทางของคลื่นตกกระทบพุ่งเข้าหาพื้นผิวตัวนำส่วนคลื่นสะท้อนมีทิศทางพุ่งออกจากพื้นผิวตัวนำ

การสะท้อน และการส่งผ่านของคลื่น

เมื่อไรก็ตามที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังตัวกลางอีกแห่งหนึ่งซึ่งมีค่าเพอิมิตติวิตีที่แตกต่างกันพลังงานบางส่วนถูกส่งผ่านไปยังตัวกลางใหม่ และพลังงาน

บางส่วนของคลื่นสะท้อนกลับมายังตัวกลางเดิม พลังงานรวมทั้งหมดของคลื่นตกกระทบมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่สะท้อนกลับ และพลังงานส่วนที่ส่งผ่านไปยังตัวกลางใหม่

2.1.3 ตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญสำหรับการวัดในย่านไมโครเวฟ

สำหรับการวัดความถี่ไมโครเวฟใช้คลื่นแรงดัน คลื่นกระแส และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในรูปที่แปรเปลี่ยนตามเวลา และในรูปสัญญาณไซน์ โดยที่ความถี่ค่า การวัดจะออกมาในรูปของแรงดัน และกระแส ที่ความถี่ไมโครเวฟจะใช้การวัดออกมาในรูป หรือในเทอมของความถี่ ความยาวคลื่น และกำลังงาน ซึ่งมีความหมาย และประโยชน์ในการใช้งานมากกว่า

2.1.4 ความถี่

ความถี่ หมายถึง จำนวนลูกคลื่นต่อวินาทีในหน่วยเฮิรตซ์ ความเร็ว และความยาวคลื่นของคลื่นมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่าน แต่ความถี่จะมีค่าคงที่เสมอ คาบเวลาของคลื่น ซึ่งเป็นเวลาของหนึ่งลูกคลื่นนั้น มีค่าแปรเปลี่ยนผกผันกับความถี่

$$T = \frac{1}{f}$$

(2.3)

โดยที่ T = คาบเวลา, วินาที (1 ลูกคลื่น)

f = ความถี่, เฮิรตซ์

2.1.5 ความยาวคลื่น และความเร็วคลื่น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในอากาศว่าง ความเร็วเท่ากับ 299,792,462 เมตรต่อวินาที หรือประมาณ 300,000,000 เมตรต่อวินาที จะใช้ค่าประมาณนี้ในการคำนวณต่อไป ความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรโดยตรงกับความเร็วของคลื่น และแปรผกผันกับความถี่

ในการคำนวณจะพบว่าที่ความถี่เดียวกัน ค่าความยาวคลื่นในตัวกลางที่เป็นฉนวนจะสั้นกว่าเสมอ สำหรับวิธีแสดงค่าความยาวคลื่นมีดังนี้

ค่าความยาวคลื่นของคลื่นแรงดัน และกระแสสามารถแสดงได้คือ

1. แสดงด้วยค่าระยะทาง ซึ่งมีเฟสเปลี่ยนไป 2π เรเดียน หรือ 360 องศา (Phase scale)
2. แสดงด้วยค่าความยาวจริงในหน่วยที่ใช้วัดกันทั่วไป (Physical length scale)
3. แสดงด้วยค่าความยาวทางไฟฟ้า (Wavelength scale)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.4)$$

โดยที่ λ = ความยาวคลื่น, เมตร

f = ความถี่, เฮิรตซ์

c = ความเร็วของคลื่น, เมตร/วินาที

สำหรับข้อได้เปรียบของการแสดงค่าความยาวคลื่นในหน่วยของความยาวคลื่นเอง ก็เป็นอิสระไม่ขึ้นต่อความถี่ใช้งาน ซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปไปรษณของลูกคลื่นเรียกว่าค่าคงตัวของเฟส (B) ความเร็วของเฟสซึ่งเดินทางไปในสุญญากาศเป็นสัดส่วนกับความเร็วเชิงมุมของคลื่น (ω) และเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าคงตัวของเฟส (B) ดังนั้น ได้ว่า

$$v = \frac{\omega}{B}$$

เพราะว่า $\omega = 2\pi f$ ดังนั้น ความเร็ว v จะเท่ากับ

$$v = \frac{2\pi f}{B}$$

ความถี่ (f) สัมพันธ์กับความเร็ว และความยาวคลื่นตามสมการที่ 2.4 สมการ v จะเป็น

$$v = \frac{2\pi v}{B\lambda}$$

ค่าคงตัวของเฟสจะเป็น

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.5)$$

โดยที่ B = เรเดียนต่อความยาวคลื่น

λ = ความยาวคลื่น, เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความเร็วคลื่นตามที่ได้กล่าวไว้ว่า ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที ความยาวคลื่นในตัวกลางที่เป็นฉนวนสั้นกว่าในสุญญากาศ และโดยข้อเท็จจริงนี้เอง เป็นผลให้ความเร็วคลื่นในตัวกลางที่เป็นฉนวนลดลงด้วย ความเร็วของคลื่นนั้นขึ้นกับค่าเพอิมิตติวิตี (Permittivity) และค่าเพอิมิอะบิลิตี (Permiability) ของตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางใดๆ เป็นตามสมการต่อไปนี้

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \quad (2.6)$$

โดยที่ v = ความเร็วของคลื่น, เมตร/วินาที

μ = ค่าเพอิมิอะบิลิตี, เฮนรี/เมตร

ϵ = ค่าเพอิมิตติวิตี, ฟารัด/เมตร

ในการคำนวณหาความเร็วของคลื่นในตัวกลางใดๆ ค่า μ และ ϵ จะหามาจากค่า μ และ ϵ ในสุญญากาศกับค่า μ และ ϵ สัมพัทธ์ของตัวกลางที่พิจารณานั้นจากสมการที่ 2.6 จะได้ค่า เพอิมิตติวิตี $\epsilon = \epsilon' \epsilon_0$ และจากสมการที่ 2.6 จะได้ค่าเพอิมิอะบิลิตี $\mu = \mu' \mu_0$ ดังนั้น สมการที่ 2.6 จะเป็น

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu' \mu_0 \epsilon' \epsilon_0}} \quad (2.7)$$

2.1.6 ค่าอิมพีแดนซ์จริงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

อัตราส่วนของสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กมีชื่อเรียกว่า ค่าอิมพีแดนซ์จริง (Intrinsic impedance) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเมตร ส่วนสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นแอมป์แปร์ต่อเมตร ค่าอัตราส่วนจะอยู่ในรูปโวลต์ต่อแอมป์แปร์ หรือโอห์มนั่นเอง

$$\frac{E}{H} = \frac{\text{โวลต์ / เมตร}}{\text{แอมป์แปร์ / เมตร}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{E}{H} = \text{โวลต์ / แอมป์แปร์}$$

$$\frac{E}{H} = \text{โอห์ม}$$

สำหรับคลื่นระนาบในตัวกลางฉนวน ค่าอิมพีแดนซ์จริง กำหนดได้ตามสมการที่ 2.8

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.8)$$

โดยที่ η = ค่าอิมพีแดนซ์จริงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, โอห์ม

μ = ค่าเพอมีอิตีวีตี้, เฮนรี/เมตร

ϵ = ค่าเพอมีตติวิตี, ฟารัด/เมตร

2.1.7 เดซิเบล

เดซิเบล (Decibel) เป็นค่าที่กำหนดมาจาก 10 เท่าของค่าลอการิทึมฐาน 10 ของอัตราส่วนของกำลังในเรื่องไมโครเวฟต้องมีความเกี่ยวข้องกับเรื่องล็อกการิทึม และค่าส่วนกลับของล็อกการิทึม เพราะวาล็อกการิทึมมีประโยชน์ในการลดรูปการคูณ และหารให้เป็นการบวกและลบแทน และนำมาทำการเปรียบเทียบได้ง่ายกว่า สะดวกกว่า กำลังไฟฟ้าแสดงในหน่วยเดซิเบล

กำลังไฟฟ้าในหน่วยเดซิเบลหาได้ตามสมการ

$$P = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (2.9)$$

โดยที่ P = ค่าอัตราส่วนอยู่ในหน่วยเดซิเบล (dB)

P_1 = กำลังไฟฟ้าอินพุต

P_2 = กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

ในสมการที่ 2.9 P_1 และ P_2 เป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่นำมาเปรียบเทียบกัน โดยค่าอัตราส่วน $\frac{P_2}{P_1}$ ออกมาเป็นตัวเลขซึ่งไม่มีหน่วย ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าในหน่วย dB จะแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าค่าใด จะมีย่านน้อยกว่ากัน ถ้า $\frac{P_2}{P_1}$ มีค่ามากกว่า 1 ผลจะได้เป็นบวก แต่ถ้า $\frac{P_2}{P_1}$ มีค่าน้อยกว่า 1 ผลเดซิเบลจะได้เป็นลบ แต่ต้องจำไว้ว่า P_1 และ P_2 จะต้องแปลงให้อยู่ในหน่วยเดียวกันด้วย ส่วนกรณีค่ากำลังไฟฟ้าในหน่วยเดซิเบลเป็นศูนย์ แสดงว่ากำลังไฟฟ้าทั้งสองมีค่าเท่ากัน

แรงดันแสดงในหน่วยเดซิเบล

ค่าอัตราส่วนของแรงดัน 2 ค่า เปรียบเทียบกัน แสดงออกมาในรูปเดซิเบล โดยการแทนสมการกำลังไฟฟ้าในสมการที่ 2.9

ทำการแทนสมการ $P = \frac{V^2}{R}$ ลงในสมการที่ 2.9 ได้เป็น

$$P = 10 \log \frac{(V_2)^2 / R_2}{(V_1)^2 / R_1}$$

กรณีตัวความต้านทานทั้งสองมีค่าเท่ากัน สมการจะเป็น

$$P = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

เพราะว่าตัวแปรทุกตัวเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนั้น สมการจึงเปลี่ยนรูปเป็น

$$V = 20 \log \frac{V_2}{V_1} \quad (2.10)$$

โดยที่ V คือ อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้า (dB) และ V_1, V_2 ต้องเป็นหน่วยเดียวกัน

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนในรูป V (dB) และ P (dB)

P (dB) = 10 log P ₂ / P ₁	Numerical Ratio	V (dB) = 10 log V ₂ / V ₁
60	10 ⁶	120
50	10 ⁵	100
40	10 ⁴	80
30	10 ³	60
20	10 ²	40
10	10	20
0	1	0
-10	10 ⁻¹	-20
-20	10 ⁻²	-40
-30	10 ⁻³	-60
-40	10 ⁻⁴	-80

กำลังไฟฟ้าแสดงในหน่วย dBm

ค่ากำลังไฟฟ้าที่อ้างอิงกับระดับกำลังไฟฟ้า 0.001 วัตต์ หรือ 1 มิลลิวัตต์ เรียกว่า dBm และแสดงได้ตามสมการดังนี้

$$P \text{ (dBm)} = 10 \log \frac{P}{0.001} \quad (2.11)$$

โดยที่ P = กำลังไฟฟ้าในหน่วยวัตต์ (W)

กำลังไฟฟ้าที่คิดเทียบกับระดับกำลังไฟฟ้า 1 มิลลิวัตต์ ในหน่วย dBm นี้ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าวัตต์ (watt) ซึ่งทั้งสองตัวแปรนี้สามารถแปลงกลับไปกลับมาได้ ถ้าทราบค่าตัวแปร P สามารถหาค่าในรูป P (dBm) ได้ หรือในทางกลับกัน เมื่อทราบ P (dBm)

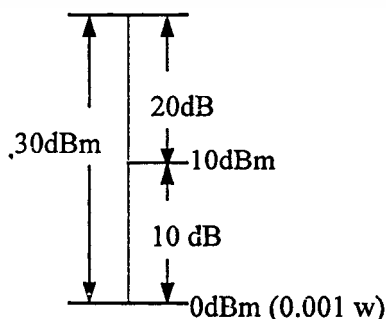
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่า P ได้เช่นกันโดยใช้สมการที่ 2.11 นี้ การเปรียบเทียบค่ากำลังเป็นวัตต์กับค่ากำลังในหน่วย dBm แสดงดังในตารางที่ 2.6

เนื่องจากค่า dBm เป็นค่าที่อ้างอิงกับค่า 0.001 วัตต์ การรวมค่าเดซิเบลที่เป็นบวก หรือลบจะเป็นผลให้ค่าเดซิเบลที่ได้เป็น dBm ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งตามรูปนี้ 20 dB นำมารวมเข้ากับ 10 dBm ผลออกมาได้เป็น 30 dBm จะเห็นว่าการรวม หรือเพิ่มค่าเดซิเบลเข้าไปในทอม dBm ผลที่ได้จะเป็นหน่วย dBm เสมอ

2.1.8 สัญญาณรบกวน

ในที่นี้จะกล่าวถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิ ที่ส่วนหน้าสุด (Front end) ของวงจรซึ่งจะมีผลต่อการทำงานในระดับสัญญาณต่ำ โดยมีค่ารูปร่างของสัญญาณรบกวน (Noise figure) และสิ่งที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise factor) เป็นตัวกำหนดระดับการวัดของสัญญาณรบกวนด้วยความเร็ว และทิศทางที่ไม่แน่นอน แต่ความเร็วในการเคลื่อนที่นั้นขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature) ของสถานะแวดล้อม ซึ่งเราจะเรียกสัญญาณรบกวนในลักษณะนี้ว่า สัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิ (Thermal Noise หรือ Jonson Noise) โดยค่าสัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุโลหะโดยปราศจากการไหลของกระแสผ่านเลย ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (Root mean square) ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิ ความต้านทานของเนื้อวัสดุ และความกว้างของแถบความถี่ที่ใช้ในวงจร ดังสมการที่ 2.12 ค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมินั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ที่ใช้งานในวงจร แต่ขึ้นอยู่กับแถบความถี่ของความถี่ที่ใช้งาน ในการที่จะลดสัญญาณรบกวนชนิดนี้ลงให้ได้มากที่สุด จะต้องทำให้ความต้านทานที่ส่วนหน้าของวงจรมีค่าต่ำ อุณหภูมิในการทำงานต่ำ รวมทั้งจำกัดแถบความถี่ของความถี่ใช้งานให้แคบที่สุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 2.3 การรวม P(dBm) เข้ากับ P (dB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องสมุดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบค่ากำลังวัตต์กับค่ากำลัง dBm

กำลังในหน่วยวัตต์	กำลังเทียบเท่าในหน่วย dBm
1 kW	60 dBm
100 W	50 dBm
10 W	40 dBm
1 W	30 dBm
100 mW	20 dBm
10 mW	10 dBm
1mW (จุดอ้างอิง)	0 dBm
100 μ W	-1 dBm
10 μ W	-20 dBm
1 μ W	-30 dBm

$$V_{\text{อุณหภูมิ}} = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (2.12)$$

โดยที่ $V_{\text{อุณหภูมิ}} \text{ (rms)}$ = ค่า root mean square ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

k = ค่าคงตัวของ Boltzmann, 1.38×10^{-23} จูล/เคลวิน

R = ค่าความต้านทานของวัสดุ, โอห์ม

Δf = แถบความถี่ในวงจร, เฮิรตซ์

T = ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน

รูปร่าง และส่วนประกอบที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน

ในสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับวงจร หรืออุปกรณ์อื่นใดก็ตามมักจะกำหนด หรือวัดค่าออกมาในรูปอัตราส่วนของกำลังอินพุตสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเทียบกับกำลังเอาต์พุตสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) ค่าอัตราส่วนที่ได้จะเป็นค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \frac{S_{\text{กำลังอินพุต}}/N_{\text{กำลังอินพุต}}}{S_{\text{กำลังเอาต์พุต}}/N_{\text{กำลังเอาต์พุต}}} \quad (2.13)$$

สำหรับค่าส่วนประกอบสัญญาณรบกวนวัดออกมาในหน่วยของเดซิเบล มีรูปสมการดังนี้

$$NF = 10 \log_{10} |F| \quad (2.14)$$

โดยที่ S/N เป็นอัตราส่วนระหว่างสัญญาณเสียงกับสัญญาณรบกวน

2.2 ทฤษฎีสายนำสัญญาณ

2.2.1 ความแตกต่างในการวิเคราะห์วงจรที่ใช้สัญญาณความถี่ต่ำและสูง

เมื่อพิจารณาในเรื่องความถี่ของสัญญาณที่ป้อนให้วงจรที่ความถี่ต่ำคลื่นแรงดัน และกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเหมือนกันในทุกส่วนของวงจรที่เวลาชั่วขณะหนึ่งขณะใดทำให้การพิจารณาอุปกรณ์จำพวกตัวความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำคิดเป็นอุปกรณ์กลุ่มก้อน (Lumped device) ประกอบกันเป็นวงจรขึ้นมาได้ แต่เมื่อความถี่สูงๆ ขึ้นไป การวิเคราะห์แบบอุปกรณ์กลุ่มก้อน (Analysis Based on Lumped-Parameter Assumption) ไม่สามารถนำมาอธิบายการทำงานของวงจรได้ ฉะนั้น ที่ความถี่ของสัญญาณสูงๆ จึงไม่สามารถนำตัวแปรต่างๆ (R , L , C หรือตัวแปรอื่น) มารวมกันเป็นกลุ่มก้อนอีกต่อไป ณ ความถี่ย่านไมโครเวฟ คลื่นแรงดัน และกระแสจะไม่มีผลต่อทั้งวงจรพร้อมกันที่เวลาชั่วขณะใด ขณะหนึ่งที่จุดต่างๆ ในวงจรจะมีค่าของคลื่นแรงดัน และกระแสแตกต่างกันไปที่เวลาชั่วขณะหนึ่งๆ ที่ความถี่สูง วงจรถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ คือ ตัวแปรต่างๆ ในวงจรจะรวมกลุ่มก้อนเป็นส่วนย่อยๆ ประกอบเป็นวงจรความแตกต่างในการแพร่กระจายของคลื่นที่ความถี่สูง และความถี่ต่ำ พิจารณาได้จากตัวอย่างความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ ที่ป้อนให้วงจรเดียวกัน ในขั้นแรกหาค่าความยาวคลื่นมาประกอบการพิจารณาก่อน

$$\lambda \text{ (เมตร/วินาที)} = \frac{3 \times 10^8}{f}$$

ที่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์, $f = 1 \times 10^6$ เฮิร์ตซ์ จะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1 \times 10^6} = 300 \text{ เมตร}$$

ที่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์, $f = 1 \times 10^9$ เฮิร์ตซ์ จะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1 \times 10^9} = 0.300 \text{ เมตร}$$

พิจารณาที่วงจรเดียวกันพบว่าค่าความยาวคลื่น 300 เมตร ของความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ จะยาวมาก และการพิจารณาค่าแรงดันทั้งวงจรที่เวลาขณะหนึ่งมีค่าเดียวกันตลอด ส่วนที่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ ค่าความยาวคลื่นเป็น 0.300 เมตร พบว่าค่าของแรงดันตลอดทั้งวงจรไม่เท่ากัน ณ เวลาชั่วขณะหนึ่ง ความแตกต่างของค่าแรงดันนี้ เป็นผลให้ไม่สามารถนำตัวแปรต่างๆ มารวมกลุ่มก่อนประกอบขึ้นเป็นวงจรได้ดังเช่นปรากฏที่ความถี่ต่ำๆ

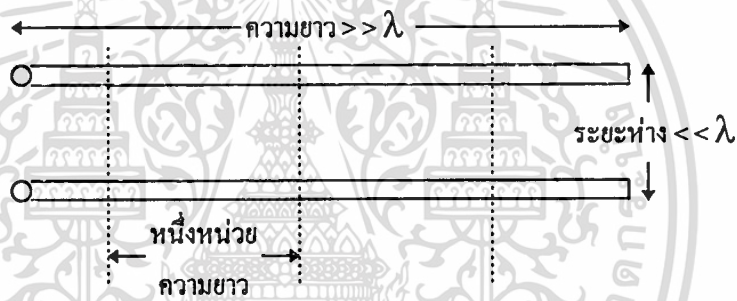
2.2.2 สายนำสัญญาณ

เพื่อทำการป้อนคลื่นแรงดัน หรือกระแสให้กับสายนำสัญญาณด้วยความถี่สูง โดยจัดให้สายนำสัญญาณแบบแท่งตัวนำขนานอยู่ใกล้กันมากๆ จนกระทั่งสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าสามารถเหนี่ยวนำแท่งตัวนำซึ่งกันและกันได้ สามารถพิจารณาสายนำสัญญาณซึ่งยาวกว่าความยาวคลื่นของสัญญาณที่ป้อนมาหลายเท่าตัวออกเป็นส่วนๆ มีชื่อเรียกว่าความยาวหนึ่งหน่วย (Unit length) ดังรูปที่ 2.4 และในความยาวหนึ่งหน่วยนี้ด้วยการป้อนสัญญาณ ความถี่สูง รูปคลื่นแรงดัน และกระแสจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ณ เวลาขณะใดขณะหนึ่งที่พิจารณา ดังนั้น ตัวความต้านทาน (R) , ตัวความเหนี่ยวนำ (L) , ตัวเก็บประจุ (C) และ ความนำไฟฟ้า (G) ในแต่ละหนึ่งหน่วยความยาวสามารถจับรวมกลุ่มก่อนกันได้

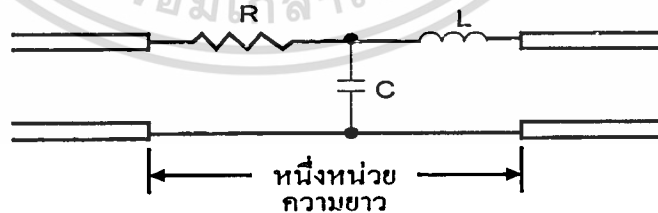
ถ้าให้ค่าความต้านทานของสายมีค่าเป็นศูนย์ และไม่มีการรั่วไหลเกิดขึ้นระหว่างแท่งตัวนำทั้งสอง จะได้สายนำสัญญาณที่ประกอบด้วยชุดตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุต่อกันไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแต่ละชุด หรือแต่ละหนึ่งหน่วยความยาวนี้จะมีค่าคงตัวของเวลา (Time constant) ที่เกิดจากค่าของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ดังนั้น ค่าของตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำนี้จะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเดินทาง หรือถ่ายเทพลังงานในสายนำสัญญาณ

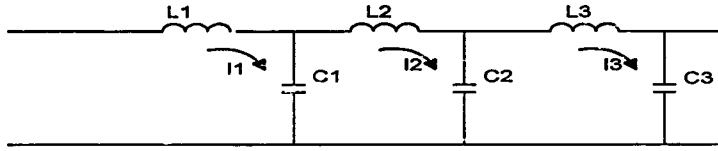
ถ้าทำการต่อแบตเตอรี่เข้ากับสายนำสัญญาณ เมื่อปิดสวิตช์จะเกิดกระแสไหลไปทำการประจุให้ตัวเก็บประจุ ใช้เวลาเท่ากับค่าคงตัวของเวลาในการประจุให้ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับแรงดันของแบตเตอรี่ และค่าคงตัวของเวลานี้จะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับค่าคงตัวของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุที่ประกอบขึ้นมา ทิศทางของกระแสจะพุ่งเข้าไปแท่งตัวนำบน และมีทิศพุ่งออกในแท่งตัวนำข้างล่าง ส่วนทิศทางการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กหาได้จากเวกเตอร์ทิศทาง



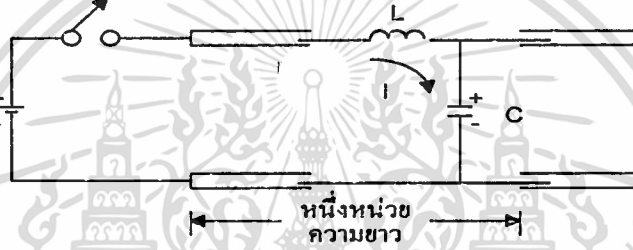
รูปที่ 2.4 สายนำสัญญาณที่แบ่งออกเป็นส่วนๆ



รูปที่ 2.5 แบบจำลองของตัวแปรแบบรวมกลุ่มก้อน



รูปที่ 2.6 การประจุของตัวเก็บประจุในแต่ละหนึ่งหน่วยความยาว



รูปที่ 2.7 การป้อนแรงดันไฟตรงให้แก่สายนำสัญญาณ

เวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นคิดต่อความยาวหนึ่งหน่วยหาได้จาก

$$T = \sqrt{LC} \quad (\text{วินาที}) \quad (2.15)$$

ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการที่คลื่นเดินทางในสายนำสัญญาณของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับค่าคาปาซิแตนซ์ และอินดักแตนซ์เท่านั้น เมื่อไม่คำนึงถึงความต้านทาน และสภาพการนำของสาย ส่วนความเร็วของคลื่นในสายหาได้จากสมการ

$$v = \frac{1}{T} \quad (\text{เมตร/วินาที}) \quad (2.16)$$

แทนค่าสมการที่ 2.15 ลงในสมการที่ 2.16 จะได้ความเร็วคลื่นต่อหนึ่งหน่วยความยาวขึ้นอยู่กับค่าอินดักแตนซ์ และคาปาซิแตนซ์

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{เมตร/วินาที}) \quad (2.17)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งใดๆ บนสายนำสัญญาณหาได้โดยใช้ค่าแรงดันรวมที่จุดนั้นหารด้วยค่ากระแสรวมที่จุดเดียวกันนั้น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางไปตามสายนำสัญญาณด้วยความเร็วที่คิดต่อหนึ่งหน่วยความยาวเท่านั้น ณ เวลาชั่วขณะนั้น ดังนั้น อิมพีแดนซ์ที่ได้จึงเป็นอิมพีแดนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณนั้น และมีค่าตามสมการ

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.18)$$

ค่าอัตราส่วนจากสูตรมีความสำคัญต่อสายนำสัญญาณไม่ว่าจะมีความยาวเพียงใดที่เวลาหนึ่งๆ คลื่นที่ผ่านจะมีผลต่อความยาวหนึ่งหน่วยเท่านั้น และแต่ละหนึ่งหน่วยความยาวสามารถคำนวณค่าความต้านทานได้จากสมการที่ 2.18 โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้ ณ ตำแหน่งใดก็ตามบนสายนำสัญญาณ เรียกว่า ค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Characteristic impedance) สัญลักษณ์ใช้แทน คือ Z_0 ดังนั้น ค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ ของสายนำสัญญาณแบบแท่งตัวนำคู่ขนานแสดงได้ด้วยสมการ

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.19)$$

สายนำสัญญาณที่ต่อปลายด้วยค่าคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ ของสายนั่นเอง

ถ้าที่ปลายสายนำสัญญาณถูกต่อด้วยตัวความต้านทานค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของตัวสายนำสัญญาณ การต่อปลายด้วยค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนั้นจะเป็นผลให้แรงดัน และกระแสเกิดขึ้นพร้อมกัน หรือตรงกัน ทำให้ไม่มีการสะท้อนกลับพลังงานของคลื่นจะเสียให้ตัวภาระในรูปของความร้อน คลื่นแรงดัน และกระแสจะปรากฏที่จุดต่อ หรือตัวความต้านทาน ซึ่งต่อปลายสายนำสัญญาณในลักษณะตรงกัน หรือมีเฟสเดียวกันตลอด

สายนำสัญญาณต่อปลายแบบปิด

ถ้าที่ปลายสายนำสัญญาณถูกลัดวงจร หรือตัวการะมีค่าเป็นศูนย์ จะให้ค่าแรงดันที่ตรงบริเวณปลายปิด หรือจุดลัดวงจรเท่ากับผลคูณของกระแส และความต้านทาน

$$\begin{aligned} V &= IR \\ &= I(0) \\ &= 0 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

จากการที่ไม่มีค่าความต้านทาน ทำให้กำลังงานคลื่นที่ป้อนเข้ามาในสายไม่มีการสูญเสีย หรือสิ้นเปลืองที่จุดปลายสายเลย คลื่นที่มากระทบจุดปลายสายจะสะท้อนกลับเพื่อทำให้ลัดวงจรปลายสายมีค่าแรงดันเท่ากับศูนย์ และจากการที่คลื่นสะท้อนกลับมีการกลับเฟสตรงข้ามกัน 180° กับคลื่นทางด้านอินพุต จึงเป็นผลให้คลื่นรวมมีค่าแรงดันเป็นศูนย์ส่วนคลื่นกระแสจะสะท้อนกลับที่ปลายปิดของสายให้คลื่นที่มีเฟสเดิม

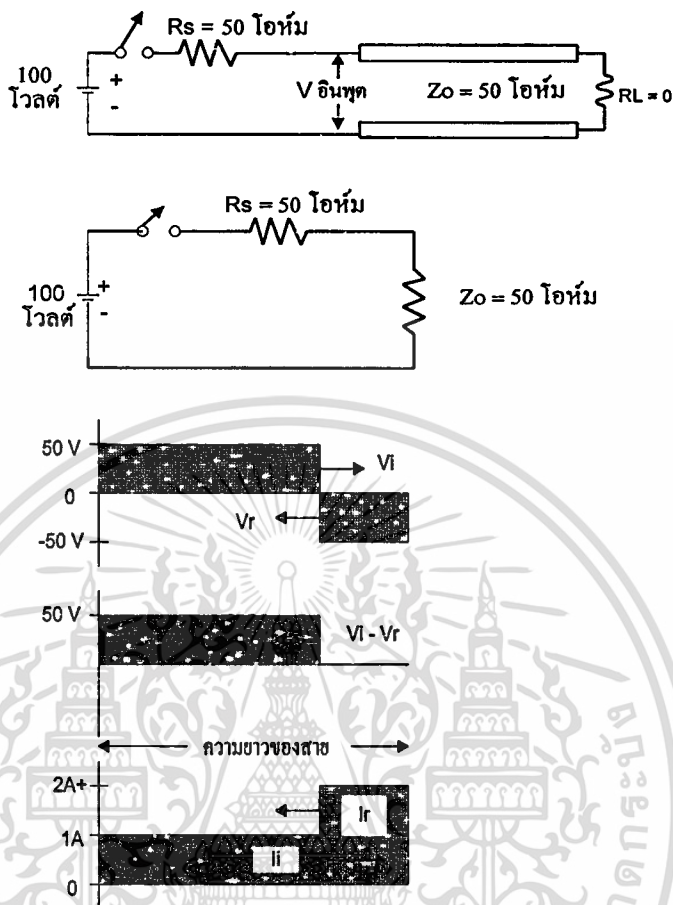
สายนำสัญญาณที่ต่อปลายแบบเปิด

กรณีปลายสายนำสัญญาณข้างหนึ่งถูกเปิดวงจรไว้ ส่งผลให้ความต้านทานที่ตำแหน่งปลายเปิดมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้น กระแสที่ตำแหน่งปลายเปิดนี้มีค่าเป็นศูนย์ คือ ไม่มีกระแสไหล แสดงว่าคลื่นกระแสสะท้อนกลับที่ตำแหน่งปลายเปิดมีเฟสตรงกันข้ามกับคลื่นกระแสที่ตกกระทบ

$$I_i - I_r = 0$$

ส่วนคลื่นแรงดันตกกระทบจะรวมเข้ากับคลื่นแรงดันสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกันได้ คลื่นแรงดันรวมเป็นสองเท่าของคลื่นตกกระทบ

$$V_i + V_r = 2V_i$$



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลรูปคลื่นแรงดัน และกระแสที่เกิดขึ้นในสาย

การสะท้อนกลับจากภาวะตัวต้านทาน

จากหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยภาระที่มีค่าของอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติทำให้เกิดการสมมูลย์ทางอิมพีแดนซ์ จึงไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณ และกำลังงานสูญเสียเป็นความร้อนที่ตัวภาระ ส่วนการต่อปลายแบบปิด (ลัดวงจร) หรือแบบเปิด (เปิดวงจร) จะเกิดการสะท้อนกลับของกำลังงานทั้งหมด

สำหรับหัวข้อนี้กล่าวถึงการต่อปลายสายด้วยภาระตัวความต้านทานซึ่งไม่ใช่ค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสาย ผลที่ได้ คือ กำลังงานจะถูกแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับตามสาย อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียที่ตัวภาระเป็นความร้อน ในส่วนกำลังงานที่สะท้อนกลับจะมีปริมาณเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน

จากสมการที่ 2.20 ถ้าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันมีค่าเป็นบวก แสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกัน แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบแรงดันสะท้อนกลับจะกลับเฟสเป็นตรงกันข้าม

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \quad (2.20)$$

เมื่อ Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

V_r = แรงดันสะท้อนกลับ, โวลต์

V_i = แรงดันตกกระทบ, โวลต์

การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของคลื่นแรงดันสะท้อนกลับได้เท่ากับ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ แรงดันสะท้อนกลับ} = \Gamma \times 100 \quad (\%) \quad (2.21)$$

กำลังงานหาได้จากแรงดันยกกำลังสองหารด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของ Z_0 .

$$P = \frac{V^2}{Z_0}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลังงาน (Power Reflection Coefficient) มีค่าเท่ากับกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

$$\Gamma^2 = \frac{P_r}{P_i} \quad (2.22)$$

เมื่อ Γ^2 = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลังงาน

P_r = กำลังงานสะท้อนกลับ, วัตต์

P_i = กำลังงานตกกระทบ, วัตต์

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ได้โดย

$$\text{เปอร์เซ็นต์กำลังงานสะท้อนกลับ} = \Gamma^2 \times 100 \quad (\%) \quad (2.23)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่างและผลรวมระหว่างตัวหารกับค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสาย

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.24)$$

โดยที่ Γ = ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

Z_L = อิมพีแดนซ์ของตัวหาร, โอห์ม

Z_0 = ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณ, โอห์ม

การสะท้อนกลับเนื่องจากการไม่สมดุลย์ของทั้งสองปลายสายนำสัญญาณ

การสะท้อนกลับที่เกิดขึ้นในสายนำสัญญาณสามารถปรากฏได้ที่ด้านทาง คือ อินพุตและปลายทางคือ เอาต์พุต การสะท้อนกลับที่ปลายสายเนื่องจากการต่อภาระแบบไม่สมดุลย์เช่นเดียวกัน ถ้าเกิดคลื่นสะท้อนกลับไปยังอินพุต และพบว่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณด้านทางเกิดความไม่สมดุลย์กับค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณแล้วทำให้เกิดการสะท้อนกลับอีกครั้ง และเป็นเช่นนี้จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลย์คลื่นนิ่ง

ด้วยคุณสมบัติเช่นเดียวกับคลื่นไฟฟ้ากระแสตรง คลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับสายนำสัญญาณจะสูญเสีย และสิ้นเปลืองพลังงานทั้งหมดเป็นความร้อนที่ตัวหาร ความต้านทาน มีค่าเท่ากับค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนั้น และเกิดการสะท้อนกลับเมื่อมีการต่อปลายแบบเปิด และแบบปิด สำหรับการใช้ค่าตัวความต้านทานอื่น ที่ไม่ใช่ค่าของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ สัญญาณคลื่นส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืน หรือสิ้นเปลืองที่ตัวหารความต้านทาน อีกส่วนหนึ่งที่เหลือจะสะท้อนกลับไปตามสาย และเนื่องจากค่าแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับจะแปรเปลี่ยนตามเวลา คลื่นรวม หรือคลื่นผลลัพธ์จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบลิขสิทธิ์ของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับนี้เรียกว่า คลื่นนิ่งด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นนิ่งเกิดจากการรวม หรือบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับ โดยมีจุดต่ออยู่กับที่ระหว่างจุดต่อทั้งหลาย ขนาดรูปคลื่นจะเปลี่ยนขึ้นไปถึงจุดสูงสุด และลดลงจนถึงจุดต่ำสุด และคลื่นนิ่งจะสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ความถี่ของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับมีค่าเท่ากันเท่านั้น

ค่าแรงดันสูงสุด V_{max} ของคลื่นนิ่งได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกัน

$$V_{max} = V_i + V_r \quad (V) \quad (2.25)$$

ค่าแรงดันต่ำสุด V_{min} ของคลื่นนิ่งได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกันข้ามกัน

$$V_{min} = V_i - V_r \quad (V) \quad (2.26)$$

อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุดเรียกว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (2.27)$$

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) แสดงในหน่วย dB จะมีชื่อว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR)

$$SWR (dB) = 20 \log (VSWR) \quad (2.28)$$

ค่าอิมพีแดนซ์สูงสุด และต่ำสุดของสายนำสัญญาณ

ค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้บนสายสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$VSWR = \frac{I_{max}}{I_{min}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสสูงสุด I_{max} มาจากกระแสตกกระทบ I_i และกระแสสะท้อนกลับ I_r ที่มีเฟสตรงกัน นำมารวมกัน ดังนั้น

$$VSWR = \frac{I_i + I_r}{I_{min}}$$

จากกฎของโอห์ม

จะได้

$$I = \frac{V}{R}$$

$$VSWR = \frac{V_i/Z_0 + V_r/Z_0}{I_{min}}$$

$$VSWR = \frac{V_i + V_r}{Z_0 I_{min}}$$

$$VSWR = \frac{V_{min}}{Z_0 I_{min}}$$

แต่ที่อิมพีแดนซ์มีค่าสูงสุดได้ จะต้องใช้ค่าแรงดันสูงสุด และค่ากระแสต่ำสุด ดังนั้น

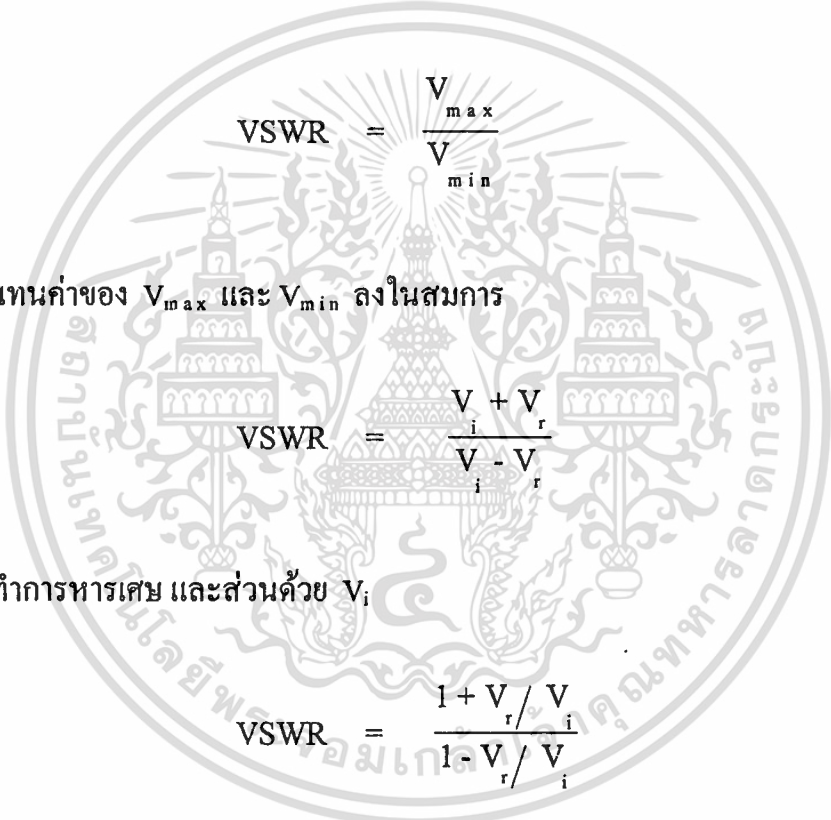
$$Z_{max} = \frac{V_{max}}{I_{min}}$$

จะได้ดังสมการที่ 2.29

$$Z_{\max} (\text{โอห์ม}) = (\text{VSWR}) Z_0 \quad (2.29)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (VSWR) และสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน สามารถคำนวณ โดยเริ่มจากสมการที่ 2.30



แทนค่าของ V_{\max} และ V_{\min} ลงในสมการ

$$\text{VSWR} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$$

$$\text{VSWR} = \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r}$$

ทำการหารเศษ และส่วนด้วย V_i

$$\text{VSWR} = \frac{1 + V_r/V_i}{1 - V_r/V_i} \quad (2.30)$$

หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

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

แทนค่าในสมการ VSWR

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่า Γ เป็น

$$\Gamma = \frac{\text{VSWR} - 1}{\text{VSWR} + 1} \quad (2.32)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (VSWR), Z_L และ Z_0 .

กรณี Z_L มากกว่า Z_0 แทนในสมการที่ 2.32

$$\text{VSWR} = \frac{1 + \frac{|Z_L - Z_0|}{Z_L + Z_0}}{1 - \frac{|Z_L - Z_0|}{Z_L + Z_0}}$$

ทำการคูณทั้งเศษและส่วนด้วย $Z_L + Z_0$

$$\text{VSWR} = \frac{Z_L + Z_0 + Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0 - Z_L + Z_0}$$

$$\text{VSWR} = \frac{2Z_L}{2Z_0}$$

$$\text{VSWR} = \frac{Z_L}{Z_0} \quad \text{เมื่อ } Z_0 < Z_L \quad (2.33)$$

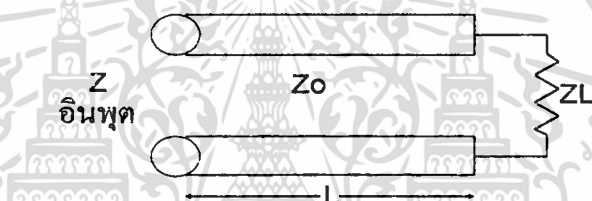
กรณี Z_L น้อยกว่า Z_0 เทอมของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจะมีค่าเป็นลบ ดังนั้น ค่า VSWR จะได้เป็นดังสมการที่ 2.34

$$\text{VSWR} = \frac{Z_0}{Z_L} \text{ เมื่อ } Z_0 > Z_L \quad (2.34)$$

2.2.3 สมการที่ใช้ในการหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์

ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณที่ระยะห่าง (L) จากค่าภาระอิมพีแดนซ์ Z_L โดยที่สายนำสัญญาณมีค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ Z_0 หาได้จากสูตร

$$Z_{\text{อินพุต}} = Z_0 \frac{Z_L + j Z_0 \tan \beta L}{Z_0 + j Z_L \tan \beta L} \quad (2.35)$$

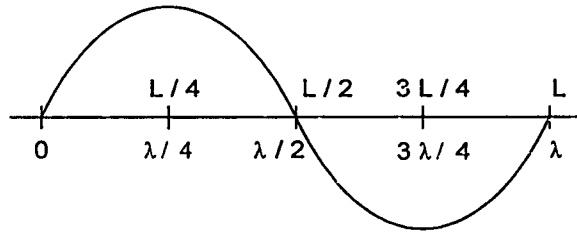


รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในสมการที่ 2.35

ค่า β ในสมการมีชื่อเรียกว่า ค่าคงตัวของเฟส (Phase constant) หรือค่าคงตัวของความยาวคลื่น (Wavelength constant) มีค่าดังนี้

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

สายนำสัญญาณนั้นวัดหน่วยความยาวเป็นเมตร หรือเป็นหน่วยของความยาวคลื่น หน่วยของความยาวคลื่นได้จากการเทียบค่า (Normalized) ความถี่ที่ใช้งานในขณะที่หน่วยเมตรนั้น ไม่มีการเทียบค่าสามารถเทียบทั้งสองวิธีได้ตามรูป



รูปที่ 2.10 หนึ่งรอบ หรือหนึ่งคาบเวลาของคลื่น โดยใช้หน่วยวัดทั้งสองแบบ

2.2.4 ลักษณะสมบัติของสายนำสัญญาณครึ่งคลื่น และหนึ่งส่วนสี่คลื่น

ความสัมพันธ์ของอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณครึ่งคลื่น ซึ่งต่อปลายสายไว้ด้วยตัวภาระที่มีค่าอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่ง

ดังนั้น

$$\beta L = \frac{2\pi}{\lambda} \left| \frac{\lambda}{2} \right|$$

$$\beta L = \pi \text{ เรเดียน}$$

$$\beta L = 180 \text{ องศา}$$

$$\tan \beta L = \tan 180^\circ$$

$$= 0$$

หาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ

$$Z_{\text{อินพุต}} = Z_0 \left(\frac{Z_L + j Z_0 \tan \beta L}{Z_0 + j Z_L \tan \beta L} \right)$$

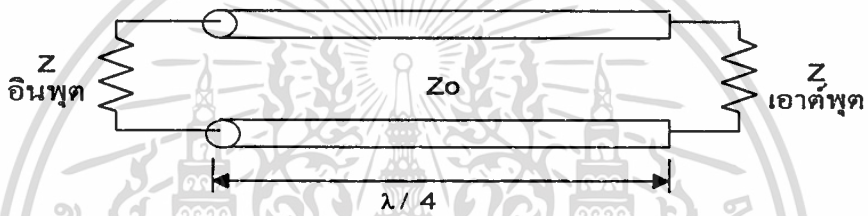
$$Z_{\text{อินพุต}} = Z_0 \left(\frac{Z_L}{Z_0} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{\text{อินพุต}} = Z_L \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.35)$$

ดังนั้น สายนำสัญญาณใดๆ ที่มีความยาวเท่ากับ $\lambda / 2$ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสาย จะมีค่าเท่ากับค่าภาระอิมพีแดนซ์ที่ปลายสาย

สายนำสัญญาณหนึ่งส่วนสี่คลื่น คุณสมบัติพิเศษที่มีประโยชน์มาก คือ ใช้ทำการปรับสมดุล (Matching) ของสายนำสัญญาณที่มีค่าคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ต่างกัน 2 สาย เข้าด้วยกัน ความสัมพันธ์ค่าอินพุต และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสายนำสัญญาณหนึ่งส่วนสี่คลื่น

สมการซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของ Z_0 , $Z_{\text{อินพุต}}$ และ $Z_{\text{เอาต์พุต}}$ สามารถหาได้ดังนี้

$$Z_{\text{อินพุต}} = Z_0 \left(\frac{Z_L + j Z_0 \tan \beta L}{Z_0 + j Z_L \tan \beta L} \right)$$

เพราะว่า $\beta L = 1.57$ เรเดียน หรือ 90 องศา ดังนั้น ได้ว่า

$$Z_{\text{อินพุต}} = Z_0 \left(\frac{Z_{\text{output}} + j Z_0 \tan 90^\circ}{Z_0 + j Z_L \tan 90^\circ} \right) \quad (2.36)$$

ทำการหารทั้งตัวเศษ และส่วนด้วย $\tan 90^\circ$

$$Z_{\text{อินพุต}} = Z_0 \left(\frac{Z_{\text{เอาต์พุต}} / \tan 90^\circ + j Z_0}{Z_0 / \tan 90^\circ + j Z_{\text{เอาต์พุต}}} \right)$$

เพราะว่า $\tan 90^\circ = \infty$ ดังนั้น จะได้

$$Z_{\text{อินพุต}} = Z_0 \left(\frac{j Z_0}{j Z_{\text{เอาต์พุต}}} \right)$$

$$Z_{\text{อินพุต}} = \frac{Z_0^2}{Z_{\text{เอาต์พุต}}} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.37)$$

เพราะว่าค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณนั้นมีค่าคงที่ ค่าอินพุต และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของสายจึงแปรผกผันกันตามสมการที่ 2.38

$$Z_{\text{อินพุต}} = \frac{\text{ค่าคงที่}}{Z_{\text{เอาต์พุต}}} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.38)$$

หากความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์คุณสมบัติกับอินพุต และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ได้โดยการแก้สมการได้ว่า

$$Z_0^2 = Z_{\text{อินพุต}} Z_{\text{เอาต์พุต}}$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_{\text{อินพุต}} Z_{\text{เอาต์พุต}}} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.39)$$

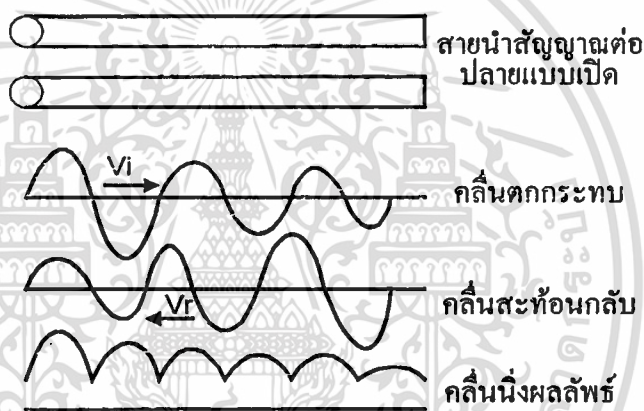
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 ความสูญเสียบนสายนำสัญญาณ

ความต้านทานของสายนำสัญญาณจะทำให้แอมพลิจูดของคลื่นแรงดัน และกระแสทั้งที่ตกกระทบ และสะท้อนกลับถูกลดทอนลงอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.12

ความสูญเสียเนื่องจากผิวของตัวนำ (Skin Effect)

เมื่อความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แท่งตัวนำเพิ่มขึ้น ความลึกของกระแสที่ผ่านที่ผิวตัวนำจะลดลง ความลึกของกระแสที่ผิวตัวนำเรียกว่า ความลึกพื้นผิวตัวนำ (Skin depth) ที่ชั้นความลึก หรือระยะความลึกจากพื้นผิวตัวนำซึ่งมีความหนาแน่นของกระแสลดลงเป็น $1/e$ ของกระแสที่พื้นผิว ($e = 2.718$) แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 การลดทอนของคลื่นแรงดันเนื่องจากความสูญเสียในสาย

$$\text{Skin - depth} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}} \quad (\text{เมตร}) \quad (2.40)$$

โดยที่ f = ความถี่, เฮิรตซ์

μ = ค่าเพอมีอะบิลิตี, เฮนรี/เมตร

γ = สภาพความเป็นตัวนำ (Conductivity), ซีเมนต์/เมตร

เพราะว่าสภาพความต้านทานเป็นส่วนกลับ หรือแปรผกผันกับสภาพความเป็นตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั่นเอง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ skin depth จะได้

$$\text{Skin depth} = \sqrt{\frac{R}{\pi f \mu}} \quad (\text{เมตร}) \quad (2.41)$$

โดยที่ f = ความถี่, เฮิรตซ์

μ = ค่าเพอมีอะบิลิตี, เฮนรี/เมตร

R = ความต้านทาน, โอห์ม/เมตร

การที่ระยะความลึกถูกลดลงที่ความถี่สูงนั้น ทำให้ความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณพื้นผิวตัวนำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.13 การลดทอนของความหนาแน่นกระแสเนื่องจากความลึกของพื้นผิว

ตารางที่ 2.6 ค่าความต้านทานของโลหะตัวนำ

โลหะตัวนำ	โอห์ม / เมตร
อลูมิเนียม	2.620×10^{-8}
ทองคำ	2.493×10^{-8}
ทองแดง	1.724×10^{-8}
เงิน	1.620×10^{-8}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้งานสามารถลดผลจากความสูญเสียเนื่องจากผิวของตัวนำ ได้ด้วยการชุบหรือเคลือบผิวด้วยโลหะ ซึ่งมีค่าความต้านทานต่ำ และมีราคาสูง วิธีการนี้นิยมใช้กันในอุปกรณ์ หรือเครื่องมือใช้งานที่ความถี่สูง เช่น การฉาบผิวด้านในของท่อนำคลื่นด้วยทอง หรือเงินเพื่อลดความต้านทานที่ผิวตัวนำ เป็นต้น

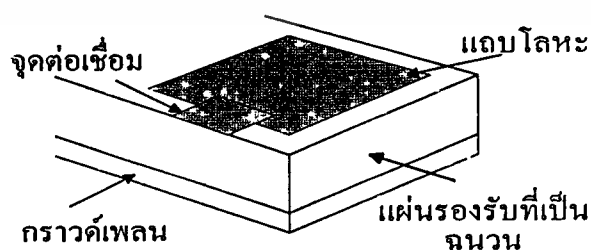
2.3 โครงสร้างของไมโครสตริป

ไมโครสตริปทั่วไปมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.14 โครงสร้างมีรูปร่างเป็นสตริป หรือแถบโลหะแคบๆ อยู่บนแผ่นรองรับ (substrate) เป็นสารที่เป็นฉนวน และด้านล่างของแผ่นรองรับเป็นผิวโลหะ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในแผ่นรองรับบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบโลหะแคบๆ กับผิวโลหะด้านล่างความหนาของแผ่นรองรับมีค่า 2 มิลลิเมตร หรือต่ำกว่าลงมา ความกว้างของสตริปจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ต้องการความหนาของตัวไมโครสตริปมีค่าประมาณ 5 ไมคอนเมตร หรือ 10 ไมคอนเมตร สำหรับแผ่นรองรับชนิดต่างๆ และลักษณะที่สำคัญของแผ่นรองรับได้แก่ ค่าคงตัวสัมพัทธ์ของฉนวน ค่า $\tan \delta$ ที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ ค่าคงตัวของสารการนำความร้อน (Thermal conductivity) ความขรุขระของผิว และความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength) ความหมายของคุณสมบัติที่กล่าวมา คือ ค่าคงตัวสัมพัทธ์ของฉนวนบ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นฉนวนโดยเทียบกับสูญญากาศ ค่านี้ส่งผลให้อิมพีแดนซ์คุณลักษณะสมบัติของไมโครสตริปเปลี่ยนแปลงค่า $\tan \delta$ นั้น คือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสขับเคลื่อน เมื่อนำสารที่เป็นฉนวนไปคั่นระหว่างแผ่นโลหะคู่หนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นคาปาซิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เมื่อเขียน $\epsilon = \epsilon' - j\sigma/\omega$ ค่า $\tan \delta$ ก็จะเท่ากับ $\sigma/\omega\epsilon'$ ค่านี้แสดงให้เห็นว่าสารที่เป็นฉนวนนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสมากน้อยเพียงใด โดยค่าต่ำจะดี ค่าคงตัวของการนำความร้อนนั้นแสดงให้เห็นว่าสารที่เป็นฉนวนมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ค่าสูงจะดี ความขรุขระของพื้นผิว จัดว่ามีความสำคัญมาก เพราะว่าถ้าผิวขรุขระเกินไปจะทำให้การใช้เทคโนโลยีแบบฟิล์มบางทำได้ยาก นอกจากนั้นจะมีผลกระทบต่อ การส่งผ่านของคลื่นไปตามไมโครสตริปด้วย เพราะฉะนั้น ความขรุขระน้อยจะดีกว่า สำหรับความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า จะบ่งบอกถึงความสามารถในการรับกำลังคลื่น ดังนั้น ค่าสูงดีกว่าค่าต่ำ

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติต่างๆ ของแผ่นรองรับ ตามตารางที่ 2.7 จะเห็นได้ว่า แผ่นรองรับแบบอลูมิเนียมมีคุณสมบัติในหลายๆ ข้อ ถึงแม้จะมีความขรุขระไม่ต่ำมากนัก ดังนั้น อลูมิเนียมจึงเป็นแผ่นรองรับที่ใช้กันมาก

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของแผ่นรองรับแบบต่าง ๆ

วัสดุ	ค่าคงตัวฉนวน สัมพัทธ์ ϵ_r	$\tan \sigma$ ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์	ค่าคงตัวของ การนำ ความร้อน วัตต์/ม ² /องศา เซลเซียส	ความขรุขระ ของผิว (ไมคอน เมตร)	ความสามารถ ในการทนต่อ แรงดันไฟฟ้า (กิโลโวลต์/ ชม.)	
อลูมินา (alumina)	99.5 %	10	$1 \sim 2 \times 10^{-4}$	0.3	2-8	4×10^3
	96 %	9	6×10^{-4}	0.28	20	4×10^3
แซฟไฟร์ (sapphire)	9.4 และ 11.6 (ผลึกเดี่ยว)		1×10^{-4}	0.40	1	4×10^3
แก้ว	5		20×10^{-4}	0.01	1	0
ควอตซ์	3.8		1×10^{-4}	0.01	1	10×10^3
GaAs	13		6×10^{-4}	0.30	1	350



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ค่า ϵ_r และ $\sigma/\omega\epsilon$ ของสารชนิดต่างๆ

สาร หรือวัสดุ	ϵ_r	$\sigma/\omega\epsilon$
Air	1.0005	0
Alcohol,ethyl	25	0.1
Aluminum oxide	8.8	0.0006
Amber	2.7	0.002
Bakelite	4.74	0.022
Barium titanate	1200	0.013
Carbon dioxide	1.001	0
Ferrite (NiZn)	12.4	0.00025
Germanium	16	0
Glass	4-7	0.002
Ice	4.2	0.05
Mica	5.4	0.0006
Neoprene	6.6	0.011
Nylon	3.5	0.02
Peper	3	0.008
Plexiglas	3.45	0.03
Polyethylene	2.26	0.0002
PolyPropylene	2.25	0.0003
Polystyrene	2.56	0.00005
Porcelain (dry process)	6	0.014
Pyranol	4.4	0.0005
Pyrex glass	4	0.0006
Quartz (Fused)	3.8	0.00075
Rubber	2.5-3	0.002
Silica or SiO ₂ (Fused)	3.8	0.00075

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 (ต่อ) ค่า ϵ_r และ $\sigma / \omega \epsilon$ ของสารชนิดต่างๆ

สาร หรือวัสดุ	ϵ_r	$\sigma / \omega \epsilon$
Silicon	11.8	0
Snow	3.3	0.05
Sodium chloride	5.9	0.0001
Soil (dry)	2.8	0.05
Steatite	5.8	0.003
Styrofoam	1.03	0.0001
Teflon	2.1	0.0003
Titanium dioxide	100	0.0015
Water (distilled)	80	0.04
Water (sea)	0	4
Water (dehydrated)	1	0
Wood (dry)	1.5-4	0.01

ส่วนตารางที่ 2.8 แสดงค่า ϵ_r และค่าของ $\sigma / \omega \epsilon$ ของสารชนิดต่างๆ ที่จะสามารถนำมาเป็นฉนวนได้ตามความเหมาะสม

2.3.1 วงจรสมมูลย์ทางกายภาพ

ทฤษฎีสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ไมโครสตริปมีมากมายหลายระดับ ทั้งด้านความถูกต้องแม่นยำ และความซับซ้อนที่แตกต่างกันออกไป ในทฤษฎีเหล่านี้ วงจรสมมูลย์ทางกายภาพที่เหมาะสม และดีที่สุด มี 2 แบบ คือ

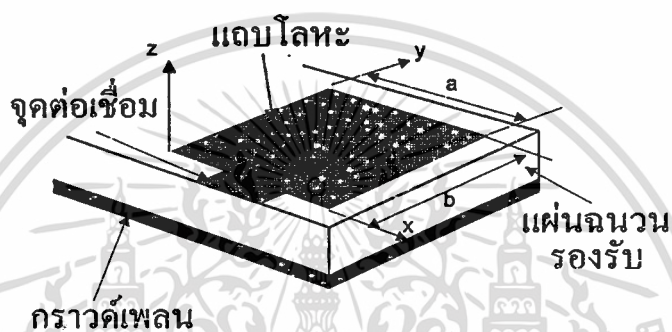
1. วงจรสมมูลย์สายส่ง (Transmission line model)
2. วงจรสมมูลย์ท่อนำคลื่น (Cavity model)

วงจรสมมูลย์สายส่ง

ส่วนของแถบโลหะในรูปที่ 2.15 สามารถมองเห็นรูปแบบอย่างกว้างๆ ความหมายของสายส่งไมโครสตริปความยาว L บริเวณระหว่างขอบของแถบโลหะ (Patch) และกราวด์เพลน

(Ground plane) ที่ปลายสุดทั้งสองด้านของสายสามารถมองเห็นช่องของการแพร่กระจายคลื่นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

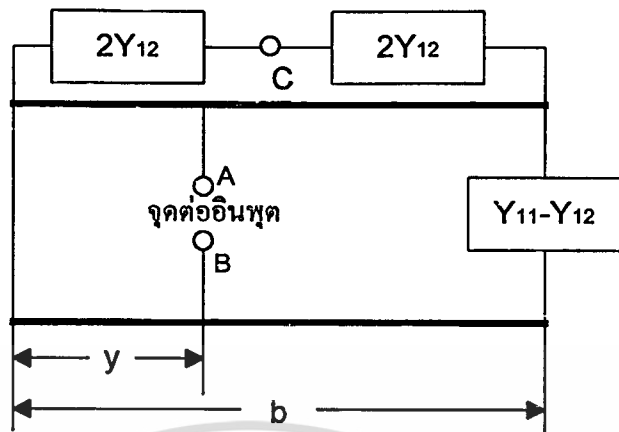
ซึ่งคล้ายสายอากาศแบบร่อง (Slot antennas) ดังนั้น สายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำสามารถส่งผ่านกำลังงานไปสู่โหลดที่ปลายสุดทั้งสองด้าน เปรียบเสมือนเปิดวงจรอยู่ (Open circuit) แต่ความจริงไม่ได้เป็นการเปิดวงจร (Not open circuit) เพราะเรามองเห็นเป็นภาวะที่มีอิมพีแดนซ์สูงต่ออยู่ทำให้เกิดการส่งผ่านสัญญาณระหว่างร่อง หรือช่อง (Slot) ทั้งสอง แรงดันและกระแสที่ขั้วบนสายส่งสามารถผ่านการต่อเชื่อม (Coupled) ผ่านวงจรเชื่อมต่อแบบสองทิศทาง (Two-Port Network)



รูปที่ 2.15 สายอากาศไมโครสตริบแบบสี่เหลี่ยม

ถ้าตัวแปรของวงจรเชื่อมต่อสองทิศทาง คือ Y_{11} และ Y_{12} ลัดวงจร (Short circuit) แล้ว วงจรสมมูลแบบไพร์ (Pi : π model) ของวงจรข่าย สามารถใช้กับสายอากาศไมโครสตริบ แสดงดังรูป 2.16 (ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ของตัวภาวะ คือ $Y_{11} = G_{11} + jB_{11}$ ค่าซัสเซปแตนซ์ B_{11} สามารถอธิบายการขยายความยาว b ของสายส่ง ซึ่งจะถูกรำกักทางกายภาพโดยผิวข้องแถบโลหะ

$$\Delta L = 0.412t \frac{(\epsilon_{eff} + 0.33) (a/b + 0.262)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) (a/b + 0.813)} \quad (2.42)$$



(ก) แผนผังแบบร่างสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม



(ข) ตัวอย่างวงจร สำหรับ โหมดสมมูล



(ค) ตัวอย่างวงจร สำหรับ โหมดที่ไม่สมมูล

รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลสายส่ง

ค่า ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวประสิทธิภาพของฉนวน และค่าคงตัวประสิทธิภาพของวัสดุฐานรองรับฉนวนจะเป็นดังนี้

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2 (1 + 10t/\omega)^{1/2}} \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถประมาณค่าความนำของตัวเอง (Self conductance) G_{11} ได้เป็น

$$G_{11} = \frac{a}{120\lambda_0} \left(1 - \frac{\pi^2}{6} \left(\frac{t}{\lambda_0} \right) \right) \quad (2.44)$$

จากสมการข้างต้นเป็นสมการที่แสดงถึงการหาค่าความนำพื้นฐานของสายอากาศแบบร่องความยาวอนันต์ ซึ่งสามารถประยุกต์โดยใช้ความถี่ของร่อง หรือช่องทั้งสอง คือ สายอากาศไมโครสตริป สำหรับค่าความนำสามารถหาได้นอกเหนือจากสมการด้านบน เป็นดังนี้

$$G_{11} = \begin{cases} (a_{\text{eff}})^2 (90\lambda_0) & ; a_{\text{eff}} < 0.35\lambda_0 \\ \frac{w_{\text{eff}}}{120\lambda_0} - 1/(60\pi^2) & ; 0.35\lambda_0 < a_{\text{eff}} < 2\lambda_0 \\ \frac{w_{\text{eff}}}{120\lambda_0} & ; 2\lambda_0 < a_{\text{eff}} \end{cases} \quad (2.45)$$

ความกว้างประสิทธิผล (effective wide) ของสายไมโครสตริป คือ

$$a_{\text{eff}} = \frac{120\pi t}{Z_m \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (2.46)$$

โดยที่

$$Z_m = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \left(\frac{a}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} + 0.411 + \frac{1.451}{\pi} + \ln\left(\frac{a}{2t}\right) + 0.94 \right)^{-1} \quad (2.47)$$

ค่าความนำร่วม (Mutual conductance) G_{12} สามารถหาได้โดยการอินทิเกรต

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi} \int_0^\pi \sin^2 \left[\frac{(\pi a_{\text{eff}} \cos \theta) / \lambda_0}{\cos^2 \theta} \right] \sin^3 \theta j_0 \left(\left[\frac{2\pi b \sin \theta}{\lambda_0} \right] \right) d\theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่ง j_0 คือ เบสเซลฟังก์ชัน (Bessel function) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าชั้บเซพแต่นซ์ร่วม โดยทั่วไปไม่ต้องนำมาคำนวณ เพราะว่ามีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เพียงเล็กน้อย

วงจรมูลยข์ของท่อนาคล้ัน

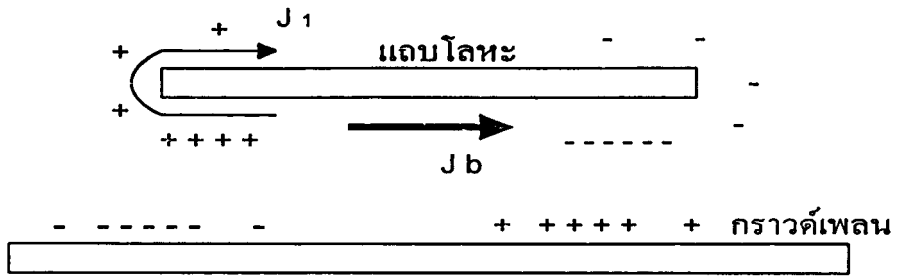
เมื่อกระแสอสซิลเลตถูกป้อนเข้าสู่อุปกรณ์ไมโครสตริป ประจุจะกระจัดกระจาย และเกิดขึ้นบนผิวของกราวด์เพลน และพื้นผิวด้านบน และด้านล่างของแถบโลหะ (Patch) แสดงดังรูป 2.17 (ก) ซึ่งรูปร่างของประจุจะกระจัดกระจายเป็นสองรูปแบบ คือ

1. ประจุต่างชนิดกันจะตั้งจุดกันระหว่างด้านล่างของแถบโลหะ และบนกราวด์เพลน แรงดึงดูดนี้จะส่งผลให้ประจุเข้ามารวมกันตรงส่วนด้านล่างของแถบโลหะ

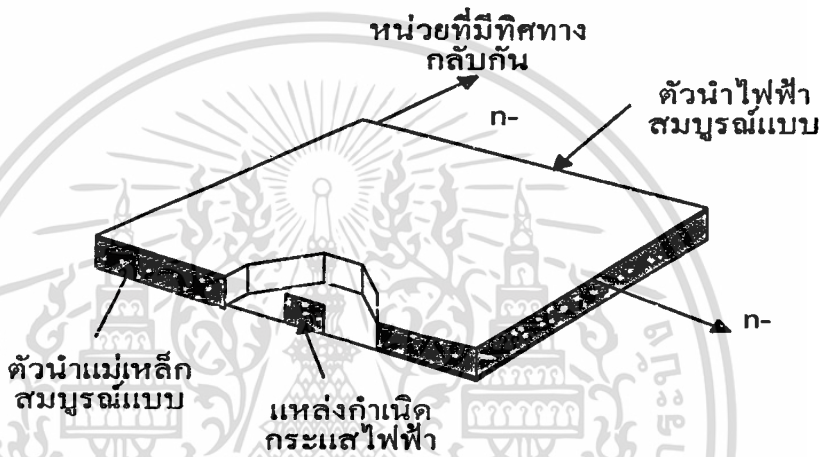
2. เกิดการผลัดกันระหว่างประจุชนิดเดียวกันที่ด้านล่างของแถบโลหะ การผลัดกันนี้ส่งผลให้ประจุที่อยู่ตรงขอบด้านข้างแถบโลหะขึ้นไปอยู่บนพื้นผิวด้านบนของแถบโลหะ เมื่ออุปกรณ์บางมาก ประจุทั้งหมดบนแถบโลหะจะอยู่ที่แถบด้านล่างของแถบโลหะเหมือนกระแสส่วนมากจะไหลที่ด้านล่างของแผ่นโลหะมีจำนวนน้อยที่จะไหลรอบขอบด้านข้างขึ้นสู่ผิวด้านบนผลที่ตามมา คือ ส่วนประกบของสนามแม่เหล็กจะสัมผัสกับขอบของแถบโลหะน้อยเกือบจะเป็นศูนย์

ในระนาบระหว่างขอบของแถบโลหะ และกราวด์เพลน โดยปราศจากผลกระทบจากสนามภายในแถบโลหะ สามารถแทนสายอากาศ โดยแสดงดังในรูป 2.17 (ก) ด้วยเหตุผลนี้จากการกระจัดกระจายของสนามแม่เหล็ก รูปร่างของการกระจัดกระจายของสนามไฟฟ้าหาได้เหมือนกัน ความแตกต่างระหว่างขนาดรูปร่างของสนามภายใต้แถบโลหะ ไม่สามารถหาได้โดยใช้การวิเคราะห์ท่อนาคล้ัน (Cavity) เพียงอย่างเดียว สำหรับตัวอย่าง ถ้าวัสดุที่เป็นฉนวนและส่วนของแถบโลหะภายในท่อนาคล้ัน สมมติให้มีการสูญเสียเพียงเล็กน้อย

การวิเคราะห์ท่อนาคล้ัน คือ จะให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็นรีแอคตีฟบริสุทธิ์ (Purely reactive) อินพุตอิมพีแดนซ์ของการตอบสนองของสายอากาศไมโครสตริป ด้วยเหตุนี้ จึงไม่เป็นรีแอคตีฟที่บริสุทธิ์จะมีส่วนของค่าความต้านทาน สำหรับการแพร่กระจายกำลังด้วยสายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์เหมือนกับชิ้นส่วนจริงของท่อนาคล้ันในอุดมคติเท่านั้น ฟังก์ชันสำหรับการตอบสนองของสายอากาศมีโพลเชิงซ้อน (Complex poles) ส่วนจินตภาพของโพล (Poles) ในการแพร่กระจายของคลื่น และโพลของสายอากาศของคลื่นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของการกระจัดกระจายสนามใหม่ และผลที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นเหมือนกับอุปกรณ์ที่มีขนาดบางๆ



(ก) การกระจายของประจุ ด้านบน ด้านล่าง และบนกราวด์เพลน



(ข) รูปแบบสายอากาศไมโครสตริปที่ใกล้เคียงวงจรมูลย์ท่อนำคลื่น

รูปที่ 2.17 วงจรมูลย์ท่อนำคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

การทำท่อนจะเปรียบเสมือนสายอากาศ คือ สมมติแบบจำลอง หรือวงจรมูลย์ท่อน ซึ่งสามารถเพิ่มการสูญเสียด้วยท่อนวนที่เป็นโพรง โดยการปรับ การสัมผัสการสูญเสีย (Loss tangent) ของท่อนวน (Cavity dielectric) ส่วนจินตภาพของโพลของท่อนที่เต็มไปด้วยการสูญเสียที่เป็นฉนวนที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ถ้าจะหาว่าการสูญเสียมากเท่าไร ต้องเพิ่มท่อนที่เป็นโพรง ดังนั้น ส่วนจินตภาพของโพลจะใกล้ความถี่สมมูล (Match) ที่ต้องการ ของการตอบสนองของสายอากาศ

ถ้าภายในท่อนที่เป็นฉนวน ซึ่งฉนวนนี้จะมี ค่าสัมผัสการสูญเสียของฉนวน (Dielectric Loss Tangent) δ_{eff} ที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะมีตัวประกอบ Q เกี่ยวข้องอยู่ด้วย

$$Q = \frac{2p f \text{ พลังงานเฉลี่ยสะสม (Average total stored energy)}}{\text{กำลังงานสูญเสียเฉลี่ย (Average power dissipated)}} \quad (2.48)$$

$$Q = \frac{1}{2} \frac{\omega_{re}}{\omega_{im}} = \frac{1}{\delta_{eff}}$$

โดย ω_{re} และ ω_{im} คือ ส่วนจริง และส่วนจินตภาพของโพลตามลำดับ ในการเลือกสัมพัทธ์การสูญเสียของท่อที่เป็นฉนวน δ_{eff} การที่จะทำท่อ (Cavity) ให้คล้ายสายอากาศจะต้องทำให้ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) ให้มีค่าใกล้เคียงกับตัวสายอากาศ

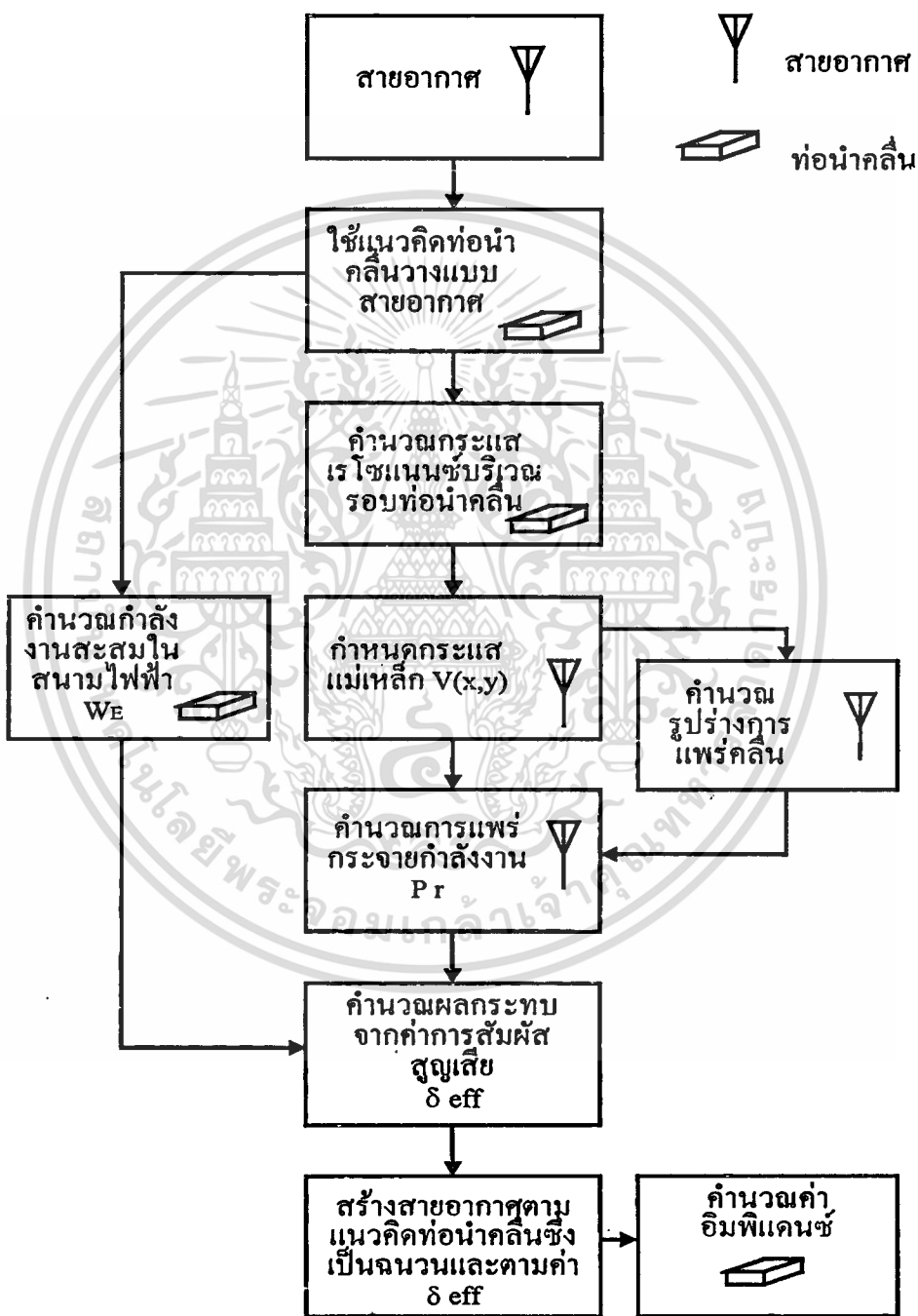
โดยทั่วไปแถบโลหะตอบสนองท่อที่มีการแยกทางเรขาคณิตเพิ่มเติมในการวิเคราะห์อย่างง่าย ในการวิเคราะห์ จะมีรูปร่างแผนผังการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งเป็นรายละเอียดในการวิเคราะห์เป็นขั้นตอนในการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรมฟอร์แทรน (Fortran) และโปรแกรมเบสิก รูปแบบของสายอากาศจะประกอบไปด้วย สายอากาศแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular) จานทรงกลม (Circular - disk) ส่วนทรงกลม (Circular - sector) รูปร่างแหวน (Annular) และส่วนของวงแหวน (Annular - sector)

สำหรับตัวอย่างรูปแบบโครงสร้างสายอากาศแบบต่างๆ ที่นิยมใช้กัน แสดงให้เห็นดังในรูปที่ 2.19 โดยจะประกอบไปด้วยรูปแบบสี่เหลี่ยม, รูปร่างกลม, รูปเพชร, รูปสามเหลี่ยม และรูปสี่เหลี่ยมหลายรูปต่อพร้อมกัน

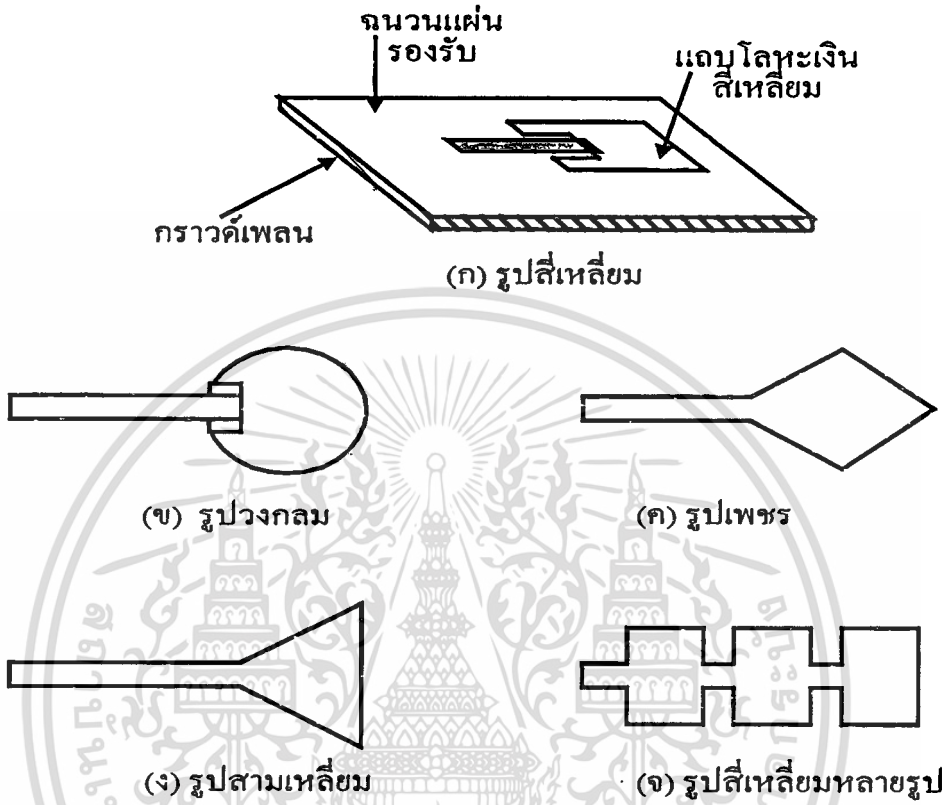
2.3.2 การส่งผ่านของคลื่นไมโครสตริป

ไมโครสตริปแม้จะมีโครงสร้างง่ายๆ ดังกล่าวข้างต้น แต่การวิเคราะห์คุณสมบัติของไมโครสตริปโดยละเอียดทางทฤษฎีนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมาก ทั้งนี้ ก็เป็นเพราะระบบแกนประสานที่ใช้ และเงื่อนไขขอบเขตของระบบค่อนข้างยุ่งยากเมื่อเทียบกับท่อนำคลื่น หรือสายนำสัญญาณชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ได้มีการศึกษาทางทฤษฎี และพบว่าคลื่นที่ส่งผ่านไป ตามไมโครสตริปจะใกล้เคียงกับลักษณะ TEM มาก แต่จะไม่ใช่ TEM เสียทีเดียว เพราะมีสนามในแนวแกนอยู่ด้วย เรียกลักษณะดังกล่าวว่า ลักษณะกึ่ง TEM (quasi-TEM) รูปที่ 2.20 แสดงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริป การที่มีสนามในแนวแกนอยู่เป็น

เพราะโครงสร้างที่มีฉนวน และอากาศอยู่ในระบบเดียวกัน และในสภาพที่มีสนามในแนวแกนเกิดขึ้นนี้ ลักษณะที่ส่งผ่านอยู่นั้นจะเป็นลักษณะแบบผสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2.18 ขั้นตอนในการออกแบบสายอากาศโดยใช้วงจรสมมูลย์ท่อนำคลื่น ด้านการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 รูปแบบโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ

การที่คลื่นส่งผ่านในลักษณะกึ่ง TEM ซึ่งคล้ายเป็นลักษณะแบบ TEM ทำให้สามารถใช้หลักการวงจรกระจาย ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของไมโครสตริปได้ กล่าวคือ ถ้าสามารถหาค่าอินดักแตนซ์ และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ จะนำค่าทั้งสองไปคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติได้ อย่างไรก็ตาม การหาค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของไมโครสตริปจะยุ่งยากกว่าของสายคู่ขนาน หรือสายโคแอกเชียล เพราะว่ามีไมโครสตริปมีทั้งสารที่เป็นฉนวน และอากาศอยู่ในบริเวณที่พลังงานของคลื่นส่งผ่าน สำหรับการหาค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวนั้นจะไม่ถูกรบกวนจากการที่มีสารที่เป็นฉนวน

การหาค่าคาปาซิแตนซ์จะยุ่งยากกว่าปกติ แต่มีวิธีที่ทำให้ง่ายขึ้น โดยใช้วิธีหาค่าคงตัวของฉนวนสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant : ϵ_{eff}) ของระบบ ซึ่งจะรวมผลของสารที่เป็นฉนวน และอากาศเข้าด้วยกัน และเนื่องจากสารที่เป็นฉนวนทั้งหมดมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ หรือมีการแพร่กระจายเชิงวัสดุ ดังนั้น ϵ_{eff} ที่ทำได้จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ ห้ามเผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ใดๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาทางทฤษฎี และการทดลอง พบว่า ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 2 กิกะเฮิรตซ์ ลงมา ค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีของ ไฟฟ้าสถิตได้ สำหรับช่วงความถี่ที่สูงกว่า 2 กิกะเฮิรตซ์ ต้องคำนึงถึงค่าการแพร่กระจาย โดยการปรับแต่งค่า ϵ_{eff} ให้เหมาะสมกับความถี่ใช้งาน



รูปที่ 2.20 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริป

ในการหาค่า ϵ_{eff} ของกรณีไฟฟ้าสถิตนั้นจะใช้แนวคิดของวงจรกระจาย เมื่อคลื่นส่ง ผ่านไปในไมโครสตริปเป็นลักษณะแบบ TEM อิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติ Z_c จะเขียนในรูป ของค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว L และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหน่วยความยาว C ได้ใน สมการที่ 2.49

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.49)$$

ในขณะเดียวกัน ความเร็วเฟส v_p จะเขียนได้ ดังนี้

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.50)$$

จากสมการที่ 2.50 นี้ทำให้เขียน Z_c ในรูปของ v_p กับ L หรือ C ได้ ดังนี้

$$Z_c = v_p L = \frac{1}{v_p C} \quad (2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นต่อไปจะพิจารณากรณีแผ่นรองรับที่เป็นฉนวนถูกดึงออกไปเหลือแต่อากาศเพียงอย่างเดียวที่ครอบคลุมไมโครสตริปอยู่ ค่าความเร็วเฟสของคลื่น TEM ที่ส่งผ่านอยู่จะเท่ากับความเร็วแสง และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะเปลี่ยนไป ค่าอินดักแตนซ์จะไม่ถูกระทบ ซึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่าง C_0 กับความเร็วเฟสในสมการที่ 2.52 คือ

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} \quad (2.52)$$

ในขณะเดียวกันค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติก็จะเขียนได้ ดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2.53)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.52 ทหารด้วยสมการที่ 2.50 จะได้ผลดังนี้

$$\frac{C}{C_0} = \left(\frac{c}{v_p}\right)^2 \quad (2.54)$$

ค่า c / c_0 นี้ตามนิยามโดยทั่วไป คือ ค่าคงตัวฉนวนสัมพัทธ์ที่ครอบคลุมระบบเก็บประจุอยู่ ในกรณีนี้พิจารณาอยู่ ค่านี้เปรียบเสมือนค่าคงตัวฉนวนสัมพัทธ์ประสิทธิผลของไมโครสตริป ที่มีแผ่นรองรับเป็นฉนวน และด้านบนเป็นอากาศอยู่ จะได้ตามสมการที่ 2.55

$$\epsilon_{\text{eff}} = \left(\frac{c}{v_p}\right)^2 \quad (2.55)$$

จากสมการที่ 2.51 ถึงสมการที่ 2.55 จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง Z_c, Z_0 และ ϵ_{eff} ได้ดังนี้

$$Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad \text{หรือ} \quad Z_0 = Z_c \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \quad \text{หรือ} \quad \epsilon_{\text{eff}} = \left(\frac{Z_0}{Z_c}\right)^2 \quad (2.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลที่ได้นี้จะเห็นได้ว่า ถ้าสามารถทราบค่า ϵ_{eff} ได้ทำให้สามารถคำนวณคุณสมบัติอื่นตามมาได้ อย่างไรก็ตาม ค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงตามความกว้างของไมโครสตริป เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของแผ่นรองรับ ซึ่งสามารถเห็นได้โดยพิจารณากรณีสุคๆ 2 กรณี ดังต่อไปนี้ กรณีแรก คือ กรณีที่ $w/h \gg 1$ แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 (ก) ในกรณีนี้เนื่องจากเส้นแรงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณที่มีแถบสตริป หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านอยู่ในบริเวณดังกล่าวเกือบทั้งหมด สภาพดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าคงตัวจนวนสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ค่า ϵ_r ของแผ่นรองรับ หรือ $\epsilon_{\text{eff}} \rightarrow \epsilon_r$ สำหรับกรณีสุคๆ กรณีที่สองคือ กรณีที่ $w/h \ll 1$ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.21 (ข)

ในกรณีนี้ เส้นแรงจะผ่านแผ่นรองรับครึ่งหนึ่ง และผ่านอากาศครึ่งหนึ่ง ซึ่งทำให้ค่าคงตัวจนวนสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ $(\epsilon_r + 1)/2$ จากที่อธิบายมาจะเห็นว่าค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงตามค่า w/h และจะมีขอบบน และขอบล่างตามค่าที่ได้จากกรณีสุคๆ ดังสมการที่ 2.56

$$\frac{1}{2} (\epsilon_r + 1) \leq \epsilon_{\text{eff}} \leq \epsilon_r \quad (2.57)$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณ และการออกแบบ ได้มีการเขียนค่า ϵ_{eff} ในรูปสมการต่อไปนี้

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 + q(\epsilon_r - 1); \quad \frac{1}{2} \leq q \leq 1 \quad (2.58)$$

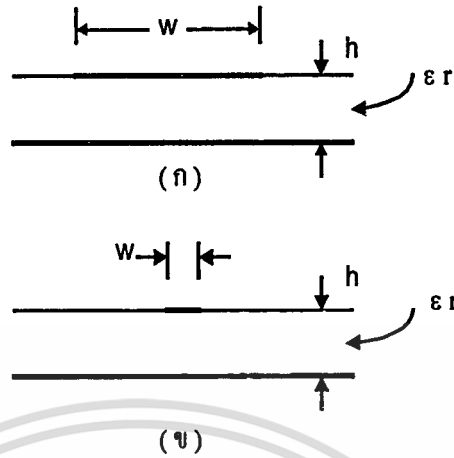
ค่า q ในสมการที่ 2.58 เรียกว่า ตัวกรองย่อย (Filtering factor) หมายถึง ตัวประกอบที่แสดงให้รู้ว่าแผ่นรองรับที่เป็นสารที่เป็นฉนวน จะมีผลต่อโครงสร้างไมโครสตริปมากน้อยแค่ไหน เมื่อเขียนค่า ϵ_{eff} ตามสมการที่ 2.58 นี้ ค่า q จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามค่า w/h

ในกรณีที่ความถี่ใช้งานสูงขึ้นกว่า 2 กิกะเฮิรตซ์ นั้น การแพร่กระจายเชิงวัสดุของแผ่นรองรับมีผลมาก การคำนึงถึงผลกระทบของการแพร่กระจายในส่วนนี้จะทำโดยพิจารณาว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปด้วย ซึ่งทำให้ค่า ϵ_{eff} ตามสมการที่ 2.58 เขียนได้ดังนี้

$$\epsilon_{\text{eff}}(f) = \left(\frac{c}{v_p(f)} \right)^2 \quad (2.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

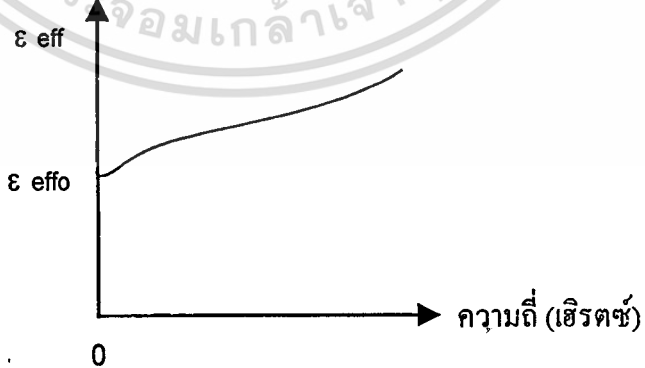
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 ไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$ และ $w/h \ll 1$

เมื่อพิจารณาค่า $\epsilon_{eff}(f)$ ตามสมการที่ 2.59 จะพบว่าในช่วงความถี่ต่ำที่ความถี่เข้าใกล้ ศูนย์นั้น ค่า ϵ_{eff} ของกรณีไฟฟ้าสถิต และเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นเข้าหา ∞ ค่า $\epsilon_{eff}(f)$ ก็จะลู่เข้าหา ค่า ϵ_r ของแผ่นรองรับ เพราะความเร็วเฟสจะลู่เข้าหาความเร็วของแสงในสารฉนวนที่เป็น แผ่นรองรับ ดังนั้น โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงของค่า $\epsilon_{eff}(f)$ ตามความถี่จะเป็นดังที่แสดงไว้ ในรูปที่ 2.22 ซึ่งค่า $\epsilon_{eff}(f)$ จะสูงขึ้นตามความถี่

ค่าฉนวนสัมพัทธ์ประสิทธิผล (ฟารัดต่อเมตร)



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าฉนวนสัมพัทธ์ประสิทธิผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

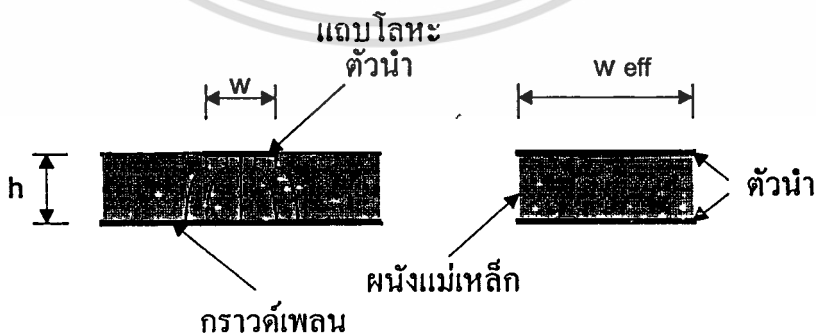
2.3.3 การลดทอนกำลังสัญญาณของไมโครสตริป

เนื่องจากไมโครสตริปทำด้วยโลหะที่ไม่สมบูรณ์แบบ และมีสารที่เป็นฉนวนกั้นในบริเวณที่คลื่นส่งผ่าน ดังนั้น การลดทอนสัญญาณจึงเกิดจากทั้งสองสาเหตุนี้ สามารถเขียนค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณได้ตามสมการที่ 2.60

$$\alpha = \frac{R}{2Z_c} + \frac{GZ_c}{2} = \alpha_m + \alpha_d \quad (2.60)$$

โดยที่ α_m และ α_d เป็นค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากโลหะ และสารที่เป็นฉนวนตามลำดับ การหาค่า α_m โดยการวิเคราะห์ให้ละเอียดตามทฤษฎีจะทำได้ลำบาก เพราะการกระจายของสนามแม่เหล็กบนผิวโลหะมีความซับซ้อนมาก และจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า w/h และความหนาของแถบสตริป (t) ด้วย ในทางปฏิบัตินั้นจะวิธีคิดที่ง่ายขึ้น โดยสมมติให้คลื่น TEM ส่งผ่านอยู่ภายในบริเวณข้างใต้แถบสตริปเท่านั้น ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.23 เสร็จแล้วคำนวณการสูญเสียในเนื้อโลหะในสภาพดังกล่าว แล้วจึงนำผลที่ได้นั้นไปคูณกับค่าคงที่ค่าหนึ่งเพื่อทำการชดเชยให้มีความถูกต้องมากขึ้น เพื่อให้ค่าคงที่ดังกล่าวเป็น K จะได้ α_m ดังในสมการที่ 2.61

$$\alpha_m = \frac{KR}{2Z_c} = \frac{KR_s}{wZ_c} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \cdot \sqrt{\frac{K}{wZ_c}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2 \times 5.8 \times 10^7 \sigma_r}} \cdot \frac{K}{wZ_c} \quad \text{Nep/เมตร} \quad (2.61)$$



รูปที่ 2.23 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป

โดยที่ σ_0 คือ ค่าคงตัวของ การนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative conductivity) ที่เทียบกับ ทองแดง ซึ่งมี $\sigma = 5.8 \times 10^7$ ซีเมนต์/เมตร ค่า K จะขึ้นอยู่กับค่า w/h และความถี่ โดยที่ในกรณี ที่ค่า w/h มีค่าใหญ่หลายๆ หมายถึง คลื่น TEM จะเข้าใกล้แบบอุดมคติที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.23 ค่า K จะลู่เข้าหา 1 ในกรณีกลับกัน คือ $w/h \ll 1$ ค่า K จะเข้าใกล้ 0.5 ในทางปฏิบัตินั้นพบว่า กรณีที่ออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์คุณสมบัติเป็น 50 โอห์ม โดยที่ $\epsilon_r = 10$ จะได้ค่า $K \sim 0.63$ สำหรับการหาค่า α_d อาศัยหลักการคิดค่า ϵ_{eff} ขึ้นมาใหม่ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

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

$$\alpha_d = \pi f \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \tan \delta_{eff} \quad (2.62)$$

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

$$\frac{\tan \delta_{eff}}{\tan \delta} = \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \quad (2.63)$$

ความสัมพันธ์ตามสมการ 2.63 เป็นสิ่งที่เหมาะสม เพราะเมื่อแทนค่า ϵ_{eff} ด้วย 1 หมายถึง ตัวกลางเป็นอากาศ ค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ 0 และเมื่อแทนค่า $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$ หมายถึง ตัวกลาง เป็นฉนวนทั้งหมด ค่า $\tan \delta_{eff}$ จะเท่ากับ $\tan \delta$

เมื่อนำค่า α_m และ α_d ในสมการที่ 2.61 และสมการ 2.62 แทนกลับเข้าไปใน สมการ 2.59 จะได้ค่า α ผลรวมออกมา และเนื่องจากนิยามเขียนค่า α มีหน่วยเป็น dB/เมตร ดังนั้น α จะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{72K}{wZ_c} \sqrt{\frac{f}{\sigma_r}} + 91f \sqrt{\epsilon_{eff}} \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \tan \delta \quad \text{dB/เมตร} \quad (2.64)$$

จากผลที่ได้จะเห็นว่า α_m แปรตาม \sqrt{f} ในขณะที่ α_d แปรตามความถี่ทำให้เหมือนว่า α_d มีค่าสูงกว่า α_m อย่างไรก็ตาม ในระยะต่อมาได้มีการพัฒนาแผ่นรองรับที่มีคุณสมบัติดีขึ้น คือ มีค่า $\tan \delta$ ต่ำมาก ทำให้ช่วงความถี่ที่ความถี่น้อยกว่า 10 กิกะเฮิร์ตซ์ ค่า α_m จะใหญ่กว่าค่า α_d และเป็นค่าสูญเสียหลักของไมโครสตริป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน

3.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

3.1.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ในการศึกษานี้ จะออกแบบใช้งานที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้สารแบบอีพอกซี (Epoxy) เป็นฉนวน ซึ่งมีค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวนของวัสดุที่นำมาทำแผ่นรองรับ (ϵ_r) มีค่าเท่ากับ 3 ฟารัดต่อเมตร และความหนาของสารที่เป็นฉนวน (h) มีค่าประมาณ 1.5 มิลลิเมตร รูปแบบของสายอากาศไมโครสตริปจะเป็นรูปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการเชื่อมต่อสัญญาณ ให้กับสายอากาศเป็นการป้อนสัญญาณแบบใช้สายส่งไมโครสตริป ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

ส่วนแรกของการออกแบบ คือ การเลือกความหนาของสารฉนวน (h) ที่จะใช้ในการสร้างสายอากาศ สิ่งที่ต้องพิจารณาต่อไปคือ ค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวน (ϵ_r) ความถี่ใช้งาน (f) ในการออกแบบหาขนาดต่างๆ ของตัวแพร่กระจายคลื่นในทางปฏิบัติสามารถหาได้จากสมการดังนี้

หาค่าความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน โดยใช้ความถี่ที่ 2 กิกะเฮิรตซ์

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 10^9}$$

$$\lambda_0 = 15 \text{ เซนติเมตร}$$

1

หาค่าความยาวของตัวแผ่นแพร่กระจายคลื่น

$$L = \frac{\lambda_0}{2} \quad (3.2)$$

เมื่อ L = ความยาวของตัวแพร่กระจายคลื่น, เซนติเมตร

λ_0 = ค่าความยาวคลื่นของความถี่ใช้งาน, เมตร

ในการออกแบบใช้งานจริงค่าของ L จะเป็นดังนี้

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

แทนค่า λ_0 ลงในสมการที่ 3.3 ได้เป็น

$$L = (0.49) \times 15$$

$$L = 7.35 \quad \text{เซนติเมตร}$$

สำหรับความกว้าง (W) ของตัวแพร่กระจายคลื่น พิจารณาจากค่าคงที่ของฉนวน (ϵ_r) โดยค่าความยาวสามารถหาได้ดังนี้

$$W = \frac{\lambda_d}{2} \quad \text{เซนติเมตร} \quad (3.4)$$

เมื่อ W = ค่าความกว้างของตัวแพร่กระจายคลื่น, เซนติเมตร

λ_d = ค่าความยาวคลื่นของสารที่เป็นฉนวน, เมตร

หาค่า λ_d จาก

$$\lambda_0 = \lambda_d \sqrt{\epsilon_c}$$

$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_c}} \quad (3.5)$$

หาค่า ϵ_c ได้จากสมการดังนี้

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{L} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

แทนค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวน (ϵ_r), ความหนาของสารที่เป็นฉนวน (h) และค่าความยาว (L) ลงในสมการที่ 3.6 ได้เป็น

$$\epsilon_c = \frac{3+1}{2} + \frac{3-1}{2} \left(1 + \frac{10(15 \times 10^{-3})}{7.35} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\epsilon_c = 2.999$$

แทนค่า ϵ_c ลงในสมการที่ 3.5

$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_c}}$$

$$\lambda_d = \frac{15}{\sqrt{2.999}}$$

$$\lambda_d = 8.66 \quad \text{เซนติเมตร}$$

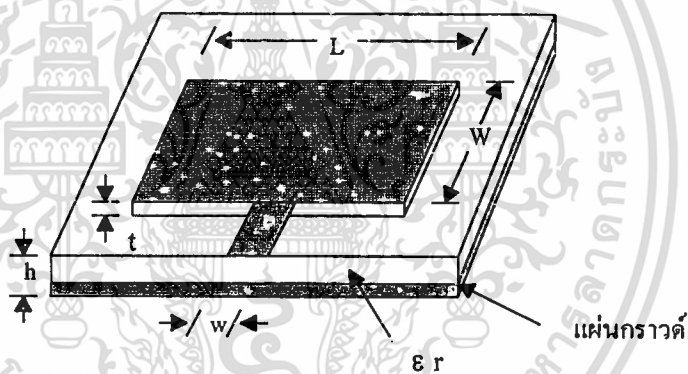
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า λ_d ลงในสมการที่ 3.4 เพื่อหาค่า ความกว้าง (W)

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

$$W = \frac{8.66}{2}$$

$$W = 4.33 \text{ เซนติเมตร}$$



รูปที่ 3.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

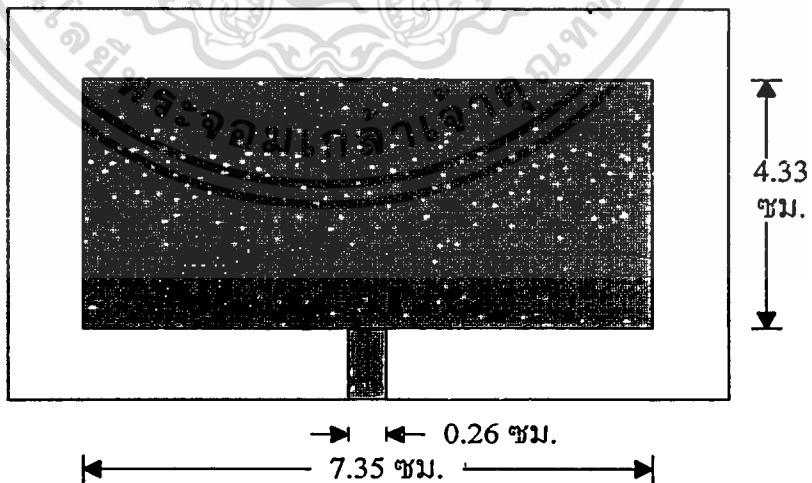
เมื่อ

ความยาวของสายอากาศ (L)	= 7.35 เซนติเมตร
ความกว้างของสายอากาศ (W)	= 4.33 เซนติเมตร
ความหนาของฉนวน (h)	= 0.15 เซนติเมตร
ความหนาของแผ่นแพร่กระจายคลื่น (t)	= 50 ไมคอนเมตร
ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป (w)	= 0.26 เซนติเมตร
ค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวน (ϵ_r)	= 3 ฟารัดต่อเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

ในส่วนของการสร้างสายอากาศไมโครสตริปจะออกแบบสร้างลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีขนาดเล็ก หลังจากที่ทำการศึกษาขนาดของแผ่นแพร่กระจายคลื่น ซึ่งมีขนาดความกว้าง (W) และขนาดความยาว (L) ของแผ่นแพร่กระจายคลื่น หลังจากนั้นนำไปสร้างลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ และส่วนที่เป็นจุดต่อของสายส่ง (t) จะออกแบบให้วางอยู่ตรงส่วนกลางของด้านที่เป็นความยาว เพื่อให้การเชื่อมต่อของสัญญาณผ่านไมโครสตริปมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด การสร้างสายอากาศให้ได้รูปปร่างตามแบบนั้น จะใช้วิธีการวางแบบที่เป็นความกว้าง และความยาวของแผ่นแพร่กระจายคลื่นลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เตรียมไว้ โดยการสร้างของส่วนที่เป็นแบบของแผ่นแพร่กระจายคลื่นลงบนแผ่นวงจรพิมพ์นั้น จะใช้วิธีการอัดแบบลงบนแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้วิธีการอัดแผ่นฟิล์มบางลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ จากนั้นนำแผ่นวงจรพิมพ์ที่ออกแบบไปทำการกัดกร่อนส่วนที่เป็นทองแดงที่ไม่ต้องการออก ซึ่งการกัดกร่อนใช้สารละลายที่เป็นกรดสำหรับกัดแผ่นวงจรพิมพ์ เมื่อกัดกร่อนแผ่นวงจรพิมพ์เรียบร้อยแล้ว ทำการตรวจสอบความความถูกต้องของชิ้นงาน ทำการเชื่อมต่อสายส่งไมโครสตริปกับตัวเชื่อมแบบเอสเอ็มเอ (SMA connector) เพื่อที่จะต่อกับสายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ และนำชิ้นงานไปสู่ขั้นตอนการทดลองเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของสายอากาศต่อไป

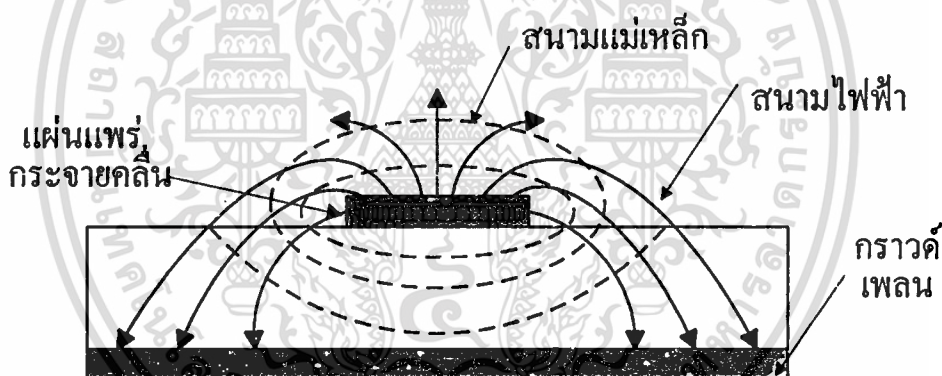


รูปที่ 3.2 สายอากาศไมโครสตริปที่มองจากด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 คุณสมบัติ และรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

สำหรับรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.3 ซึ่งในการส่งผ่านคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม จะมีลักษณะเป็นกึ่ง TEM คือ มีสนามในแนวแกนอยู่ เพราะโครงสร้างของสายอากาศแบบสี่เหลี่ยม เป็นโครงสร้างที่มีฉนวน และอากาศอยู่ในระบบเดียวกัน ลักษณะการส่งผ่านคลื่น TEM จะเป็นแบบผสม การวิเคราะห์หาคุณสมบัติของสายอากาศใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำได้โดยการหาค่าอิมพีแดนซ์ และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว แล้วทำการหาค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริปได้ต่อไป



รูปที่ 3.3 การแพร่คลื่นของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

จากที่ทำการคำนวณ และออกแบบสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่ย่านความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ ขั้นตอนต่อไปเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบ และตรวจสอบคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป โดยการทดลองจะประกอบได้ด้วยการวัด และทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และการทดสอบหาอิมพีแดนซ์ ซึ่งในการทดสอบแต่ละขั้นตอนจะมีผลการทดลองที่ได้ประกอบอยู่ด้วยเพื่อที่จะสามารถนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาแนวทางการแก้ไข และปรับปรุงต่อไป

สำหรับการวัด และทดสอบค่าต่างๆ ในการทดลองนี้ จะใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF network analyzers : รุ่น HP 8714C) ในการวัด โดยเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุสามารถวัด และแสดงรูปสัญญาณ พร้อมทั้งค่าต่างๆ ออกมาโดยละเอียด ส่วนอุปกรณ์อื่น ได้แก่ ตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับเครื่องวัดจะใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ในการทดลองจะมีผลการทดลองของสายอากาศที่ทำการออกแบบจากค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวน (ϵ_r) ค่าต่างๆ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองของสายอากาศทั้งหมด ที่ออกแบบว่ามีความเหมาะสมที่จะออกแบบที่ค่าใด

4.2 การวัด และทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ

ไมโครสตริป

4.2.1 ลำดับขั้นการทดลอง .

1. ใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ เปิดสวิตช์จ่ายกำลังงานไปที่ตำแหน่ง ON
2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (MEAS 1)

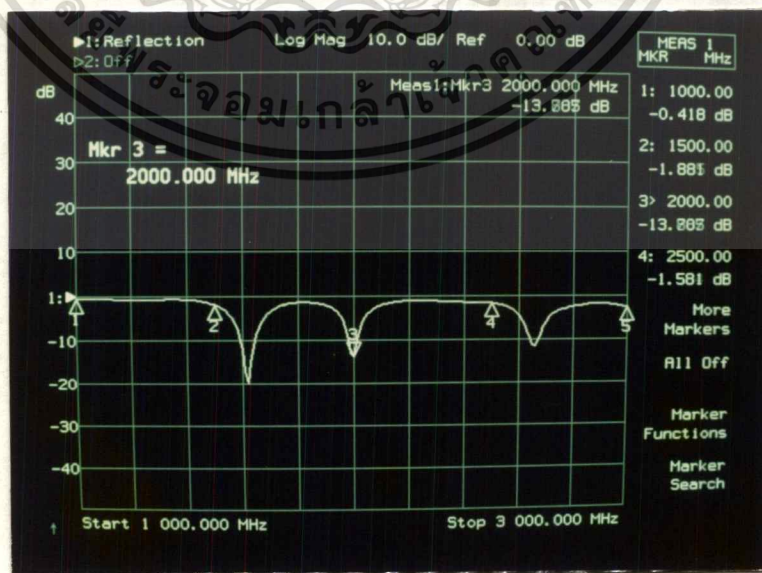
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม **MEAS 1**

4. เลือกการวัดสะท้อนกลับ (Reflection) โดยเลือกที่ Reflection
5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม FREQ เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Start ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก Stop ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
6. สังเกตรูปสัญญาณที่ได้จากจอภาพแสดงผล ทำการปรับมุมมองการแสดงผลขนาดรูปสัญญาณให้สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนขึ้น
7. ตั้งตำแหน่งการอ่านค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม MARKER แล้วตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่ง ที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ,ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
8. สังเกตผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 7

4.2.2 ผลการทดลอง

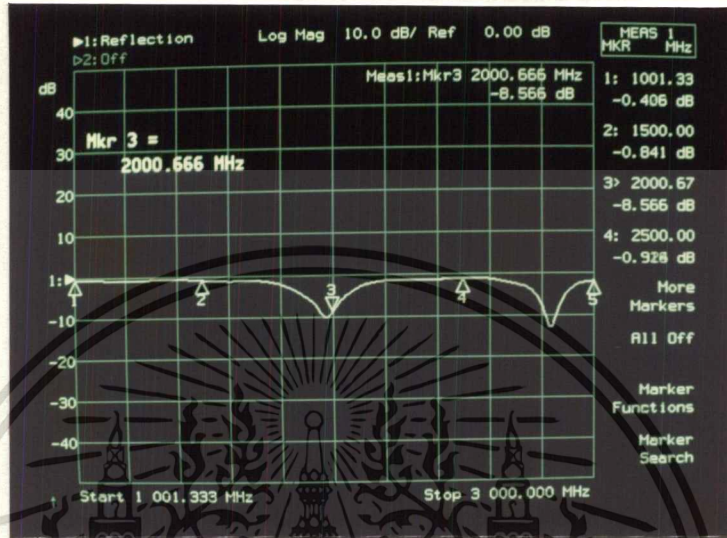
ผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าการสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม คือ รูปสัญญาณในช่วงความถี่ 1-3 กิกะเฮิรตซ์ ของการวัดหาค่าการสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปที่ออกแบบโดยใช้ค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวน 3 และ 4.45 ดังนี้

1. การสะท้อนกลับของสายอากาศที่ค่า $\epsilon_r = 3$ ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.1 สัญญาณการสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปที่ค่า $\epsilon_r = 3$

2. ค่าการสะท้อนกลับของสายอากาศที่ค่า $\epsilon_r = 4.45$ ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.2 สัณฐานการสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปที่ค่า $\epsilon_r = 4.45$

ตารางที่ 4.1 ค่าการสะท้อนกลับของสายอากาศออกแบบที่ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์

ความถี่ที่ทดสอบ	การสะท้อนกลับ (dB) ที่ค่า ϵ_r ต่างๆ	
	$\epsilon_r = 3$	$\epsilon_r = 4.45$
1 กิกะเฮิรตซ์	-0.518	-0.401
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.572	-0.792
2 กิกะเฮิรตซ์	-15.890	-8.694
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.552	-0.854
3 กิกะเฮิรตซ์	-2.320	-1.659

4.3 การวัด และทดสอบหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริป

4.3.1 ลำดับขั้นการทดลอง

1. ใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ ในการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เปิดสวิตช์จ่ายกำลังงานไปที่ตำแหน่ง ON
2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (MEAS 1)
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม **MEAS 1** แล้วเลือก **Reflection**
4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด เริ่มจากกดปุ่ม **FREQ** เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Start** แล้วป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สิ้นสุดที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Stop** แล้วป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
5. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) โดยกดปุ่ม **FORMAT** จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ **SWR**
6. ตั้งตำแหน่งอ่านค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม **MARKER**. โดยตั้งความถี่ ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
7. สังเกตผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 6

4.3.2 ผลการทดลอง

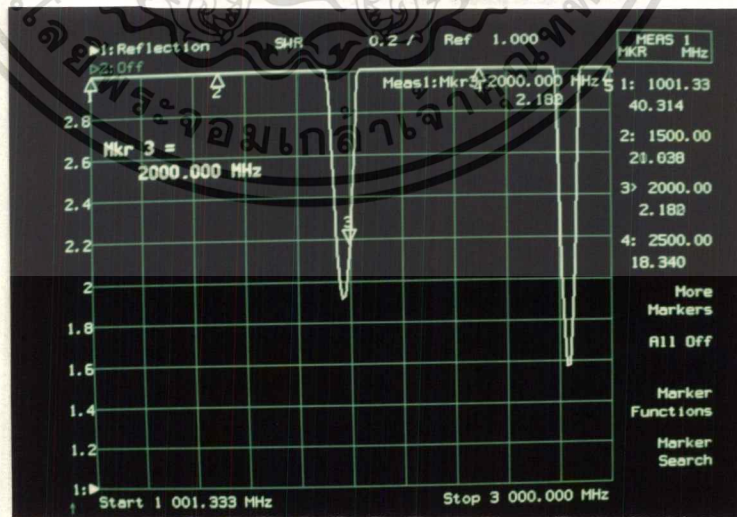
ผลการทดลองของการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน คือ รูปสัญญาณแสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันที่อ่านได้มีดังนี้

1. ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ค่า $\epsilon_r = 3$ ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ค่า $\epsilon_r = 3$

2. ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ค่า $\epsilon_r = 4.45$ ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ค่า $\epsilon_r = 4.45$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ที่ออกแบบที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์

ความถี่ที่ทดสอบ	อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า) ที่ค่า ϵ_r ต่างๆ	
	$\epsilon_r = 3$	$\epsilon_r = 4.45$
1 กิกะเฮิรตซ์	34.219	42.816
1.5 กิกะเฮิรตซ์	11.202	22.016
2 กิกะเฮิรตซ์	1.546	2.136
2.5 กิกะเฮิรตซ์	10.704	21.095
3 กิกะเฮิรตซ์	7.076	10.270

4.4 การวัด และทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป

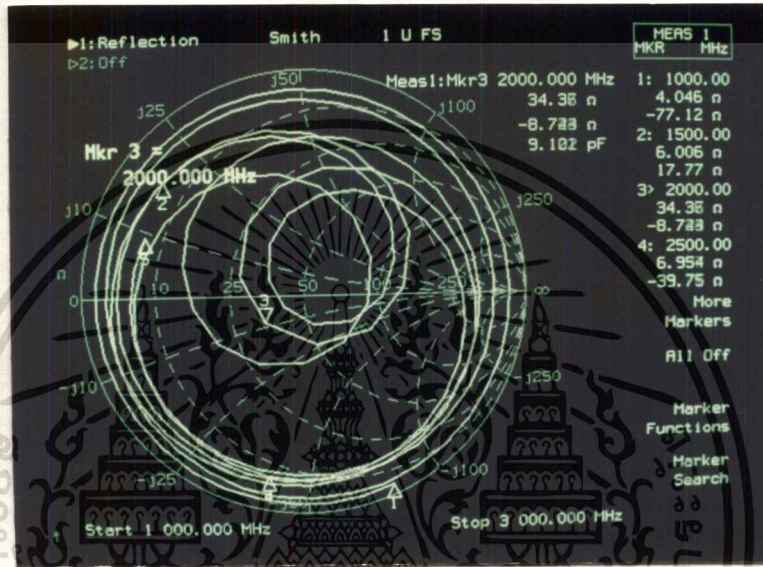
4.4.1 ลำดับขั้นการทดลอง

- ใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ เปิดสวิตช์จ่ายกำลังงานไปที่ตำแหน่ง ON
- ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (MEAS 1)
- เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม แล้วเลือก
- ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด เริ่มจากกดปุ่ม เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก แล้วป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สิ้นสุดที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก แล้วป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
- เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม เลือกการวัดที่
- ตั้งตำแหน่งอ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม โดยค่าความถี่ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์ และ ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
- สังเกตค่าที่ได้จากการทดลองในข้อ 6

4.4.2 ผลการทดลอง

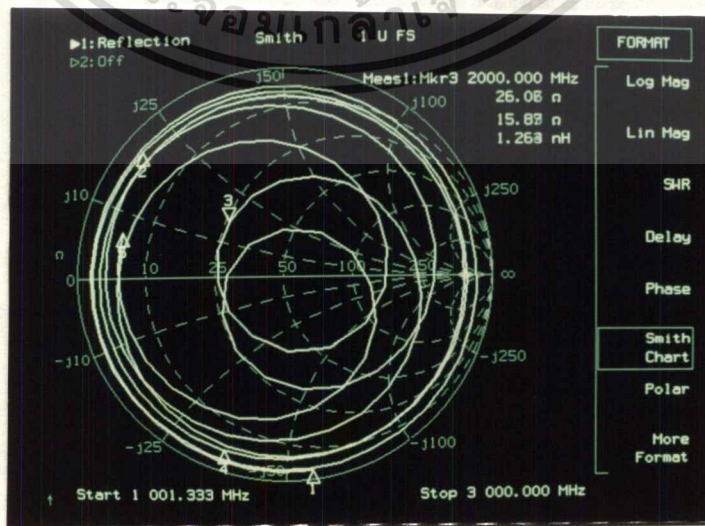
ผลการทดลองของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ คือ รูปแผ่นภาพสมิทชาร์ต และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปที่อ่านได้ ดังนี้

1. แผ่นภาพสมิทชาร์ตของสายอากาศที่ค่า $\epsilon_r = 3$ ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.5 แผ่นภาพสมิทชาร์ตของสายอากาศที่มีค่า $\epsilon_r = 3$

2. แผ่นภาพสมิทชาร์ตของสายอากาศที่ค่า $\epsilon_r = 4.45$ ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 4.6 แผ่นภาพสมิทชาร์ตของสายอากาศที่มีค่า $\epsilon_r = 4.45$ ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศออกแบบที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์

ความถี่ที่ทดสอบ	อิมพีแดนซ์ (โอห์ม) ที่ค่า ϵ_r ต่างๆ	
	$\epsilon_r = 3$	$\epsilon_r = 4.45$
1 กิกะเฮิรตซ์	4.795	2.764
1.5 กิกะเฮิรตซ์	5.230	2.692
2 กิกะเฮิรตซ์	37.04	25.91
2.5 กิกะเฮิรตซ์	7.817	3.770
3 กิกะเฮิรตซ์	7.489	4.964

4.5 การทดสอบค่าคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป โดยการทดสอบวางวัสดุต่างๆ บนสายอากาศ

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งใช้สายอากาศที่ได้ทำการทดสอบแล้วว่ามีคุณสมบัติของค่าการสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ที่ถูกต้อง และสมบูรณ์แบบเพียง 1 ตัวเท่านั้น โดยจะใช้สายอากาศที่ออกแบบด้วยค่าคงที่สัมพันธ์ของฉนวนเท่ากับ 2 ความถี่ที่ใช้ในการออกแบบ 2 กิกะเฮิรตซ์ ในการทดสอบจะใช้วัสดุอื่นๆ มาวางอยู่บนสายอากาศไมโครสตริป วัสดุที่ใช้เป็นกระดาษ แก้ว อีพอกซี (Epoxy) และพลาสติก วางอยู่บนสายอากาศ และมีการปรับระยะความสูงจากวัสดุถึงตัวสายอากาศที่นำมาทดสอบ ซึ่งค่าระยะความสูงนี้จะมีค่าตามค่าความยาวคลื่นที่ขนาดต่างๆ แล้วทำการวัดค่าต่างๆ ของสายอากาศที่จุดระยะห่างนั้นๆ ต่อไป

4.5.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุในการวัดค่าคุณสมบัติ เปิดสวิตช์จ่ายกำลังงานไปที่ตำแหน่ง ON
2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (MEAS 1)
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม **MEAS 1** แล้วเลือก **Reflection**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เผยแพร่ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด เริ่มจากกดปุ่ม **FREQ** เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Start** แล้วป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สิ้นสุดที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Stop** แล้วป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์

5. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม **FORMAT** ารวัดที่ **Smitchart**

6. ตั้งตำแหน่งอ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม **MARKER** โดยค่าความถี่ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, และ ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

7. นำแท่นปรับเลื่อนที่มีวัสดุที่ต้องการทดสอบมาวางทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จากนั้นทำการเลื่อนปรับระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ ($\lambda = 15$ เซนติเมตร)

8. สังเกตค่าที่ได้จากการทดลองในข้อ 6 และข้อ 7 ที่ตำแหน่งระยะห่างต่างๆ

4.5.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองในส่วนของการทดสอบนี้ คือ ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ทดสอบโดยกระดาษ ($\epsilon_r = 3$), แก้ว ($\epsilon_r = 5$), พลาสติก ($\epsilon_r = 2.26$) และอีพอกซี ($\epsilon_r = 3$), มีดังนี้

1. ผลการทดลองของการทดสอบที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

ระยะความห่างของวัสดุ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพอกซี
15	-13.487	-13.642	-13.426	-14.296
7.5	-13.541	-13.7.1	-13.623	-14.320
5	-13.520	-13.794	-13.546	-14.335

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

ระยะความห่างของ วัสดุ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)			
	3.75	-13.584	-13.752	-13.610
3	-13.645	-13.725	-13.646	-14.382
2.5	-13.674	-13.746	-13.652	-14.435
2.14	-13.654	-13.775	-13.774	-14.612
1.9	-13.691	-14.375	-13.751	-14.812

2. ผลการทดลองของการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ระยะความห่างของ วัสดุ (ซม.)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพอกซี
15	1.537	1.535	1.536	1.477
7.5	1.542	1.532	1.535	1.475
5	1.539	1.528	1.539	1.475
3.75	1.539	1.529	1.539	1.472
3	1.538	1.532	1.538	1.472
2.5	1.535	1.533	1.536	1.467
2.14	1.530	1.521	1.531	1.457
1.9	1.527	1.489	1.527	1.444

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

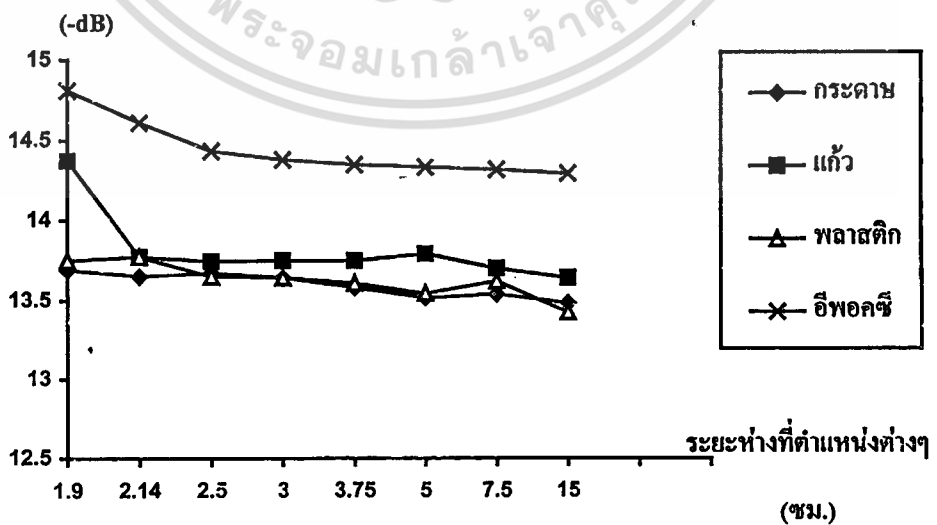
3. ผลการทดลองของการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองค่าอิมพีแดนซ์

ระยะความห่างของวัสดุ (ซม.)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพอกซี
15	35.21	35.30	35.02	36.78
7.5	35.25	35.57	35.42	36.82
5	35.34	35.55	35.47	36.75
3.75	35.49	35.27	35.32	36.67
3	35.37	34.98	35.26	36.64
2.5	35.37	34.72	35.17	36.51
2.14	35.14	34.30	35.12	36.47
1.9	35.16	34.72	34.92	36.51

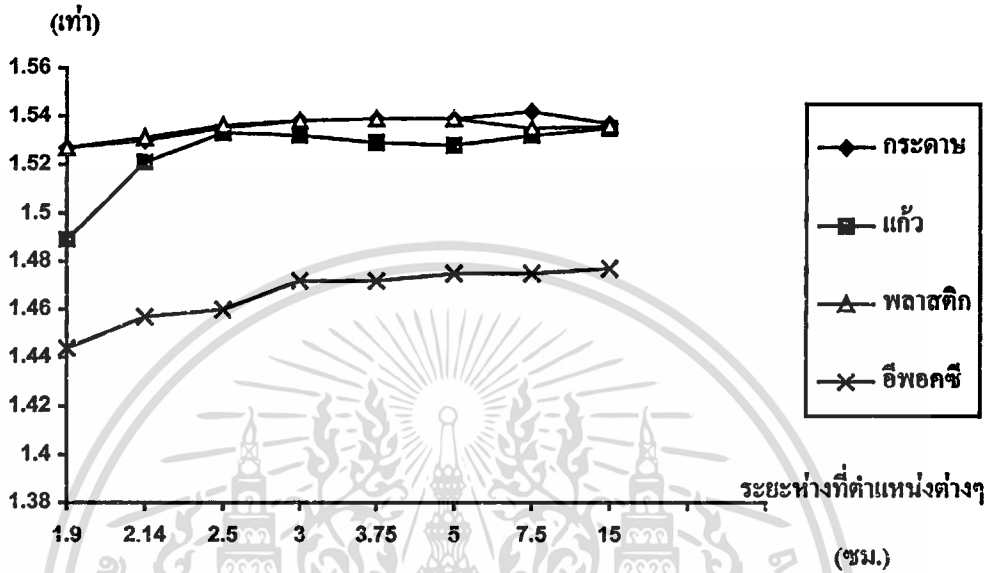
ค่าสัมประสิทธิ์

การสะท้อนกลับ



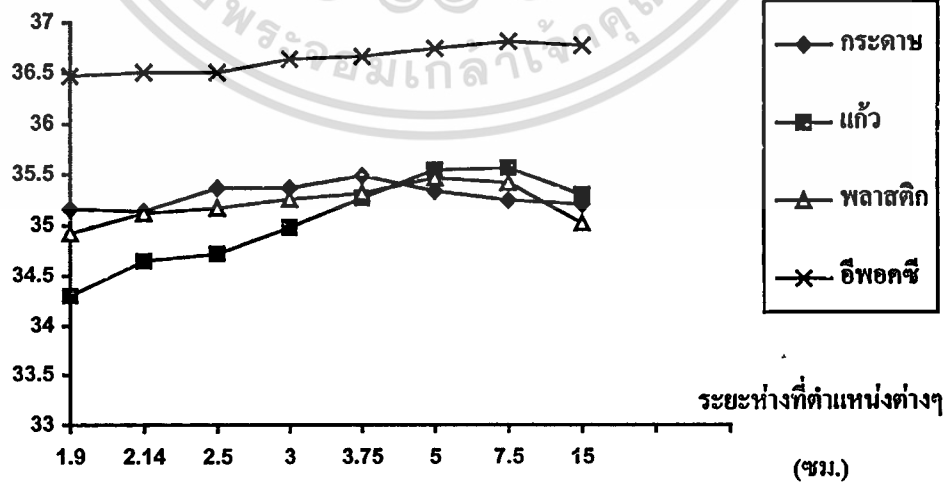
เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่ 10 MHz ด้านการคำนวณ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง



รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)



รูปที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไข และพัฒนา

5.1 บทสรุป

สายอากาศไมโครสตริปที่ได้ทำการสร้าง และทดลองเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ใช้งานที่ช่วงความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งได้แสดงทฤษฎี และการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ โดยทำการตรวจสอบการสูญเสีย การหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศรวมทั้งทดสอบหาผลกระทบจากวัสดุอื่นๆ ที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปเกิดการเปลี่ยนแปลงจากทฤษฎี การออกแบบ และการสร้างสายอากาศสามารถนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบ และสร้างสายอากาศไมโครสตริปรูปแบบอื่นได้ต่อไป

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ

1. สามารถออกแบบ และสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมโดยมีความถี่ใช้งานที่ 2 กิกะเฮิรตซ์
2. สามารถนำสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างขึ้นไปทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศได้
3. นำทฤษฎีการสร้าง ออกแบบ ทดลอง และผลการทดลองไปประยุกต์ใช้เป็นใบงาน การทดลอง

5.3 ปัญหา และแนวทางแก้ไข

ปัญหา

ในการจัดทำโครงการชุดนี้ สามารถที่จะสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

1. ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป เมื่อนำมาทดลอง และออกแบบสร้างผลที่ได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่ใช้คำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคำนวณออกแบบสร้างสายอากาศต้องเสียเวลามาก เพราะค่าคงตัวของสารที่เป็นฉนวนมีค่าหลายค่า ทำให้ต้องออกแบบโดยใช้ค่าคงตัวของฉนวนแต่ละค่าหลายครั้งอย่างละเอียด ก่อนที่จะทำการทดสอบ

3. การสร้างส่วนแผ่นแพร่กระจายคลื่นให้มีขนาดตรงตามที่คำนวณไว้ นั้นทำได้ยาก เพราะค่าที่คำนวณได้มีความละเอียดมากกว่าที่จะออกแบบตามการคำนวณได้

4. ในการวัด และทดสอบค่าการสูญเสียกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งนั้น จะมีค่าไม่สอดคล้องกัน คือ ถ้าค่าการสะท้อนกลับมีมากซึ่งเป็นผลที่ไม่ดี แต่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่วัดได้พร้อมกันจะมีค่าที่ดี ซึ่งไม่ตรงตามหลักทฤษฎี

5. การบัดกรีเพื่อเชื่อมทำการต่อตัวเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอกับส่วนของตัวสายส่งไมโครสตริปนั้นทำได้ยาก เพราะจุดเชื่อมต้อมีขนาดเล็ก และแผ่นทองแดงสามารถหลุดจากส่วนที่เป็นฉนวนได้ถ้าการบัดกรีใช้ความร้อนสูงเกินไป

1. ในการออกแบบสายอากาศ ค่าคงตัวของสารที่เป็นฉนวนต้องกำหนดให้ได้ตรงตามค่าของสารนั้นจริง และถูกต้อง

2. ในส่วนของการสร้างสายอากาศไมโครสตริปจะต้องสร้างให้ได้ขนาดเท่ากับที่คำนวณให้มากที่สุด คือ ต้องออกแบบขนาดโดยใช้เครื่องมือที่สามารถกำหนด และวัดขนาดของแผ่นแพร่กระจายคลื่นที่มีความละเอียดสูง

3. การวัด และทดสอบถ้าจะให้ค่าต่างๆ มีความถูกต้อง และสอดคล้องกันนั้น ต้องสร้างสายอากาศให้มีขนาดที่ถูกต้อง และมีความละเอียดในการสร้างให้สูงมากขึ้น

4. การบัดกรีต้องใช้เครื่องมือบัดกรีที่ควบคุมอุณหภูมิของตัวหัวแรงได้อย่างสม่ำเสมอ เพื่อที่จะสามารถควบคุมอุณหภูมิในขณะที่ทำการเชื่อมต่อ ไม่ให้มีความร้อนสูงเกินไป

5.4 แนวทางการพัฒนาโครงการ

1. ในส่วนของทฤษฎี การออกแบบคำนวณสามารถออกแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบเพื่อเพิ่มความถูกต้องให้มากขึ้น

2. ในการสร้างสายอากาศ สามารถสร้างสายอากาศให้มีอัตราการขยายของสายอากาศเพิ่มมากขึ้นโดยออกแบบให้สายอากาศเชื่อมต่อกันหลายๆ ตัว (Array) ซึ่งอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์เดียวกัน

3. การใช้เครื่องมือที่ใช้ในการตัดแผ่นวงจรพิมพ์ที่สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ จะทำให้การสร้าง และออกแบบส่วนของ แผ่นแพร์กระจายคลื่นให้มีความละเอียดได้สูง สะดวก และรวดเร็วยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 1

เรื่อง การวัดการสะท้อนกลับ (Reflection)

วัตถุประสงค์

1. สามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับได้
2. สามารถวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปได้

เครื่องมือ และอุปกรณ์

ชื่ออุปกรณ์		
เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF network analyzers)	1	เครื่อง
สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	1	ตัว
สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (SMA connector line)	1	เส้น

ทฤษฎี และหลักการ

การสะท้อนกลับจากภาวะต้านทาน

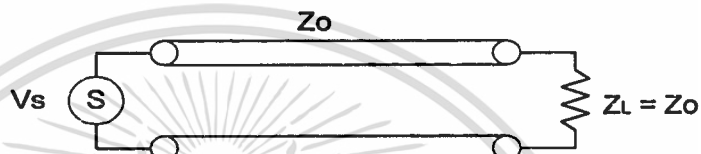
การต่อสายนำสัญญาณด้วยตัวภาวะที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Z_0) ทำให้เกิดการสมดุลทางอิมพีแดนซ์ (Matching impedance) จึงไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณ และกำลังงานสูญเสียเป็นความร้อนที่ตัวภาวะความต้านทาน ส่วนการต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปิด (ลัดวงจร) หรือแบบเปิด (เปิดวงจร) จะเกิดการสะท้อนกลับของกำลังงานทั้งหมดดังรูปที่ 1

การต่อปลายสายด้วยตัวภาวะความต้านทานซึ่งไม่ใช่ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนั้น ผลที่ได้คือ กำลังงานจะถูกแบ่งเป็นสองส่วน โดยส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับตามสาย และอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียที่ตัวภาวะเป็นความร้อน ในส่วนกำลังที่สะท้อนกลับจะมีปริมาณเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน (Voltage reflection coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

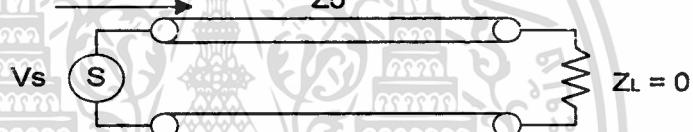
$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน
 V_r = แรงดันสะท้อนกลับ, โวลต์
 V_i = แรงคันทกกระทบ, โวลต์



(ก) การต่อตัวภาระด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ

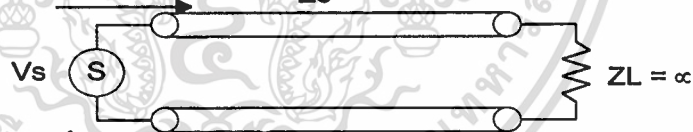
คลื่นตกกระทบ



คลื่นสะท้อนกลับ

(ข) การต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปลายปิด

คลื่นตกกระทบ



คลื่นสะท้อนกลับ

(ค) การต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปลายเปิด

รูปที่ ก.1 การต่อภาระความต้านทาน

จากสมการที่ ก.1 ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันเป็นบวก แสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกัน แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบแรงดันสะท้อนกลับจะมีเฟสตรงข้ามกัน การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของคลื่นแรงดันสะท้อนกลับได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสะท้อนกลับ} = \Gamma \times 100 \quad (\%) \quad (\text{ก.2})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานหาได้จากแรงดันยกกำลังสองหารด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ Z_0

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

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของกำลังงาน (Power reflection coefficient) จะมีค่าเท่ากับกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

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

เมื่อ Γ^2 = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลังงาน

P_r = กำลังสะท้อนกลับ, วัตต์

P_i = กำลังงานตกกระทบ, วัตต์

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ได้โดย

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

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่างต่อผลรวมระหว่างค่าของตัวภาวะความต้านทานกับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสาย

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

เมื่อ Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

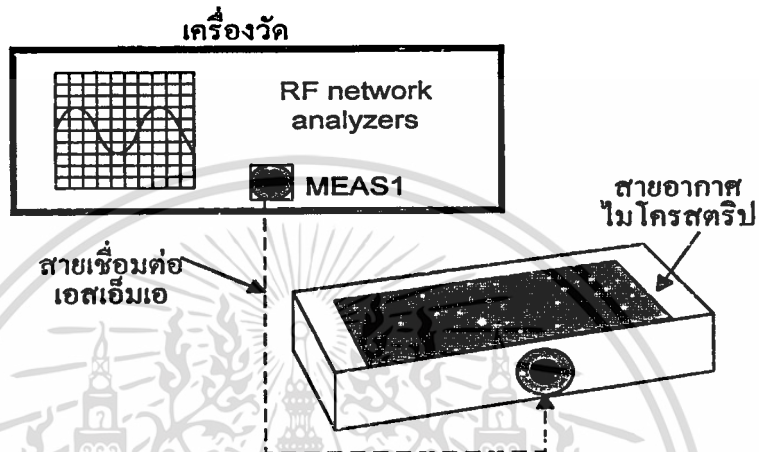
Z_L = ภาวะอิมพีแดนซ์, โอห์ม

Z_0 = อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณ, โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

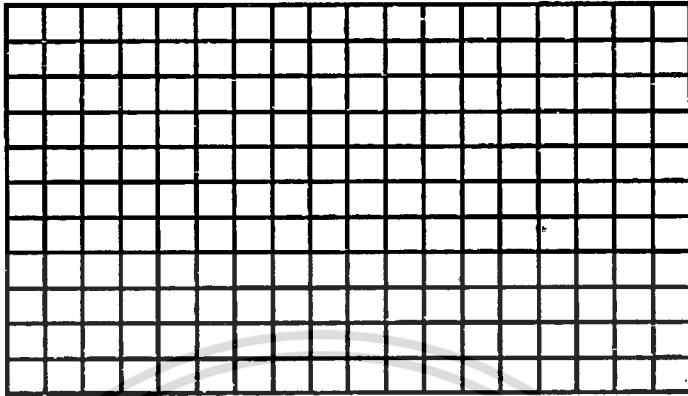
1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูป



รูปที่ ก.2 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (MEAS 1)
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม **MEAS 1**
4. เลือกการวัดสะท้อนกลับ (Reflection) โดยเลือกที่ **Reflection**
5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม **FREQ** เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Start** ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Stop** ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
6. สังเกตรูปสัญญาณที่ได้จากจอภาพแสดงผล ทำการปรับมุมมองการแสดงผลขนาดรูปสัญญาณให้สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนขึ้น 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารลับที่ได้จากการทดลองในข้อ 7 ลงในตารางที่ ก.1 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



START = Hz

STOP = Hz

รูปที่ ก.3 สัญญาณสัมพันธ์การสะท้อนกลับ

ตารางที่ ก.1 ค่าสัมพันธ์การสะท้อนกลับ

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

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขโดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเกิดขึ้นได้อย่างไร
2. กำหนดให้ค่าแรงดันตกกระทบเท่ากับ 30 โวลต์ และค่าแรงดันสะท้อนกลับมีค่าเท่ากับ 13.5 โวลต์. จงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน และเปอร์เซ็นต์การสะท้อนกลับของกำลังงาน



การทดลองที่ 2

เรื่อง การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio)

วัตถุประสงค์

1. สามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้
2. สามารถวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปได้

เครื่องมือ และอุปกรณ์

ชื่ออุปกรณ์

เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF network analyzers)	1	เครื่อง
สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	1	ตัว
สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (SMA connector)	1	เส้น

ทฤษฎี และหลักการ

การต่อสายนำสัญญาณด้วยตัวภาวะความต้านทานที่มีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Z_0) ดังรูปที่ 1 (ก) จะเกิดการสะท้อนกลับขึ้น และมีคลื่นนิ่งเพิ่มขึ้นในสาย

คลื่นนิ่ง คือ คลื่นที่เกิดจากการรวม หรือบวกรากันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับ โดยจุดเชื่อมที่ตำแหน่งเดิมระหว่างจุดต่อที่ตำแหน่งอื่นๆ รูปคลื่นจะเปลี่ยนไปยังจุดสูงสุด และลดลงไปยังตำแหน่งต่ำสุด ดังรูป ก.4 (ข)

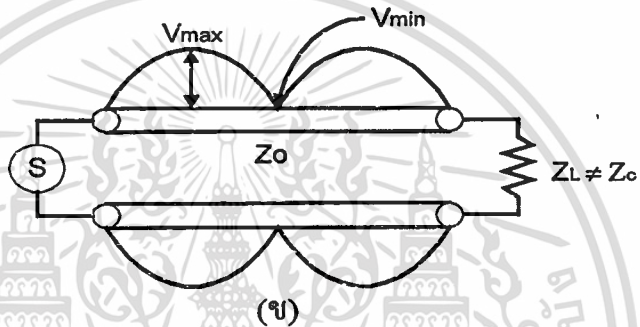
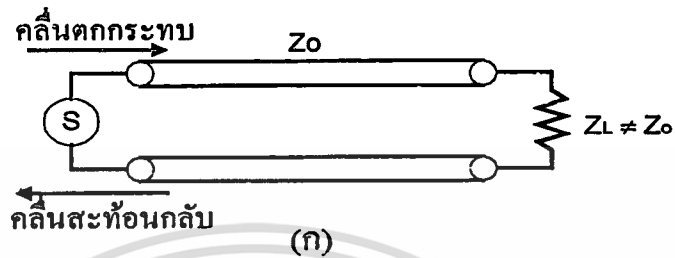
ค่าแรงดันสูงสุด V_{max} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกรากันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกัน

$$V = V_i + V_r \quad (\text{โวลต์}) \quad (ก.7)$$

ค่าแรงดันต่ำสุด V_{min} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกรากันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับที่มีเฟสตรงข้ามกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{min} = V_i + V_r \quad (\text{โวลต์}) \quad (ก.8)$$



รูปที่ ก.4 การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาระที่ไม่ใช่ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ

อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุด เรียกว่า อัตราส่วนของคลื่นนิ่งแรงดัน (voltage standing wave ratio : VSWR)

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (ก.9)$$

เมื่อ V_{max} = ค่าแรงดันสูงสุด, โวลต์
 V_{min} = ค่าแรงดันต่ำสุด, โวลต์

อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันแสดงในหน่วย เดซิเบล (dB) จะมีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing wave ratio : SWR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกา SWR เพื่อ = 20 log VSWR อนุญาตให้นำไป (dB) โยชนต์ (ก.10) ถ้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ได้ดังนี้

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (ก.11)$$

จะได้ค่า Γ เป็นดังนี้

$$\Gamma = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (dB) \quad (ก.12)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน กับ Z_L และ Z_0 สามารถหาได้โดย

$$VSWR = \frac{Z_L}{Z_0} \quad (ก.13)$$

เมื่อ $Z_L > Z_0$

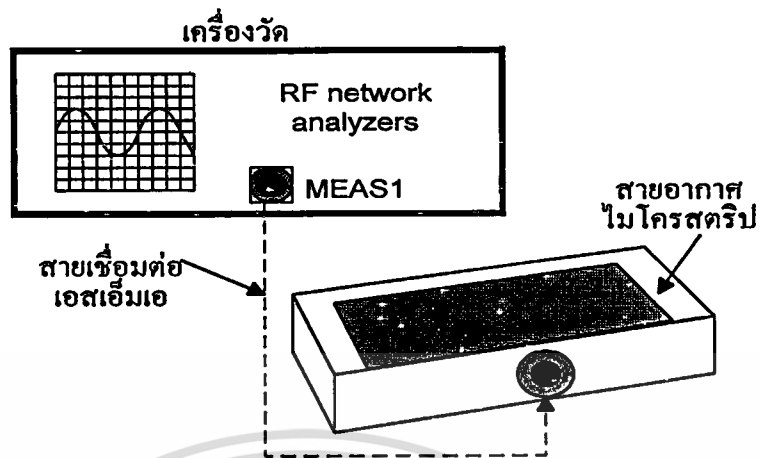
$$VSWR = \frac{Z_0}{Z_L} \quad (ก.14)$$

เมื่อ $Z_L < Z_0$

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

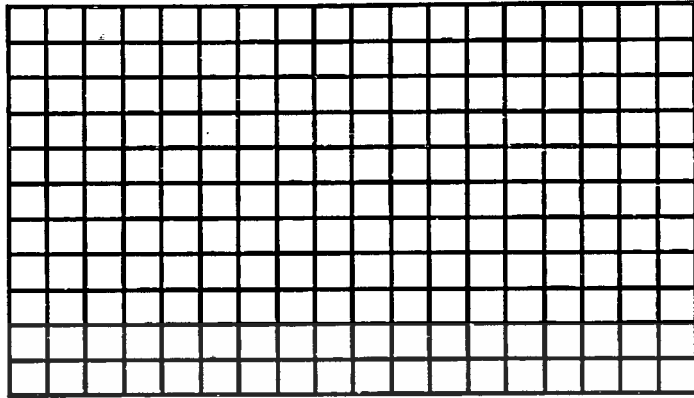
1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่ง ดังรูปที่ ก.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (MEAS 1)
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม **MEAS 1** แล้วเลือก **Reflection**
4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด เริ่มจากกดปุ่ม **FREQ** เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Start** แล้วป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สิ้นสุดที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Stop** แล้วป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
5. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) โดยกดปุ่ม **FORMAT** จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ **SWR** สังเกตรูปสัญญาณแล้วบันทึกผลการทดลอง
6. 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
7. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองลงในตารางที่ ก.2



START = Hz

STOP = Hz

รูปที่ ก.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

ตารางที่ ก.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

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

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำถามท้ายการทดลอง

1. ค่าอิมพีแดนซ์สูงสุด และค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนสายนำสัญญาณมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งอย่างไร
2. กำหนดให้คลื่นนิ่งมีค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ 12 โวลต์ และค่าแรงดันต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 4.7 โวลต์ จงคำนวณหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง



การทดลองที่ 3

เรื่อง การวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ
2. สามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดค่าอิมพีแดนซ์ได้
3. สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปได้

เครื่องมือ และอุปกรณ์

ชื่ออุปกรณ์		
เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF network analyzers)	1	เครื่อง
สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	1	ตัว
สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (SMA connector line)	1	เส้น

ทฤษฎี และหลักการ

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

การหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งใดๆ บนสายนำสัญญาณหาได้โดยใช้ค่าแรงดันรวมที่จุดนั้นหารด้วยค่ากระแสรวมที่จุดเดียวกันนั้น

$$Z(\text{ที่ตำแหน่งใดๆ}) = \frac{V(\text{ณ ตำแหน่งนั้น})}{I(\text{ณ ตำแหน่งนั้น})} \quad (\text{ก.15})$$

คลื่นไฟฟ้าเดินทางไปตามสายนำสัญญาณด้วยความเร็วที่ติดต่อกันหนึ่งหน่วยความยาวเท่านั้น ณ ช่วงเวลาขณะนั้น ดังนั้น อิมพีแดนซ์ที่ได้จึงเป็นอิมพีแดนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณนั้น และมีค่าตามสมการ

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{โอห์ม} \quad (\text{ก.16})$$

ค่าอัตราส่วนจากสูตรข้างต้นที่กล่าวมา มีความหมายอย่างยิ่งต่อสายนำสัญญาณไม่ว่าจะมีความยาวเพียงใดก็ตาม ที่เวลาหนึ่งๆ คลื่นที่ผ่านจะมีผลต่อความยาวหนึ่งหน่วยเท่านั้น และแต่ละหนึ่งหน่วยความยาว (Unit length) จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานได้จากสูตรข้างต้นเสมอ โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้ ณ ตำแหน่งใดบนสายนำสัญญาณ มีชื่อเรียกกันว่า ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ สัญลักษณ์ คือ Z_0 ดังนั้น ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณแบบแท่งตัวนำคู่ขนานจะแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

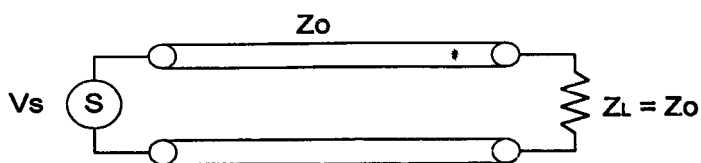
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{โอห์ม} \quad (\text{ก.17})$$

การต่อสายนำสัญญาณด้วยตัวการะที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Z_0) ทำให้เกิดการสมดุลทางอิมพีแดนซ์ (matching impedance) จึงไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณ และกำลังงานสูญเสียเป็นความร้อนที่ตัวการะความต้านทาน ส่วนการต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปิด (ลัดวงจร) หรือแบบเปิด (เปิดวงจร) จะเกิดการสะท้อนกลับของกำลังงานทั้งหมดดังรูปที่ ก.7

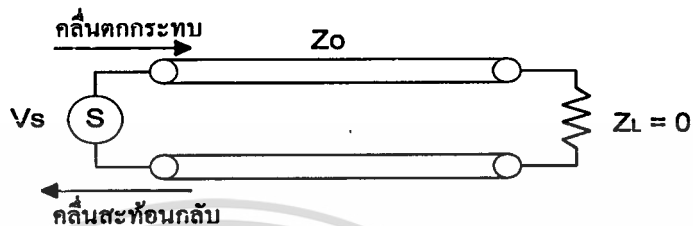
การต่อปลายสายด้วยตัวการะความต้านทานซึ่งไม่ใช่ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายผลที่ได้คือ กำลังงานจะถูกแบ่งเป็นสองส่วน โดยส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับตามสาย และอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียที่ตัวการะเป็นความร้อน ในส่วนกำลังที่สะท้อนกลับจะมีปริมาณเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน (voltage reflection coefficient)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \quad (\text{ก.18})$$

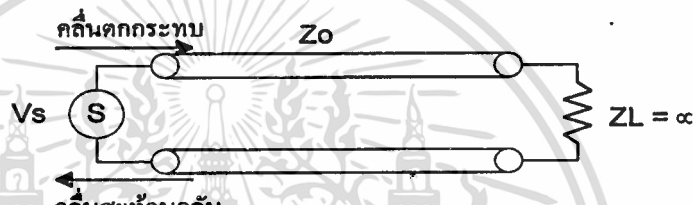
เมื่อ $\Gamma =$ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน
 $V_r =$ แรงดันสะท้อนกลับ, โวลต์
 $V_i =$ แรงดันตกกระทบ, โวลต์



(ก) การต่อตัวภาวะด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ



(ข) การต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปลายปิด



(ค) การต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปลายเปิด

รูปที่ ก.7 การต่อภาวะความต้านทานแบบต่างๆ

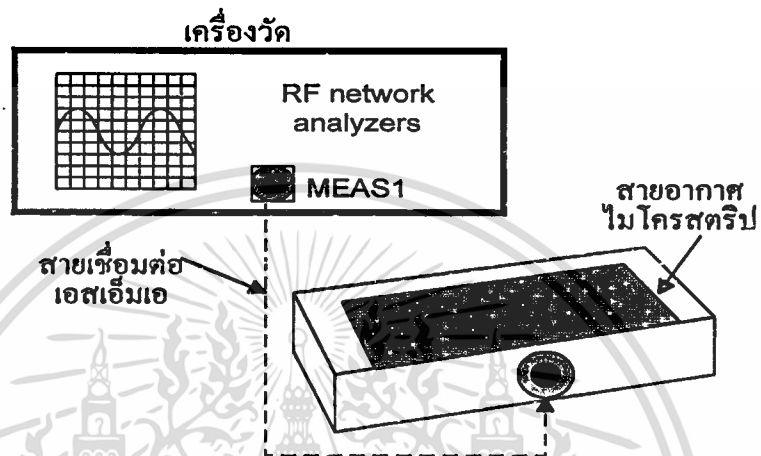
สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่างต่อผลรวมระหว่างภาวะกับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสาย

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \tag{ก.19}$$

- เมื่อ Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน
- Z_L = ภาวะอิมพีแดนซ์, โอห์ม
- Z_o = อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณ, โอห์ม

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูป



รูปที่ ก.8 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (MEAS 1)

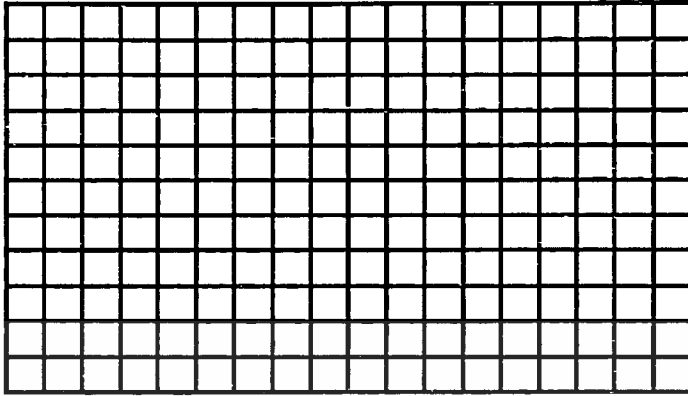
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม **MEAS 1** แล้วเลือก **Reflection**

4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด เริ่มจากกดปุ่ม **FREQ** เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Start** แล้วป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สิ้นสุดที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Stop** แล้วป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์ แล้วทำการบันทึกรูปสัญญาณลงในตารางที่ 1

5. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม **FORMAT** เลือกการวัดที่ **Smithchart**

6. ตั้งตำแหน่งอ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม **MARKER** โดยค่าความถี่ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์ และ ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

7. บันทึกค่าที่ได้จากการทดลองในข้อ 6



START = Hz

STOP = Hz

รูปที่ ก.9 แผนภาพสมิตชาร์คค่าอิมพีแดนซ์

ตารางที่ ก.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

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

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำถามท้ายการทดลอง

1. กำหนดให้ค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุของสายนำสัญญาณมีค่าเท่ากับ $1.119 \mu\text{H/m}$ และ 12.3 pF/m จงคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ
2. ทำไมจึงต้องออกแบบสายอากาศให้มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณ



การทดลองที่ 4

การทดสอบวางวัสดุต่างๆ บนสายอากาศ

วัตถุประสงค์

1. สามารถอธิบายผลจากการทดสอบวางวัสดุต่างๆบนสายอากาศได้
2. สามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศได้

เครื่องมือและอุปกรณ์

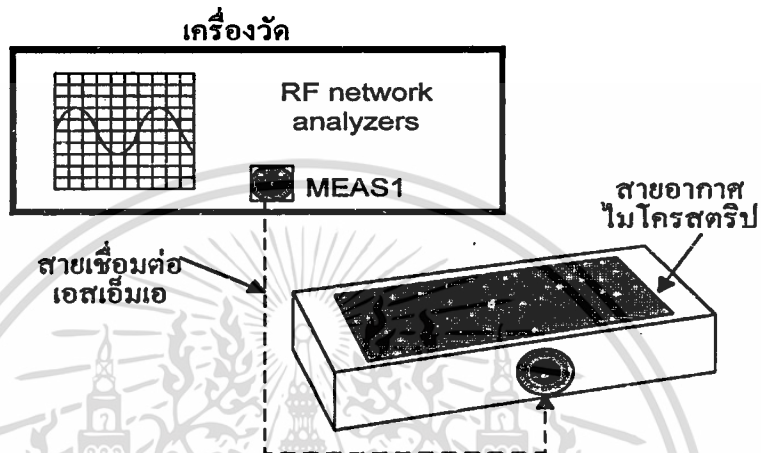
ชื่ออุปกรณ์		
เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF network analyzers)	1	เครื่อง
สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	1	ตัว
แผ่นกระดาษ (ขนาด 20x12x0.2 ซม.)	1	แผ่น
แผ่นแก้ว (ขนาด 20x12x0.2 ซม.)	1	แผ่น
แผ่นพลาสติก (ขนาด 20x12x0.2 ซม.)	1	แผ่น
อีพอกซี (ขนาด 20x12x0.2 ซม.)	1	แผ่น
สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (SMA connector)	1	เส้น
แท่นสำหรับปรับเลื่อนวัสดุทดสอบ		

ทฤษฎี และหลักการ

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยจะใช้สายอากาศที่ออกแบบด้วยค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวนเท่ากับ 3 ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิร์ตซ์ การทดสอบจะใช้วัสดุอื่นๆ มาวางอยู่บนสายอากาศไมโครสตริป วัสดุที่ใช้เป็นกระดาษ แก้ว อีพอกซี (Epoxy) และพลาสติก วางอยู่บนสายอากาศ และมีการปรับระยะความสูงจากวัสดุถึงตัวสายอากาศที่นำมาทดสอบ ซึ่งค่าระยะความสูงนี้จะมีค่าตามค่าความยาวคลื่นที่ขนาดต่างๆ แล้วทำการวัดค่าต่างๆ ของสายอากาศที่จุดระยะห่างนั้นๆ ต่อไป

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูป ก.10



รูปที่ ก.10 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (MEAS 1)
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม **MEAS 1** แล้วเลือก **Reflection**
4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด เริ่มจากกดปุ่ม **FREQ** เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Start** แล้วป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สิ้นสุดที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Stop** แล้วป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
5. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม **FORMAT** เลือกการวัดที่ **Smithchart**
6. ตั้งตำแหน่งอ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม **MARKER** โดยค่าความถี่ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, และ ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

7. นำแท่นปรับเลื่อนที่มีวัสดุที่ต้องการทดสอบมาวางทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จากนั้นทำการเลื่อนปรับระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ ($\lambda = 15$ เซนติเมตร)

8. บันทึกค่าที่ได้จากการทดลองในข้อ 6 และข้อ 7 ที่ตำแหน่งระยะห่างต่างๆ ลงในตาราง

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

ระยะความห่างของวัสดุ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพอกซี
15				
7.5				
5				
3.75				
3				
2.5				
2.14				
1.9				

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ระยะความห่างของ วัตถุ (ซม.)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพอกซี
15				
7.5				
5				
3.75				
3				
2.5				
2.14				
1.9				

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองค่าอิมพีแดนซ์

ระยะความห่างของ วัตถุ (ซม.)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพอกซี
15				
7.5				
5				
3.75				
3				
2.5				
2.14				
1.9				

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

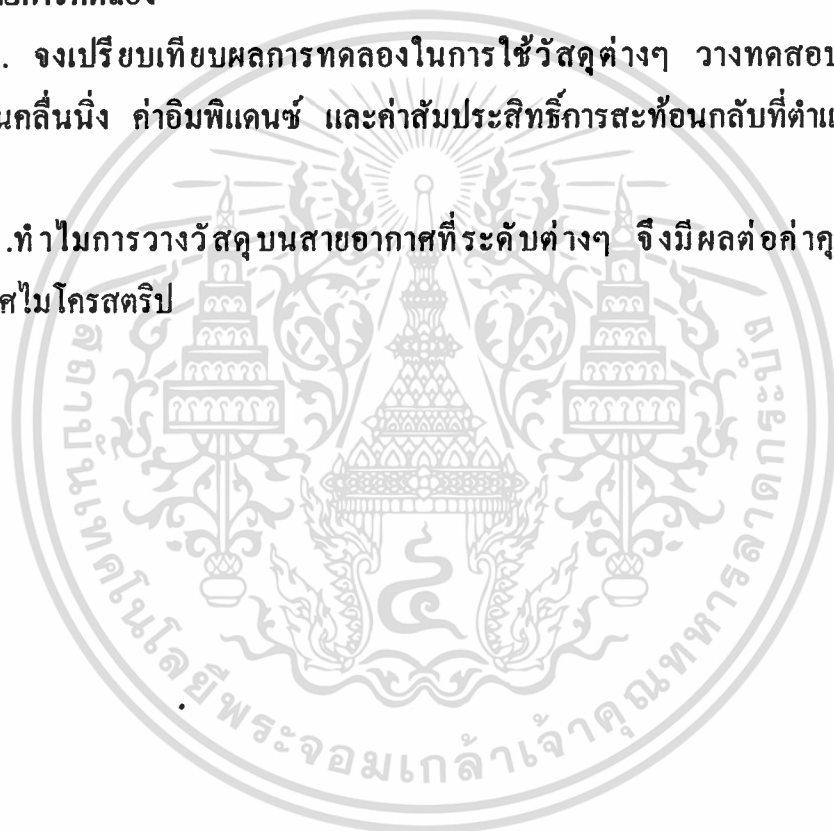
.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงเปรียบเทียบผลการทดลองในการใช้วัสดุต่างๆ วางทดสอบเพื่อวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ตำแหน่งระยะห่างต่างๆ
2. ทำไมการวางวัสดุบนสายอากาศที่ระดับต่างๆ จึงมีผลต่อค่าคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป





ภาคผนวก ข

เฉลยใบงานการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลยการทดลองที่ 1

เรื่อง การวัดการสะท้อนกลับ (Reflection)

วัตถุประสงค์

1. สามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับได้
2. สามารถวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปได้

เครื่องมือ และอุปกรณ์

ชื่ออุปกรณ์		
เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF network analyzers)	1	เครื่อง
สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	1	ตัว
สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (SMA connector line)	1	เส้น

ทฤษฎี และหลักการ

การสะท้อนกลับจากภาวะตัวความต้านทาน

การต่อสายนำสัญญาณด้วยตัวภาวะที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Z_0) ทำให้เกิดการสมดุลทางอิมพีแดนซ์ (Matching impedance) จึงไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณ และกำลังงานสูญเสียเป็นความร้อนที่ตัวภาวะความต้านทาน ส่วนการต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปิด (ลัดวงจร) หรือแบบเปิด (เปิดวงจร) จะเกิดการสะท้อนกลับของกำลังงานทั้งหมดดังรูปที่ 1

การต่อปลายสายด้วยตัวภาวะความต้านทานซึ่งไม่ใช่ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนั้น ผลที่ได้คือ กำลังงานจะถูกแบ่งเป็นสองส่วน โดยส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับตามสาย และอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียที่ตัวภาวะเป็นความร้อน ในส่วนกำลังที่สะท้อนกลับจะมีปริมาณเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน (Voltage reflection coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

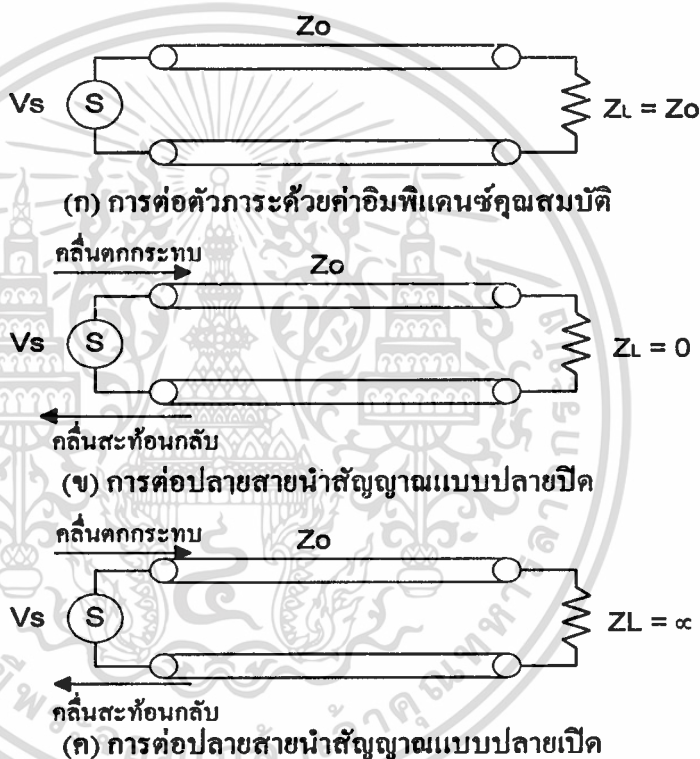
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

V_r = แรงดันสะท้อนกลับ, โวลต์

V_i = แรงดันตกกระทบ, โวลต์



รูปที่ ข.1 การต่อภาระความต้านทาน

จากสมการที่ ข.1 ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันเป็นบวก แสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกัน แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบแรงดันสะท้อนกลับจะมีเฟสตรงข้ามกัน การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของคลื่นแรงดันสะท้อนกลับได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสะท้อนกลับ} = \Gamma \times 100 \quad (\%) \quad (\text{ข.2})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานหาได้จากแรงดันขงกำลังสองหารด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ Z_0 .

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

ที่ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับแรงดันของกำลังงาน (Power reflection coefficient) จะมีค่าเท่ากับกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

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

เมื่อ $\Gamma^2 =$ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกำลังงาน

$P_r =$ กำลังสะท้อนกลับ, วัตต์

$P_i =$ กำลังงานตกกระทบ, วัตต์

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ได้โดย

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

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่างต่อผลรวมระหว่างค่าของตัวภาวะความต้านทานกับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสาย

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

เมื่อ $\Gamma =$ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

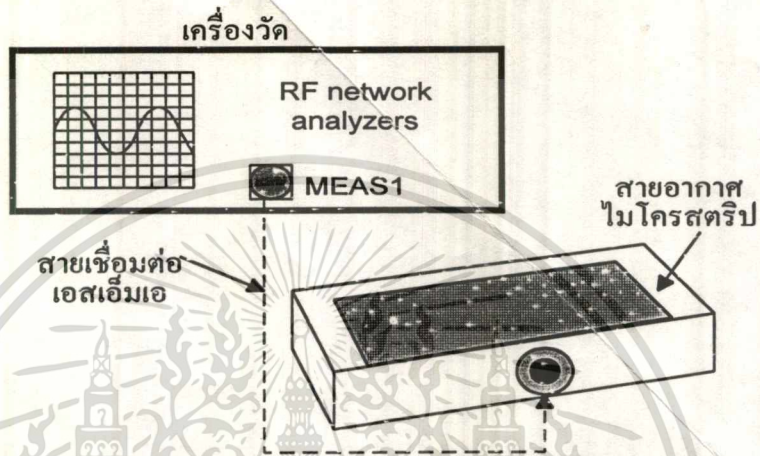
$Z_L =$ ภาวะอิมพีแดนซ์, โอห์ม

$Z_0 =$ อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณ, โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูป



รูปที่ ข.2 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (MEAS 1)

3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม **MEAS 1**

4. เลือกการวัดสะท้อนกลับ (Reflection) โดยเลือกที่ **Reflection**

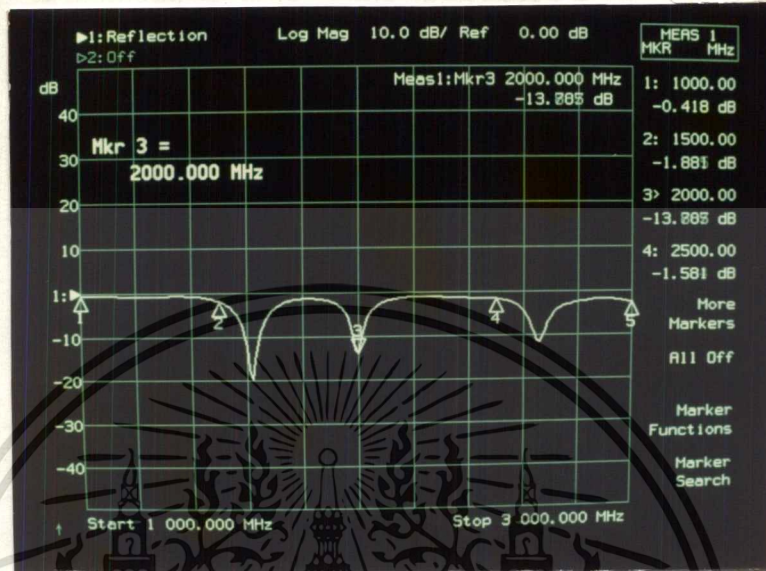
5. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด กดปุ่ม **FREQ** เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Start** ป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สุดท้ายที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Stop** ป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์

6. สังเกตรูปสัญญาณที่ได้จากจอภาพแสดงผล ทำการปรับมุมมองการแสดงผลขนาดรูปสัญญาณให้สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนขึ้น 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำออกไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 7 ลงในตารางที่ ข.1 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



รูปที่ ข.3 สัญญาณสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

ตารางที่ ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)
1 กิกะเฮิรตซ์	-0.518
1.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.572
2 กิกะเฮิรตซ์	-15.890
2.5 กิกะเฮิรตซ์	-1.552
3 กิกะเฮิรตซ์	-2.320

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าที่ระดับความถี่ที่ทดสอบ ที่ค่า 2 กิโลเฮิรตซ์ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสูงกว่าที่ความถี่อื่นๆ

คำถามท้ายการทดลอง

1.จงอธิบายว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเกิดขึ้นได้อย่างไร

ตอบ เกิดจากการต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาระที่มีค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายอากาศ จึงทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณ และคลื่นกำลังงานสูญเสียเป็นความร้อนที่ตัวภาระ

2.กำหนดให้ค่าแรงดันตกกระทบเท่ากับ 30 โวลต์ และที่ค่าแรงดันสะท้อนกลับมีค่าเท่ากับ 13.5 โวลต์. จงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน และเปอร์เซ็นต์การสะท้อนกลับของกำลังงาน

ตอบ

วิธีทำ

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

$$\Gamma = \frac{13.5}{30}$$

$$\Gamma = 0.45$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ} = 0.45$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์แรงดันสะท้อนกลับ} = \Gamma \times 100$$

$$= 0.45 \times 100$$

$$= 45 \%$$

Ans

เฉลยการทดลองที่ 2

เรื่อง การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio)

วัตถุประสงค์

1. สามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้
2. สามารถวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไมโครสตริปได้

เครื่องมือ และอุปกรณ์

ชื่ออุปกรณ์

เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF network analyzers)	1	เครื่อง
สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	1	ตัว
สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (SMA connector)	1	เส้น

ทฤษฎี และหลักการ

การต่อสายนำสัญญาณด้วยตัวภาหะความต้านทานที่มีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์
คุณสมบัติ (Z_0) ดังรูปที่ ข.4 (ก) จะเกิดการสะท้อนกลับขึ้น และมีคลื่นนิ่งเพิ่มขึ้นในสาย

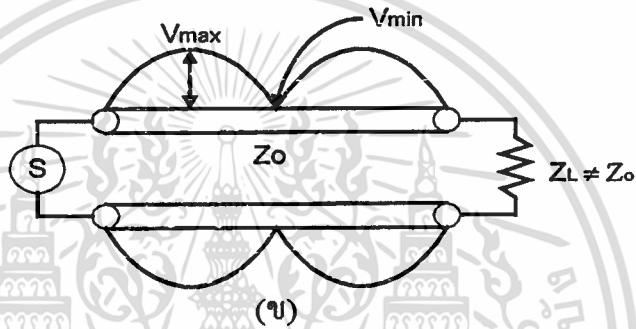
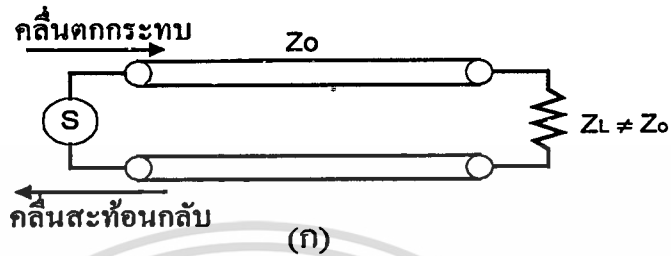
คลื่นนิ่ง คือ คลื่นที่เกิดจากการรวม หรือบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อน
กลับ โดยจุดเชื่อมที่ตำแหน่งเดิมระหว่างจุดต่อที่ตำแหน่งอื่นๆ รูปคลื่นจะเปลี่ยนไปยังจุดสูง
สุด และลดลงไปยังตำแหน่งต่ำสุด ดังรูป ข.4 (ข)

ค่าแรงดันสูงสุด V_{max} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่น
สะท้อนกลับที่มีเฟสตรงกัน

$$V = V_i + V_r \quad (\text{โวลต์}) \quad (\text{ข.7})$$

ค่าแรงดันต่ำสุด V_{min} ของคลื่นนิ่ง ได้มาจากการบวกกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่น
สะท้อนกลับที่มีเฟสตรงข้ามกัน

$$V_{\min} = V_i + V_r \quad (\text{โวลต์}) \quad (\text{ข.8})$$



รูปที่ ข.4 การต่อปลายสายนำสัญญาณด้วยตัวภาระที่ไม่ใช่ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ

อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุด เรียกว่า อัตราส่วนของคลื่นนิ่งแรงดัน (voltage standing wave ratio : VSWR)

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (\text{ข.9})$$

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

อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันแสดงในหน่วย เดซิเบล (dB) จะมีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing wave ratio : SWR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในเท่านั้น การนำออกเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (ข.10) คำ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ได้ดังนี้

$$\text{VSWR} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (\text{ข.11})$$

จะได้ค่า Γ เป็นดังนี้

$$|\Gamma| = \frac{\text{VSWR} - 1}{\text{VSWR} + 1} \quad (\text{dB}) \quad (\text{ข.12})$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน กับ Z_L และ Z_0 สามารถหาได้โดย

$$\text{VSWR} = \frac{Z_L}{Z_0} \quad (\text{ข.13})$$

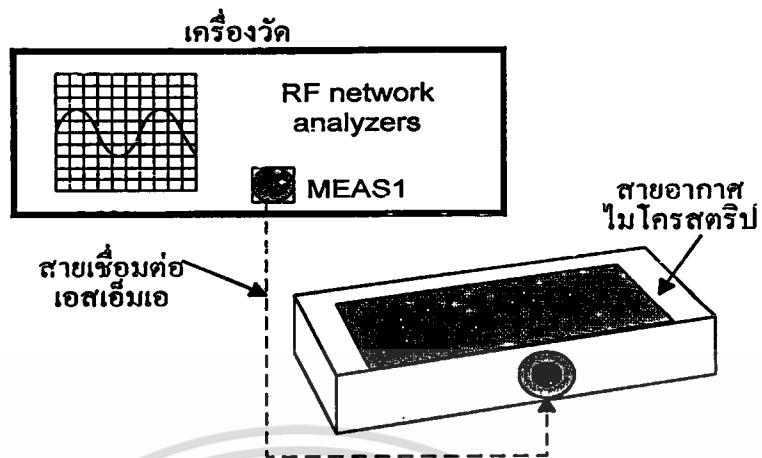
เมื่อ $Z_L > Z_0$

$$\text{VSWR} = \frac{Z_0}{Z_L} \quad (\text{ข.14})$$

เมื่อ $Z_L < Z_0$

ลำดับขั้นการทดลอง

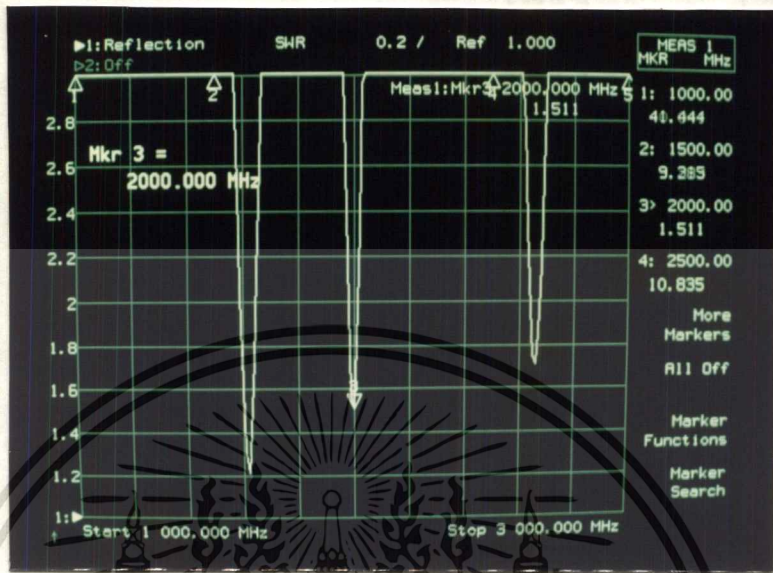
1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริบเข้ากับเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่ง ดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ข.5 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (MEAS 1)
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม **MEAS 1** แล้วเลือก **Reflection**
4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด เริ่มจากกดปุ่ม **FREQ** เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Start** แล้วป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สิ้นสุดที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Stop** แล้วป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
5. เลือกการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) โดยกดปุ่ม **FORMAT** จากนั้นกดปุ่มเลือกการวัดที่ **SWR** สังเกตรูปสัญญาณแล้วบันทึกผลการทดลอง
6. 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

7. บันทึกผลที่ได้จากการทดลองลงในตารางที่ ข.2



รูปที่ ข.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

ตารางที่ ข.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)
1 กิกะเฮิรตซ์	34.219
1.5 กิกะเฮิรตซ์	11.202
2 กิกะเฮิรตซ์	1.546
2.5 กิกะเฮิรตซ์	10.704
3 กิกะเฮิรตซ์	7.076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะพบ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะมีค่าต่ำสุดที่ความถี่ที่ทดสอบมีค่าเท่ากับ 2 กิกะเฮิรตซ์

คำถามท้ายการทดลอง

1. ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเกิดขึ้นได้อย่างไร

ตอบ คลื่นนิ่งเกิดจากการรวมกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับ โดยมีจุดโนดจะอยู่กับที่ระหว่างจุดโนดทั้งหลาย ซึ่งลูกคลื่นจะเปลี่ยนขึ้นไปจนถึงจุดสูงสุดและลดลงจนถึงจุดต่ำสุด คลื่นนิ่งจะสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ความถี่ของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับมีเฟสตรงกัน

2. กำหนดให้คลื่นนิ่งมีค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ 12 โวลต์ และค่าแรงดันต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 4.7 โวลต์ จงคำนวณหาอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ตอบ

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{จาก } VSWR &= \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \\ &= \frac{12}{4.7} \\ &= 2.553 \end{aligned}$$

อัตราส่วนคลื่นนิ่ง = 2.553 เท่า

Ans

เฉลยการทดลองที่ 3

เรื่อง การวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ
2. สามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดค่าอิมพีแดนซ์ได้
3. สามารถวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปได้

เครื่องมือ และอุปกรณ์

ชื่ออุปกรณ์		
เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF network analyzers)	1	เครื่อง
สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	1	ตัว
สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (SMA connector line)	1	เส้น

ทฤษฎี และหลักการ

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

การหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งใดๆ บนสายนำสัญญาณหาได้โดยใช้ค่าแรงดันรวมที่จุดนั้นหารด้วยค่ากระแสรวมที่จุดเดียวกันนั้น

$$Z(\text{ที่ตำแหน่งใดๆ}) = \frac{V(\text{ณ ตำแหน่งนั้น})}{I(\text{ณ ตำแหน่งนั้น})} \quad (\text{ข.15})$$

คลื่นไฟฟ้าเดินทางไปตามสายนำสัญญาณด้วยความเร็วที่คิดต่อหนึ่งหน่วยความยาวเท่านั้น ณ ช่วงเวลาขณะนั้น ดังนั้น อิมพีแดนซ์ที่ได้จึงเป็นอิมพีแดนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายนำสัญญาณนั้น และมีค่าตามสมการ

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{โอห์ม} \quad (\text{ข.16})$$

ค่าอัตราส่วนจากสูตรข้างต้นที่กล่าวมา มีความหมายอย่างยิ่งต่อสายนำสัญญาณไม่ว่าจะมีความยาวเพียงใดก็ตาม ที่เวลาหนึ่งๆ คลื่นที่ผ่านจะมีผลต่อความยาวหนึ่งหน่วยเท่านั้น และแต่ละหนึ่งหน่วยความยาว (Unit length) จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานได้จากสูตรข้างต้นเสมอ โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้ Z ตำแหน่งใดบนสายนำสัญญาณ มีชื่อเรียกกันว่า ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ สัญลักษณ์ คือ Z_0 ดังนั้น ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณแบบแท่งตัวนำคู่ขนานจะแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{โอห์ม} \quad (\text{ข.17})$$

การต่อสายนำสัญญาณด้วยตัวการที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ (Z_0) ทำให้เกิดการสมดุลทางอิมพีแดนซ์ (matching impedence) จึงไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นสัญญาณ และกำลังงานสูญเสียเป็นความร้อนที่ตัวการความต้านทาน ส่วนการต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปิด (ลัดวงจร) หรือแบบเปิด (เปิดวงจร) จะเกิดการสะท้อนกลับของกำลังงานทั้งหมดดังรูปที่ ก.7

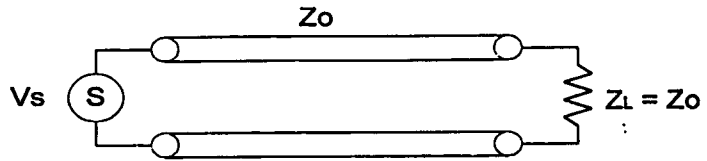
การต่อปลายสายด้วยตัวการความต้านทานซึ่งไม่ใช่ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายผลที่ได้คือ กำลังงานจะถูกแบ่งเป็นสองส่วน โดยส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับตามสาย และอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียที่ตัวการเป็นความร้อน ในส่วนกำลังที่สะท้อนกลับจะมีปริมาณเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน (voltage reflection coefficient)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \quad (\text{ข.18})$$

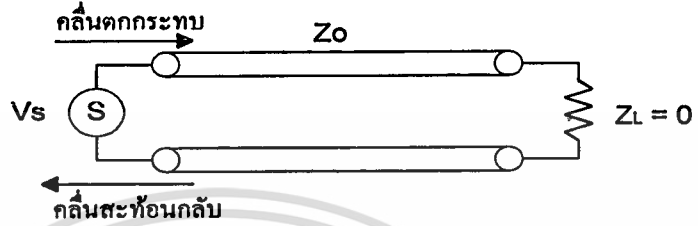
เมื่อ Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

V_r = แรงดันสะท้อนกลับ, โวลต์

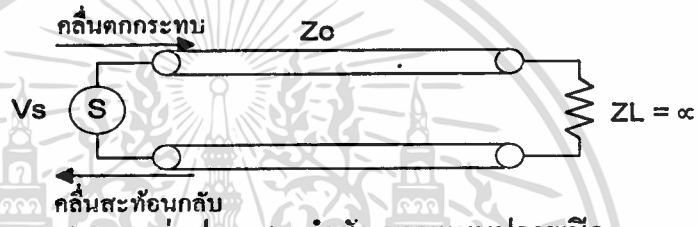
V_i = แรงดันตกกระทบ, โวลต์



(ก) การต่อตัวภาวะด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ



(ข) การต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปลายปิด



(ค) การต่อปลายสายนำสัญญาณแบบปลายเปิด

รูปที่ ข.7 การต่อภาวะความต้านทานแบบต่างๆ

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดันยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่างต่อผลรวมระหว่างภาวะกับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสาย

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

(ข.19)

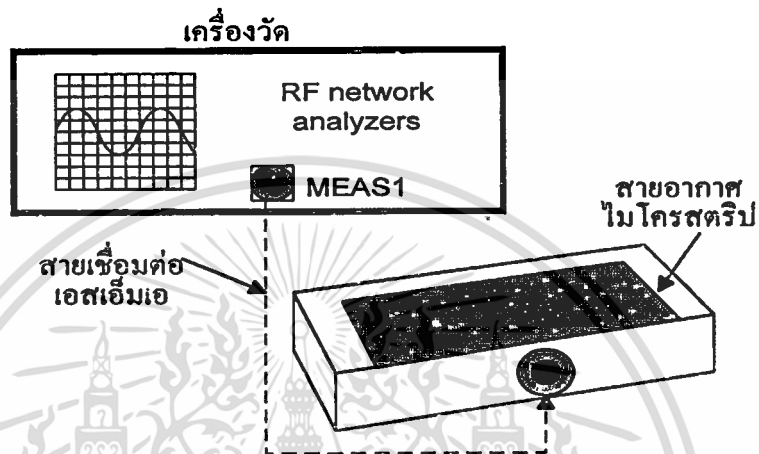
เมื่อ Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับแรงดัน

Z_L = ภาวะอิมพีแดนซ์, โห้้ม

Z_0 = อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณ, โห้้ม

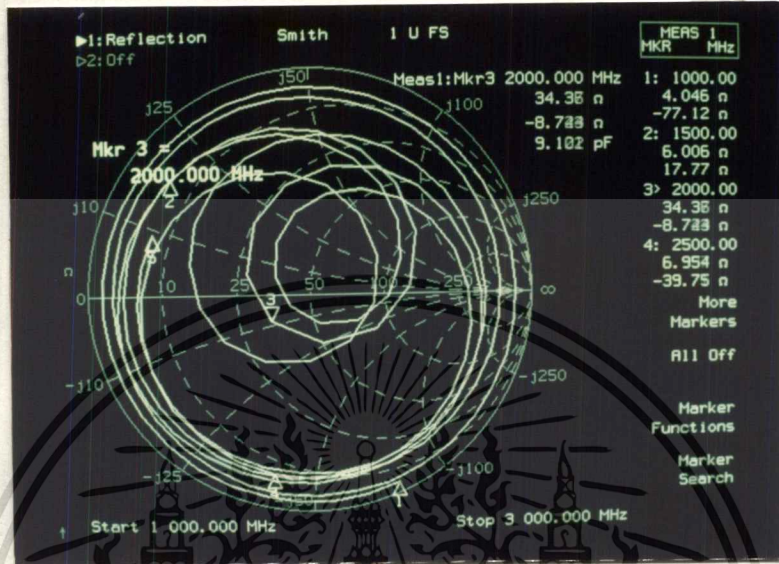
ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูป



รูปที่ ข.8 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (MEAS 1)
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม **MEAS1** แล้วเลือก **Reflection**
4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด เริ่มจากกดปุ่ม **FREQ** เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Start** แล้วป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สิ้นสุดที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Stop** แล้วป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์ แล้วทำการบันทึกรูปสัญญาณลงในตารางที่ 1
5. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม **FORMAT** เลือกการวัดที่ **Smithchart**
6. ตั้งตำแหน่งอ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม **MARKER** โดยค่าความถี่ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์ และ ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ
7. บันทึกค่าที่ได้จากการทดลองในข้อ 6



รูปที่ ข.9 แผนภาพสมิตชาร์ตค่าอิมพีแดนซ์

ตารางที่ ข.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ความถี่ที่ทดสอบ	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
1 กิกะเฮิรตซ์	4.795
1.5 กิกะเฮิรตซ์	5.230
2 กิกะเฮิรตซ์	37.04
2.5 กิกะเฮิรตซ์	7.817
3 กิกะเฮิรตซ์	7.489

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะพบว่าที่ค่าความถี่ที่ทดสอบมีค่าเท่ากับ 2 กิกะเฮิรตซ์ จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงสุด

คำถามท้ายการทดลอง

- กำหนดให้ค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุของสายนำสัญญาณมีค่าเท่ากับ 1.119 $\mu\text{H/m}$ และ 12.3 pF/m จงคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ

ตอบ

วิธีทำ

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$Z = \sqrt{\frac{1.119 \times 10^{-6}}{12.3 \times 10^{-12}}}$$

$$Z = 301.6$$

โอห์ม

Ans

- ทำไมจึงต้องออกแบบสายอากาศให้มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณ

ตอบ สาเหตุที่ต้องออกแบบสายอากาศให้มีค่าอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของสายอากาศนั้น เพราะจะทำให้คลื่นจากสายอากาศสามารถแพร่กระจายไปได้ดี และมีประสิทธิภาพสูงสุด

เฉลยการทดลองที่ 4

การทดสอบวางวัสดุต่างๆ บนสายอากาศ

วัตถุประสงค์

1. สามารถอธิบายผลจากการทดสอบวางวัสดุต่างๆบนสายอากาศได้
2. สามารถใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศได้

เครื่องมือและอุปกรณ์

ชื่ออุปกรณ์

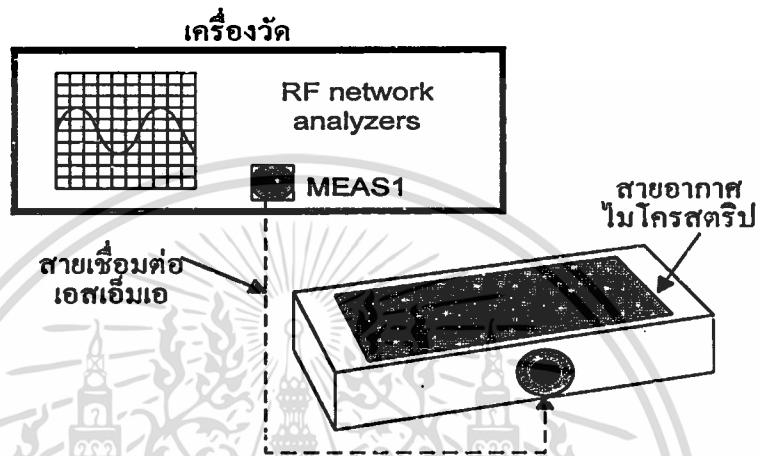
เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายความถี่วิทยุ (RF network analyzers)	1	เครื่อง
สายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม	1	ตัว
แผ่นกระดาษ (ขนาด 20x12x0.2 ซม.)	1	แผ่น
แผ่นแก้ว (ขนาด 20x12x0.2 ซม.)	1	แผ่น
แผ่นพลาสติก (ขนาด 20x12x0.2 ซม.)	1	แผ่น
อีพอกซี (ขนาด 20x12x0.2 ซม.)	1	แผ่น
สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ (SMA connector)	1	เส้น
แท่นสำหรับปรับเลื่อนวัสดุทดสอบ		

ทฤษฎี และหลักการ

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยจะใช้สายอากาศที่ออกแบบด้วยค่าคงที่สัมพัทธ์ของฉนวนเท่ากับ 3 ความถี่ใช้งาน 2 กิกะเฮิรตซ์ การทดสอบจะใช้วัสดุอื่นๆ มาวางอยู่บนสายอากาศไมโครสตริป วัสดุที่ใช้เป็นกระดาษ แก้ว อีพอกซี (Epoxy) และพลาสติก วางอยู่บนสายอากาศ และมีการปรับระยะความสูงจากวัสดุถึงตัวสายอากาศที่นำมาทดสอบ ซึ่งค่าระยะความสูงนี้จะมีค่าตามค่าความยาวคลื่นที่ขนาดต่างๆ แล้วทำการวัดค่าต่างๆ ของสายอากาศที่จุดระยะห่างนั้นๆ ต่อไป

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้ช่องการวัดที่หนึ่งใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอ ดังรูป ข.10



รูปที่ ข.10 การต่อสายอากาศกับเครื่องวัด

2. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศไมโครสตริปที่จะทำการวัดเข้ากับเครื่องวัด โดยใช้สายเชื่อมต่อแบบเอสเอ็มเอเข้าที่ช่องวัดที่หนึ่ง (MEAS 1)
3. เลือกการวัดที่ช่องการวัดที่หนึ่ง โดยกดปุ่ม **MEAS:1** แล้วเลือก **Reflection**
4. ทำการตั้งย่านความถี่ที่ต้องการวัด เริ่มจากกดปุ่ม **FREQ** เพื่อกำหนดความถี่ เลือกความถี่เริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Start** แล้วป้อนความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และเลือกความถี่สิ้นสุดที่ 3 กิกะเฮิรตซ์ โดยเลือก **Stop** แล้วป้อนความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
5. เลือกการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยกดปุ่ม **FORMAT** เลือกการวัดที่ **Smithchart**
6. ตั้งตำแหน่งอ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ โดยกดปุ่ม **MARKER** โดยค่าความถี่ตำแหน่งที่ 1 = 1 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 2 = 1.5 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 3 = 2 กิกะเฮิรตซ์, ตำแหน่งที่ 4 = 2.5 กิกะเฮิรตซ์, และ ตำแหน่งที่ 5 = 3 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

7. นำแท่นปรับเลื่อนที่มีวัสดุที่ต้องการทดสอบมาวางทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จากนั้นทำการเลื่อนปรับระยะห่างตามค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่เริ่มจากค่า $\lambda/1$ จนถึง $\lambda/8$ ตามลำดับ ($\lambda = 15$ เซนติเมตร)

8. บันทึกค่าที่ได้จากการทดลองในข้อ 6 และข้อ 7 ที่ตำแหน่งระยะห่างต่างๆ ลงในตาราง

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

ระยะความห่าง ของวัสดุ (ซม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (dB)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพอกซี
15	-13.487	-13.642	-13.426	-14.296
7.5	-13.541	-13.7.1	-13.623	-14.320
5	-13.520	-13.794	-13.546	-14.335
3.75	-13.584	-13.752	-13.610	-14.351
3	-13.645	-13.725	-13.646	-14.382
2.5	-13.674	-13.746	-13.652	-14.435
2.14	-13.654	-13.775	-13.774	-14.612
1.9	-13.691	-14.375	-13.751	-14.812

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ระยะความห่างของ วัสดุ (ซม.)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (เท่า)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพอกซี
15	1.537	1.535	1.536	1.477
7.5	1.542	1.532	1.535	1.475
5	1.539	1.528	1.539	1.475
3.75	1.539	1.529	1.539	1.472
3	1.538	1.532	1.538	1.472
2.5	1.535	1.533	1.536	1.467
2.14	1.530	1.521	1.531	1.457
1.9	1.527	1.489	1.527	1.444

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองค่าอิมพีแดนซ์

ระยะความห่างของ วัสดุ (ซม.)	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)			
	กระดาษ	แก้ว	พลาสติก	อีพอกซี
15	35.21	35.30	35.02	36.78
7.5	35.25	35.57	35.42	36.82
5	35.34	35.55	35.47	36.75
3.75	35.49	35.27	35.32	36.67
3	35.37	34.98	35.26	36.64
2.5	35.37	34.72	35.17	36.51
2.14	35.14	34.30	35.12	36.47
1.9	35.16	34.72	34.92	36.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะพบว่า การวางวัสดุบนสายอากาศจะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าการสะท้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่ระดับการวางวัสดุที่มีระดับต่ำ ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าการสะท้อนกลับจะมีค่าสูง ส่วนค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะมีค่าต่ำ ทั้งหมดเป็นผลมาจากการวางวัสดุบนสายอากาศทำให้การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้นไม่สามารถกระจายไปได้ดี

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงเปรียบเทียบผลการทดลองในการใช้วัสดุต่างๆ วางทดสอบเพื่อวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ตำแหน่งระยะห่างต่างๆ

ตอบ จากการที่ทดสอบวางวัสดุที่เป็นแก้ว กระดาษ พลาสติก และอิพอกซี วัสดุเหล่านี้จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติของสายอากาศดังนี้

ค่าอิมพีแดนซ์จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่การวางวัสดุที่ระดับสูงเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะสูงที่ตรงตำแหน่งการวางวัสดุที่ตำแหน่งต่ำๆ และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อระดับความสูงของวัสดุเพิ่มขึ้น และจะลดลงเล็กน้อยที่ระดับความสูงสุดท้าย

ค่าการสะท้อนกลับจะมีค่าสูงที่ระดับของการวางวัสดุที่ระดับต่ำๆ และจะลดลงที่ระดับความสูงของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น

2. ทำไมการวางวัสดุบนสายอากาศที่ระดับต่างๆ จึงมีผลต่อค่าคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป

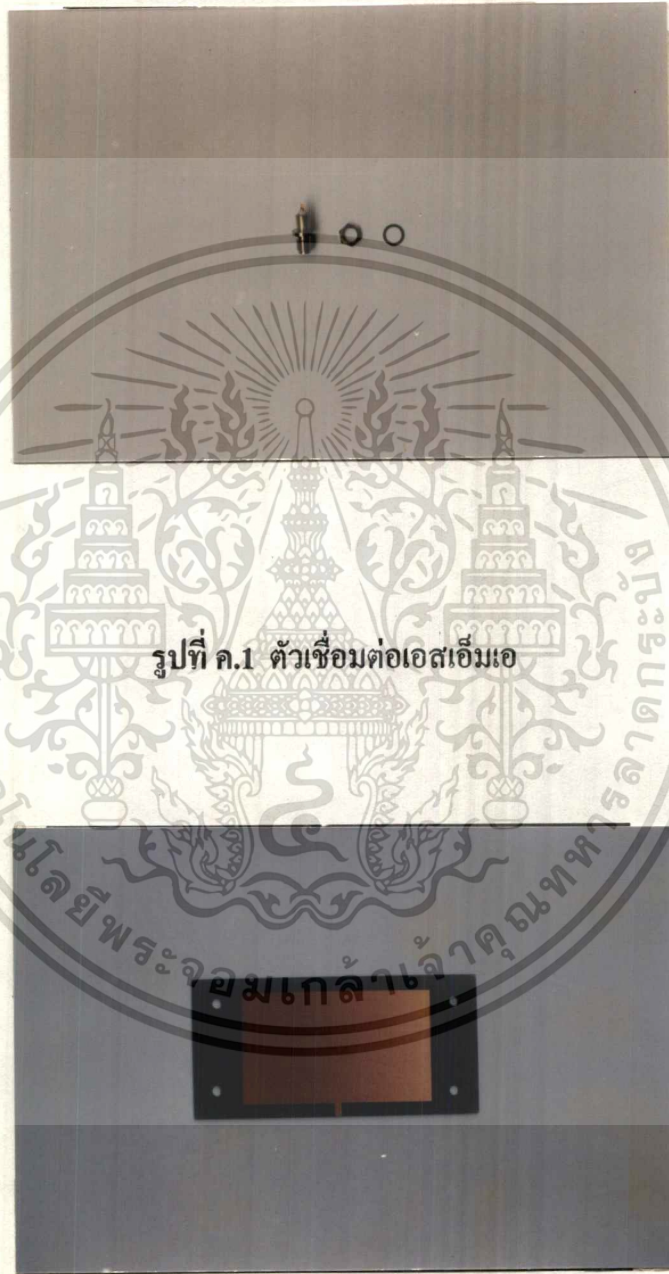
ตอบ เพราะการวางวัสดุบนสายอากาศจะมีผลต่อการแพร่กระจายของคลื่น ซึ่งถ้ามีวัสดุมาวางบนสายอากาศคลื่นจะไม่สามารถแพร่กระจายไปได้ดี



ภาคผนวก ค

รูปต้นแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบตีเหลื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.1 ตัวเชื่อมต่อเอสเอ็มเอ

รูปที่ ค.2 แผ่นสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.3 สาขาอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมที่ลงกล่องแล้ว

รูปที่ ค.4 แทนปรับเปลี่ยนวัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Characteristics of Insulating Materials*

Material Composition	Dielectric Constant ¹ at				Dissipation Factor ² 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
	7(°C)	10 ³	10 ⁶	3 × 10 ⁹	10 ⁶	3 × 10 ⁹					
Ceramics:											
Aluminum oxide	25	8.80	8.80	8.79	—	0.00033	0.00030	0.0010	—	—	—
Barium titanate ³	26	14.3	—	6.0	100	0.0105	—	0.30	10 ¹² –10 ¹³	—	0.1
Calcium titanate	25	167.7	167.7	165	—	0.0002	—	0.0023	10 ¹² –10 ¹⁴	1400–1430	<0.1
Magnesium oxide	25	9.65	9.65	—	—	<0.0003	<0.0003	—	—	1510	—
Magnesium silicate	25	5.97	5.96	5.90	—	0.0004	0.0004	0.0012	—	—	0.1–1
Magnesium titanate	25	13.9	13.9	13.8	13.7	0.0004	0.0005	0.0017	>10 ¹⁴	1350	—
Oxides of aluminum, silicon, magnesium, calcium, barium	24	6.04	—	5.90	—	0.0011	—	0.0024	—	—	—
Porcelain (dry process)	25	5.08	5.04	—	—	0.0075	0.0078	—	—	1325	—
Stratite 410 ⁴	25	5.77	5.77	5.7	—	0.0007	0.0006	0.00089	—	—	—
Strontium titanate	25	232	232	—	—	0.0002	0.0001	—	10 ¹² –10 ¹⁴	—	0.1
Titanium dioxide (rutile)	26	100	100	—	—	0.0003	0.00025	—	—	1510	—
Glasses:											
Iron-sealing glass	24	8.30	8.20	7.99	7.84	0.0005	0.0009	0.00199	10 ¹⁰ at 250°	484	poor
Soda-borosilicate	25	4.84	4.84	4.82	4.65	0.0036	0.0030	0.0054	7 × 10 ⁷ at 250°	693	—
100% silicon dioxide (fused quartz)	25	3.78	3.78	3.78	3.78	0.0001	0.0002	0.00006	>10 ¹⁸	1667	—
Plastics:											
Alkyd resin	25	4.76	4.55	4.50	—	0.0149	0.0138	0.0108	—	—	—
Cellulose acetate-butyrate, plasticized	26	3.30	3.08	2.91	—	0.018	0.017	0.028	—	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	3 × 10 ¹²	>125	1.2
Cross-linked polystyrene	25	2.58	2.58	2.58	—	0.0016	0.0020	0.0019	—	—	—
Epoxy resin (Araldite CN-501)	25	3.62	3.35	3.09	—	0.019	0.034	0.027	>3.8 × 10 ⁷	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	—	99 (stable)	0.4–0.6
Melamine-formaldehyde, 55% filler	26	5.75	5.5	—	—	0.0115	0.020	—	—	—	0.6
Phenol-formaldehyde (Bakelite BM 120)	25	4.36	3.95	3.70	3.55	0.0260	0.0380	0.0390	10 ¹¹	<135 (distortion)	<0.6
Phenol-formaldehyde, 50% paper											
laminated	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	25	2.96	—	—	—	0.010	—	—	2 × 10 ¹⁶	135 (deflection)	—
Polychlorotrifluoroethylene	25	2.42	2.32	2.29	2.28	0.0082	—	0.0028	10 ¹⁵	—	—

เอกสารนี้เป็น... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25	Polyethylene	2.26	2.26	2.26	2.26	<0.0002	0.0002	0.00031	0.0006	1200 (0.0037)	10 ¹⁷	19 × 10 ⁻⁵ (varies)	95-105 (distortion)	0.03
22	Polyethylene-terephthalate	2.98	2.52	2.51	2.5	0.016	0.0090	0.0075	0.0083	4000 (0.0027)	—	—	—	—
22	Polyethyleneterephthalate	2.55	2.52	2.51	2.5	0.0090	0.0090	0.0075	0.0083	4000 (0.0027)	—	—	—	—
25	Polyhexamethylene-sebammide (nylon)	3.14	3.0	2.84	2.73	0.0218	0.0200	0.0117	0.0105	400 (0.1257)	8 × 10 ¹⁴	10.3 × 10 ⁻⁵	60 (distortion) 65 (distortion)	low 1.5
—	Polyamide	3.4	—	—	—	0.003	—	—	—	570	—	—	—	—
25	Polybutylene	2.23	2.23	2.23	2.23	0.0011	0.0003	0.00047	0.0003	640 (0.0107)	—	—	25 (distortion)	low
20	Polymer of 95% vinyl-chloride, 5% vinyl-acetate	2.90	2.8	2.74	—	0.0150	0.0080	0.0059	0.0059	990 (0.0707)	>5 × 10 ¹⁶	8-9 × 10 ⁻⁵	70-75 (distortion)	—
37	Polymethyl methacrylate	2.76	2.60	2.60	—	0.0140	0.0057	0.0057	—	—	—	—	—	—
—	Polypentenylene oxide	2.55	—	—	—	0.0007	—	0.0011	—	—	—	—	—	—
—	Polypyrrolene	2.55	—	—	—	<0.0005	—	0.0011	—	—	—	—	—	—
25	Polyurethane	2.56	2.55	2.55	2.55	0.00007	<0.0001	0.00033	0.0012	500-700 (0.1257)	10 ¹⁶	6-8 × 10 ⁻⁵	195 (deflection) 82 (distortion)	0.05
22	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	2.1	2.1	2.1	2.08	<0.0002	<0.0002	0.00015	0.0006	1000-2000 (0.0057-0.0127)	10 ¹⁷	9.0 × 10 ⁻⁵	66 (distortion) (stable to 300)	0.00
14	Polyvinylcyclohexane	2.25	2.25	2.25	—	<0.0002	<0.0002	0.00018	—	—	—	—	—	—
26	Polyvinyl formal	2.92	2.80	2.76	2.7	0.019	0.013	0.0113	0.0115	860 (0.0347)	>5 × 10 ¹⁶	7.7 × 10 ⁻⁵	190 (deflection)	1.3
—	Polyvinylidene fluoride	6.6	—	—	—	0.17	—	0.0555	—	360 (0.1257) 375 (0.0857)	2 × 10 ¹⁶	12 × 10 ⁻⁵	148 (deflection) 152 (distortion)	2
27	Urethane elastomer	5.65	5.1	4.57	—	0.027	0.050	—	—	450-500 (0.1257)	2 × 10 ¹¹	2.6 × 10 ⁻⁵	—	—
—	Vinylidene-vinyl chloride copolymer	6.5-7.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10-20 × 10 ⁻⁵	—	—
23	100% aniline-formaldehyde (Dilactane-100)	3.18	2.82	2.71	—	0.057	0.0180	0.0072	—	300 (0.1257)	10 ^{14}-10¹⁶}	15.8 × 10 ⁻⁵	150	<0.1
25	100% phenol-formaldehyde	3.58	3.50	3.44	—	0.0061	0.0033	0.0026	—	810 (0.0687)	10 ¹⁶	5.4 × 10 ⁻⁵	125	0.06-0.08
24	100% phenol-formaldehyde	5.4	4.4	3.64	—	0.060	0.077	0.052	—	277 (0.1257)	10 ¹⁴	8.3-13 × 10 ⁻⁵	50 (distortion)	0.42
20	100% polyvinyl-chloride	2.88	2.85	2.84	—	0.0160	0.0081	0.0055	—	400 (0.1257)	10 ¹⁴	6.9 × 10 ⁻⁵	54 (distortion)	0.05-0.15
Organic Liquids:														
25	Aviation gasoline (100 octane)	1.94	1.94	1.92	—	—	0.0001	0.0014	—	—	—	—	—	—
25	Benzene (pure, dried)	2.28	2.28	2.28	2.28	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	—	—	—	—	—
25	Carbon tetrachloride	2.17	2.17	2.17	—	<0.000104	<0.0002	0.0004	—	—	—	—	—	—
25	Ethyl alcohol (absolute)	24.5	23.7	6.5	—	0.090	0.062	0.250	—	—	—	—	—	—
25	Ethylene glycol	41	41	12	—	0.030	0.045	1.00	—	—	—	—	—	—
25	Jet fuel (JP-3)	2.08	2.08	2.04	—	0.0001	—	0.0005	—	—	—	—	—	—
—	Methyl alcohol (absolute analytical grade)	31	31.0	23.9	—	0.20	0.038	0.64	—	—	—	—	—	—
22	Methyl or ethyl siloxane polymer (1000 cs)	2.78	—	2.74	—	<0.0003	—	0.0006	—	—	—	—	—	—
22	Monomeric styrene	2.40	2.40	2.40	—	<0.0003	—	0.0020	—	300 (0.1007)	3 × 10 ¹²	—	—	0.06
26	Transil oil	2.22	2.20	2.18	—	<0.0005	0.0004	0.0028	—	300 (0.1007)	—	—	—	—
25	Vaseline	2.16	2.16	2.16	—	<0.0001	<0.0004	0.00066	—	—	—	—	—	—

Characteristics of Insulating Materials* (cont'd.)

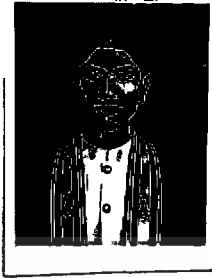
Material Composition	Dielectric Constant ¹ at				Dissipation Factor ¹ at		Dielectric Strength in Volts/Mil at 25°C	DC Volume Resistivity in Ohm-cm at 25°C	Thermal Expansion (Linear) in Parts/°C	Softening Point in °C	Moisture Absorption in Percent
	T(°C)	10 ³	10 ⁶	3 × 10 ⁹	10 ³	3 × 10 ⁹					
Waxes:											
Beeswax, yellow	23	2.53	2.45	2.39	0.0092	0.0075	---	---	---	45-64 (melts)	---
Dichloroanthralenes	23	2.98	2.93	2.89	0.0013	0.0017	---	---	---	35-63 (melts)	nil
Polystyrene	25	2.34	2.30	2.27	0.00133	0.00099	---	---	---	---	---
Vegetable and mineral waxes	25	2.3	2.3	2.25	0.0004	0.00036	---	---	---	57	---
Rubbers:											
Burly rubber	25	2.15	2.15	2.15	0.0010	0.0009	---	---	---	---	---
GR-S rubber	25	2.90	2.82	2.75	0.0120	0.0087	---	2 × 10 ¹⁵	---	---	---
Gutta-percha	25	2.53	2.47	2.40	0.0012	0.00060	---	---	---	---	---
Hevea rubber (pale crepe)	25	2.4	2.4	2.15	0.0018	0.0010	---	---	---	---	---
Hevea rubber, vulcanized (100 pts pale crepe, 6 pts sulfur)	27	2.74	2.42	2.36	0.0046	0.0017	---	---	---	---	---
Neoprene rubber	24	6.26	4.5	4.00	0.008	0.004	0.025	---	---	---	nil
Organic polysulfide, fillers	23	110	30	16	0.39	0.28	0.10	---	---	---	---
Silicone-rubber compound	25	3.20	3.16	3.13	0.0030	0.0007	---	---	---	---	---
Woods:¹											
Balsa wood	26	1.37	1.30	1.22	0.0120	0.0135	0.100	---	---	---	---
Douglas fir	25	1.93	1.88	1.82	0.026	0.033	0.027	---	---	---	---
Douglas fir, plywood	25	1.90	---	---	0.0230	---	0.032	---	---	---	---
Mahogany	25	2.25	2.07	1.88	0.025	0.032	0.025	---	---	---	---
Yellow birch	25	2.70	2.47	2.13	0.029	0.040	0.033	---	---	---	---
Yellow poplar	25	1.75	---	1.50	0.019	0.015	0.017	---	---	---	---
Miscellaneous:											
Amber (fossil resin)	25	2.65	2.6	2.6	0.0056	0.0090	---	Very high	---	260	---
DeKhotinsky cement	23	3.23	---	2.96	0.024	0.021	---	---	9.8 × 10 ⁻³	80-85	---
Gilsonite (99.9% natural bitumen)	26	2.58	2.56	---	0.0016	0.0011	---	---	---	155 (melts)	---
Shellac (natural XL)	26	3.47	3.10	2.86	0.011	0.010	0.0254	---	---	80	low after bloaking
Mica, glass-banded	25	7.39	---	---	0.0013	---	---	---	---	---	---
Mica, glass, titanium dioxide	24	9.0	---	---	0.0026	---	0.0040	---	---	400	<0.5
Ruby mica	26	5.4	5.4	5.4	0.0003	0.0002	0.0003	---	---	---	---
Paper, royalgely	25	2.99	2.77	2.70	0.038	0.066	0.056	---	---	---	---
Selenium (amorphous)	25	6.00	6.00	6.00	<0.0003	<0.0002	0.00018	---	---	---	---
Asbestos fiber-chrysolite paper	25	3.1	---	---	0.025	---	---	---	---	---	---
Sodium chloride (fresh crystals)	25	5.90	---	5.90	<0.0002	---	<0.0005	---	---	---	---

Soil, sandy dry	25	2.59	2.55	2.55	0.017	0.0062	--	--
Soil, loamy dry	25	2.53	2.48	2.44	0.018	0.0011	--	--
Ice (from pure distilled water)	--12	4.15	3.45	3.20	0.12	0.0009	--	--
Freshly fallen snow	--20	1.20	1.20	1.20	0.0215	0.00029	--	--
Hard-packed snow followed by light rain	--6	1.55	--	1.5	0.29	0.0009	--	--
Water (distilled)	25	78.2	78	76.7	0.040	0.157	0.5650	10 ⁴

*Reproduced with permission of the publisher, Howard W. Sams & Company, Indianapolis, Indiana, *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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นายอนุสาร พูลเพ็ง
วัน เดือน ปี เกิด	6 พฤศจิกายน 2517
สถานที่เกิด	ปทุมธานี
ภูมิลำเนาเดิม	20/2 หมู่ 11 ต. เลียบคลองสิบเอ็ด ต. หอนางสามวัง อ. หอนางเสี อ จ. ปทุมธานี 12170
ที่อยู่ปัจจุบัน	20/2 หมู่ 11 ต. เลียบคลองสิบเอ็ด ต. หอนางสามวัง อ. หอนางเสี อ จ. ปทุมธานี 12170
โทรศัพท์	02-9040409
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนวัดโปรยฝน
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนรัชฎ์ธานี
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคปทุมธานี
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคปทุมธานี
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

ผลงานที่ได้รับ

คติพจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สิ่งตีพิมพ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นายประพจน์ แป้นศรี
วัน เดือน ปี เกิด	17 เมษายน 2518
สถานที่เกิด	สุรินทร์
ภูมิลำเนาเดิม	50 มุลศาสตร์ ต. ในเมือง อ.เมือง จ.สุรินทร์ 32000
ที่อยู่ปัจจุบัน	50 มุลศาสตร์ ต. ในเมือง อ.เมือง จ.สุรินทร์ 32000
โทรศัพท์	044-531346
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนเมืองสุรินทร์
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนสุรวิทยาคารสุรินทร์
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับ	-
คติพจน์	เมื่อहनหันามองฟ้า ย่อมไม่เห็น ต้นหญ้าที่เราเหยียบ

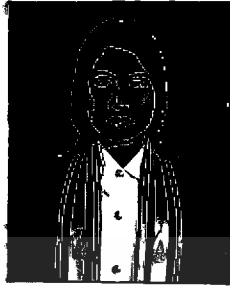
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาโท	นายพิทยา	กันกา
วัน เดือน ปี เกิด	2 มกราคม 2518	
สถานที่เกิด	ลำปาง	
ภูมิลำเนาเดิม	352 หมู่ 10 ต.ชมพู อ.เมือง จ.ลำปาง 52100	
ที่อยู่ปัจจุบัน	352 หมู่ 10 ต.ชมพู อ.เมือง จ.ลำปาง 52100	
โทรศัพท์	054-324486	
ประวัติการศึกษา		
ประถมศึกษา	โรงเรียนอัสสัมชัญลำปาง	
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย	
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคลำปาง	
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคลำปาง	
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม	
ผลงานที่ได้รับ	-	
คติพจน์	ที่ใดมีแสงสว่าง ที่นั้นย่อมมีเงา	

ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นางสาวภาวิณี ปานันตา
วัน เดือน ปี เกิด	28 มีนาคม 2519
สถานที่เกิด	ราชบุรี
ภูมิลำเนาเดิม	433 ถ.ศรีสุริยวงศ์ ต. หน้าเมือง อ. เมือง จ. ราชบุรี 70000
ที่อยู่ปัจจุบัน	433 ถ. ศรีสุริยวงศ์ ต. หน้าเมือง อ. เมือง จ. ราชบุรี 70000
โทรศัพท์	032-310218
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนอนุบาลราชบุรี
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนราชโบริกานุเคราะห์
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาครุศาสตร์ วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับ	-
คติพจน์	ทุกสิ่ง ทุกอย่าง ย่อมมีการเปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, วิศวกรรมไมโครเวฟ, กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539
2. พิชัย ภักดีพานิชเจริญ, ทฤษฎี และการใช้งานความถี่ย่าน ไมโครเวฟ, กรุงเทพมหานคร :สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์
3. Robert E. collin, Antenna and radiowave propagation : McGraw - Hill book company, 1985
4. Y.T.Lo.,S.W.Lee, Antenna handbook, New york : Van nostrand reinhold company, 1988

