

การทดลองบทโกละของวิปและการประยุกต์ใช้บท

นางสาวอมรรัตน์ วัฒนศิริ
นางสาวอมรรัตน์ วัฒนศิริ

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิชาศิลปกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาศิลปกรรมศาสตรบัณฑิต สำนักวิชาศิลปกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยศิลปากร กรุงเทพมหานคร
ปีการศึกษา 2539

CONTRIBUTION



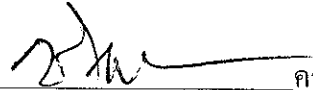
ใบรับรองโครงการทางวิศวกรรม สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เรื่อง การออกแบบไมโครสตริปและการประยุกต์ใช้งาน

โดย นางสาวมนต์ทิพย์ภา อินทราวุธ

นางสาวเนตรนภา สุขวัจน์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

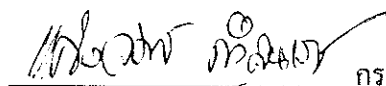
 คณบดี

วันที่ เดือน พ.ศ.2540

คณะกรรมการสอบ

 ประธานกรรมการ
(รศ.ดร. สุราวุธ สุขจิตจร)

 กรรมการ
(อ. สมศักดิ์ อาชิตาการ)

 กรรมการ
(อ. แสงจันทร์ คำลูนเวสารัช)

 กรรมการ
(อ. ธีรศักดิ์ วงศ์สรรค์)

การออกแบบไมโครสตริปและการประยุกต์ใช้งาน

นางสาวมนต์ทิพย์ภา อินทราวุธ
นางสาวเนตรนภา สุขวัจน์

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2539

ชื่อนักศึกษา : นางสาวนตทิพย์ภา อินทราวุธ
 : นางสาวเนตรนภา สุขวัณนี
 ชื่อโครงการ : การออกแบบไมโครสตริปและการประยุกต์ใช้งาน
 สาขาวิชา : วิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
 ที่ปรึกษาโครงการ : อาจารย์รังสรรค์ วงศ์สรรค์
 ปีการศึกษา : 2539

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของไมโครสตริป และ หลักการออกแบบไมโครสตริป เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ และ ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง จากนั้นได้นำเอาทฤษฎีที่ได้ศึกษามานั้นไปทำการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำย่าน UHF โดยออกแบบให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 500 MHz 600 MHz และ 800 MHz และในส่วนของตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางนั้นได้ทำการออกแบบโดยการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของการเชื่อมโยงของสัญญาณให้มีค่าเท่ากับ 15 dB ที่ความถี่ 800 MHz จากนั้นได้ทำการทดลองเพื่อดูผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ และ ผลตอบสนองกำลังงานการคัปปลิงของตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางที่สร้างขึ้น ในขั้นตอนสุดท้ายได้นำผลที่ได้จากการทดลองนั้นไปสรุป และวิเคราะห์เพื่อให้ทราบว่าอุปกรณ์ไมโครสตริปที่สร้างขึ้นนั้นให้ผลตอบสนองตรงตามทฤษฎีหรือไม่ และ องค์กรประกอบใดบ้างที่มีผลต่อผลอุปกรณ์ไมโครสตริป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบิดา และมารดาที่ให้อำนาจ ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน และให้กำลังใจเสมอมา และขอขอบพระคุณท่านอาจารย์รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ที่ให้คำปรึกษา และชี้แนวทางในการทำโครงการครั้งนี้ และที่ขาดเสียไม่ได้คือ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ และให้กำลังใจ ตลอดเวลาที่ทำโครงการ

ผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการ	1
1.2 ขอบเขตของงาน	1
1.3 ขั้นตอนการทำงาน	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎีพื้นฐาน	
2.1 กล่าวนำ	3
2.2 ไมโครสตริป	3
2.3 โครงสร้างและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครสตริป	5
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ	12
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง	16
2.6 สรุป	26
3. การออกแบบไมโครสตริปเพื่อประยุกต์ใช้งานและวิธีการทดลอง	
3.1 กล่าวนำ	27
3.2 ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF	27
3.3 ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง	36
3.4 สรุป	42
4. ผลการทดลอง	
4.1 กล่าวนำ	43

สารบัญ

	หน้า
4.2 ผลการทดลองหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF	43
4.3 ผลการทดลองหาผลตอบสนองกำลังงานการคับปลิงของตัวคับเปลอร์แบบมีทิศทาง	49
4.4 สรุป	50
5. สรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง	
5.1 กล่าวนำ	51
5.2 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง	51
5.3 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง	53
5.4 ประโยชน์ที่ได้จากโครงการ	54
เอกสารอ้างอิง	56
ประวัติผู้เขียน	57

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าของชิ้นส่วนต้นแบบตามวิธีการของ Butterworth ของตัวกรองสัญญาณผ่าน แถบความถี่ต่ำ	15
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ที่ได้จากการคำนวณ	28
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าของส่วนประกอบของไมโครสตริปที่ค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ	28
ตารางที่ 4.1 ผลตอบสนองทางความถี่ เมื่อค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz	43
ตารางที่ 4.2 ผลตอบสนองทางความถี่ เมื่อค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 600 MHz	45
ตารางที่ 4.3 ผลตอบสนองทางความถี่ เมื่อค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 500 MHz	47

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของไมโครสตริปที่มีลักษณะเหมือนเส้นลวดวางอยู่บนแผ่นกราว์นที่ยาวเป็นอนันต์	4
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของไมโครสตริป	5
รูปที่ 2.3 แสดงการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมีการส่งผ่านคลื่นในไมโครสตริป	5
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของไมโครสตริปที่มีค่า W/h ต่างกัน (ก) $W/h \gg 1$ และ (ข) $W/h \ll 1$	9
รูปที่ 2.5 ลักษณะของกระแสและสนามไฟฟ้าในบริเวณที่เกิดสเตป	10
รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของรูปลักษณะสเตปซึ่งมีส่วนประกอบของอิมพีแดนซ์แยกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกัน	11
รูปที่ 2.7 แสดงถึงไมโครสตริปที่ทำการชดเชยการเกิดฟริงกิงคาปาซิแตนซ์เนื่องจากการเกิดสเตป	12
รูปที่ 2.8 ดัชนีแบบ n -section ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำซึ่งมีอินดักเตอร์ k_1 เป็นส่วนแรก	12
รูปที่ 2.9 แสดงผลตอบสนองของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในรูปการลดทอน/ความถี่	13
รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำโดยวิธีการของ Butterworth	15
รูปที่ 2.11 แสดงแถบสตริปที่เกิดการคับปลิงในตัวคับเบิลอร์แบบมีทิศทาง	16
รูปที่ 2.12 พารามิเตอร์สำหรับแถบไมโครสตริปที่เกิดการคับปลิง	18
รูปที่ 2.13 สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายไปตามไมโครสตริปที่เกิดการคับปลิงของสัญญาณในโหมดคู่ และ โหมดคี่	19
รูปที่ 2.14 พารามิเตอร์ที่เข้าของสายส่งสัญญาณที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ Z_0	19
รูปที่ 2.15 แสดงระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อและความกว้างของแถบไมโครสตริปที่เกิดการคับปลิง	25

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.16 แสดงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผลของโหมคคู่และโหมคเดี่ยวในการออกแบบตัวเก็บประจุแบบมีทิศทาง	26
รูปที่ 3.1 ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำที่มีค่าการลดทอนเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz	32
รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์และการต่ออุปกรณ์ในการทดลองหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF	34
รูปที่ 3.3 รูปร่างของไมโครสตริปที่ออกแบบให้มีลักษณะเสมือนเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF	35
รูปที่ 3.4 แสดงการต่อเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF	35
รูปที่ 3.5 แสดงรูปร่างของตัวเก็บประจุแบบมีทิศทางที่ใช้งานที่ความถี่ 800 MHz และมีค่าสัมประสิทธิ์ของการเชื่อมต่อเท่ากับ 15 dB	38
รูปที่ 3.6 แสดงอุปกรณ์และการต่ออุปกรณ์ในการทดลองหาผลตอบสนองกำลังงานการคับปลิงของตัวเก็บประจุแบบมีทิศทาง	39
รูปที่ 3.7 รูปร่างของไมโครสตริปที่ออกแบบให้มีลักษณะเสมือนเป็นตัวเก็บประจุแบบมีทิศทาง ขนาดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง	39
รูปที่ 3.8 แสดงการต่อเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาผลตอบสนองกำลังงานการคับปลิงของตัวเก็บประจุแบบมีทิศทาง	40
รูปที่ 3.9 เครื่อง RF Generator 10 kHz-5.4 GHz ของ MARCINI	40
รูปที่ 3.10 เครื่อง Spectrum Analyzer 9kHz-22 GHz ของ IFR	41
รูปที่ 3.11 เครื่อง Spectrum Analyzer รุ่น COM-120B ของ IFR	41
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่เมื่อออกแบบให้ค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz	44
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่เมื่อออกแบบให้ค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 600 MHz	46
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่เมื่อออกแบบให้ค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 500 MHz	48

บทที่ 1

บทนำ

ไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์สองหน้า และ ใช้ในการเชื่อมโยงชิ้นส่วนต่าง ๆ ของวงจรทางความถี่สูง เนื่องจากไมโครสตริปมีน้ำหนักเบา กระทัดรัด และไม่สิ้นเปลืองในการผลิตจึงทำให้ไมโครสตริปถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน ในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน และ การออกแบบไมโครสตริปเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ และ ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง จากนั้นได้ทำการสร้าง และ ทดสอบผลตอบแทนของอุปกรณ์ดังกล่าว

1.1 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการ

- 1.1.1 เพื่อศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน และ โครงสร้างของไมโครสตริป
- 1.1.2 สามารถออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำย่าน UHF และตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางจากไมโครสตริปได้
- 1.1.3 สามารถสร้างตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำย่าน UHF และตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางจากไมโครสตริปได้

1.2 ขอบเขตของโครงการ

- 1.2.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน และ โครงสร้างของไมโครสตริป
- 1.2.2 ทำการออกแบบ และ ทำการสร้างตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำย่าน UHF และ ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง
- 1.2.3 ทำการทดสอบ และ บันทึกผลที่ได้จากการทดสอบ
- 1.2.4 สรุปผล และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ
- 1.2.5 สรุปผลที่ได้จากโครงการ

1.3 ขั้นตอนการทำงาน

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน และ โครงสร้างของไมโครสตริป
- 1.3.2 ออกแบบไมโครสตริปให้เป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำย่าน UHF และ

ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง

- 1.3.3 สร้างตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำย่าน UHF และตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางที่ได้ออกแบบไว้
- 1.3.4 ทดลองตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำย่าน UHF และ ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางที่ได้สร้างไว้ และบันทึกผลที่ได้จากการทดลอง
- 1.3.5 สรุปผล และ วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

มีความรู้พื้นฐานของไมโครสตริปโดยสามารถนำไปประยุกต์ทำเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำย่าน UHF และ ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางได้ รวมทั้งเทคนิคการปรับแต่งเพื่อให้ไมโครสตริปมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันสัญญาณความถี่สูงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายมาก เช่นสัญญาณไมโครเวฟ เนื่องจากสัญญาณความถี่สูงมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่นกำลังของสัญญาณสูงทำให้เดินทางได้ไกล สัญญาณมีภูมิคุ้มกันต่อการรบกวนของสัญญาณรบกวน (Noise) สูง และ สายอากาศที่ใช้มีขนาดเล็กเป็นต้น ดังนั้นในโครงการนี้จึงทำการศึกษาและสร้างอุปกรณ์ทางความถี่สูงโดยเลือกศึกษาและสร้างอุปกรณ์ทางความถี่สูงโดยใช้ไมโครสตริป ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของอุปกรณ์ทางความถี่สูงจำเป็นต้องวิเคราะห์คุณสมบัติแบบกระจาย(Distributed) ซึ่งสามารถที่จะนำเอาคุณสมบัติแบบลัมปี (Lumped) ที่ใช้วิเคราะห์วงจรไฟฟ้าทางความถี่ต่ำมาวิเคราะห์ได้ ในบทนี้ก่อนอื่นจะกล่าวถึงลักษณะทั่วไปของไมโครสตริป และ โครงสร้างของไมโครสตริปรวมทั้งการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครสตริป จากนั้นได้ทำการศึกษาดังทฤษฎีในการออกแบบไมโครสตริปเพื่อนำไปประยุกต์สร้างเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ และ ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางต่อไป

2.2 ไมโครสตริป

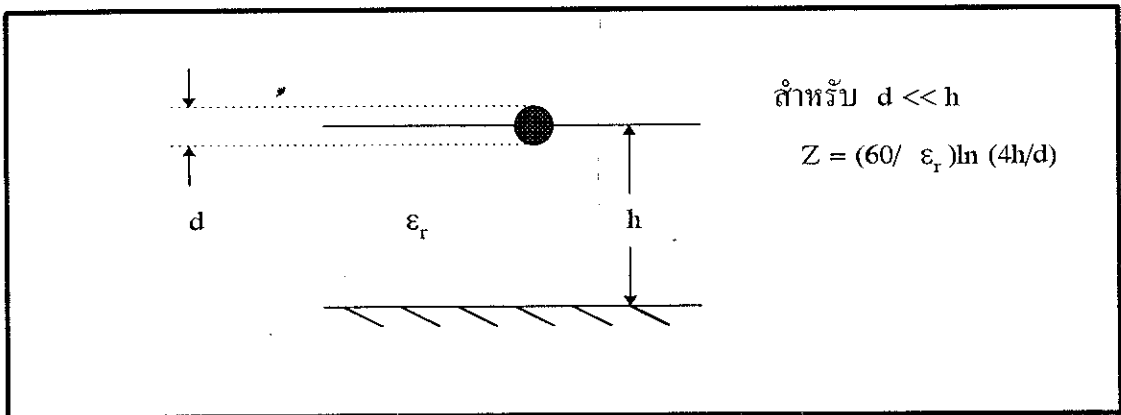
ไมโครสตริปเป็นประเภทหนึ่งของสายนำสัญญาณเช่นเดียวกับสายโคแอกเชียลและท่อนำคลื่น แต่ไมโครสตริปมีข้อแตกต่างจากสายโคแอกเชียลและท่อนำคลื่นคือ ไมโครสตริปไม่ได้สร้างมาจากลวดหรือท่อนำคลื่นแต่อย่างใด แต่ไมโครสตริปสร้างมาจากแผ่นวงจรพิมพ์สองหน้า ในการออกแบบให้แถบไมโครสตริปมีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ที่ต่างกัน ทำให้สามารถสร้างแถบไมโครสตริปให้เสมือนเป็นคาปาซิเตอร์ อินดักเตอร์ ตัวเมตซ์ของหม้อแปลง ตัวเชื่อมโยงกำลังงาน ตัวขับ และ อื่น ๆ อีกมากมาย

ลักษณะของไมโครสตริปจะคล้ายกับลวดที่วางอยู่บนเนื้อแผ่นกราวน์ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ซึ่ง d คือ ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด ความยาวของลวดดังกล่าวมีผลต่อค่าอินดักแตนซ์ ค่า h คือ ความสูงจากจุดศูนย์กลางของลวดถึงแผ่นกราวน์ และ ϵ คือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสารที่อยู่ระหว่างลวดกับแผ่นกราวน์ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้านี้มีผลต่อค่าคาปาซิแตนซ์ของแถบไมโครสตริปมาก ในกรณีที่ลวดนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากเมื่อเทียบ

กับระยะความสูงจากจุดศูนย์กลางของลวดถึงแผ่นกราวด์ ($d \ll h$) คลื่นจะมีการแพร่กระจายในโหมด TEM ซึ่งเหมือนคลื่นที่แพร่กระจายในสายโคแอกเซียลนั่นเอง ซึ่งสายโคแอกเซียลมีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ดังนี้

$$Z = 60 / \epsilon \ln(B/A) \quad (2.1)$$

เมื่อ A คือความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำด้านใน และ B คือความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำด้านนอก



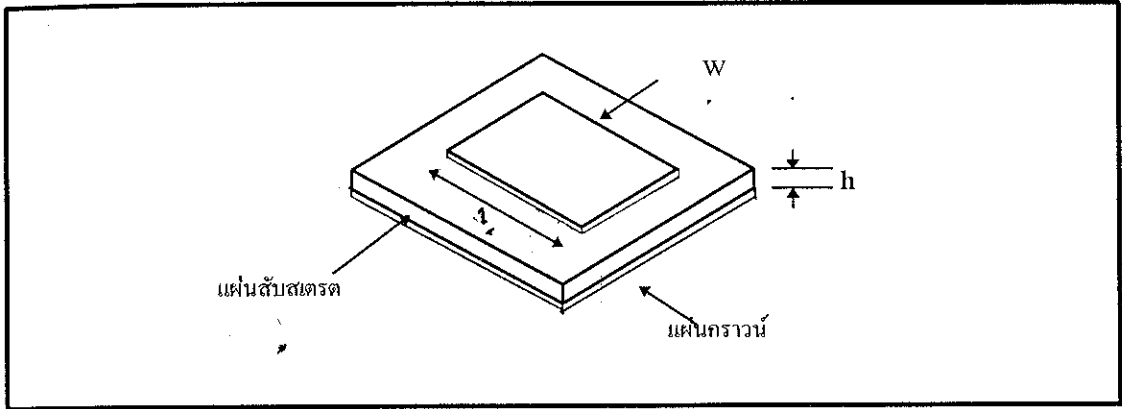
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของไมโครสตริปที่มีลักษณะเหมือนเส้นลวดวางอยู่บนแผ่นกราวด์ที่ยาวเป็นอนันต์

ดังนั้นจากรูปที่ 2.1 เราสามารถเขียนสมการของค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ โดยมีความสัมพันธ์กับสมการ (2.1) ได้ดังนี้

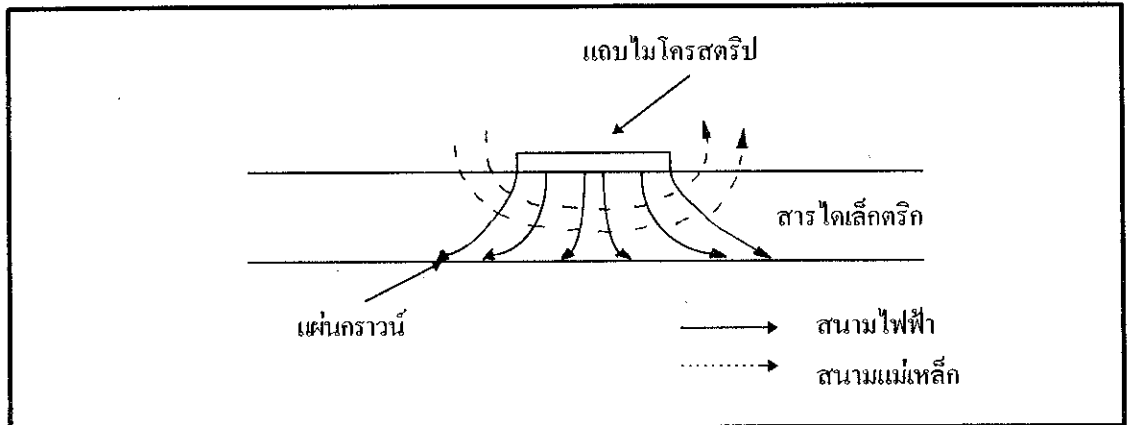
$$Z = (60 / \epsilon) \ln (4h/d) \quad (2.2)$$

แต่ในความเป็นจริงแล้ว ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของแถบไมโครสตริปนั้นซับซ้อนกว่าค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ในสมการ (2.2) เนื่องจากไมโครสตริปที่ใช้ในความเป็นจริงนั้นเป็นดังรูปที่ 2.2 ซึ่งทำได้โดยการนำแผ่นวงจรพิมพ์สองหน้ามากัดลายออกเพียงด้านเดียว ส่วนอีกด้านหนึ่งนั้นยังคงเหลือไว้ให้เป็นตัวนำซึ่งเปรียบเสมือนแผ่นกราวด์ ดังนั้นแถบไมโครสตริปและแผ่นกราวด์จึงเป็นตัวนำที่ถูกขับเคลื่อนด้วยสารโคเล็กตริกนั่นเอง แถบไมโครสตริปหนึ่งๆ จะมีพฤติกรรมเหมือนคาปาซิเตอร์ขนาน ในขณะที่เดียวกันเมื่อคลื่นแพร่กระจายไปตามแถบ

ไมโครสตริปจะเกิดการการลดลงของสนามแม่เหล็กกรอบ ๆ แถบไมโครสตริปนั้น ดังนั้นแถบไมโครสตริปนั้นจึงมีพฤติกรรมที่คล้ายกับอินดักเตอร์อนุกรมด้วยในเวลาเดียวกัน ซึ่งลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายไปตามแถบไมโครสตริปแสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของไมโครสตริป



รูปที่ 2.3 แสดงการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมีการส่งผ่านคลื่นนั้นในไมโครสตริป

2.3 โครงสร้างและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครสตริป

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปตามไมโครสตริปตามลำดับซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นต้องศึกษาเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ที่สร้างจากไมโครสตริป

2.3.1 โครงสร้างของไมโครสตริป

ไมโครสตริปที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันนี้มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยแถบไมโครสตริปหรือแถบทองแดงซึ่งตั้งบนสับสเตรต (Substrate) ที่เป็นสารไดอิเล็กตริกส่วนด้านล่างของสับสเตรต

เป็นผิวโลหะชนิดเดียวกับแถบไมโครสตริปซึ่งเรียกว่าแผ่นกราวด์นั่นเอง ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 [6] ความกว้างของแถบไมโครสตริปนั้นขึ้นอยู่กับค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของแถบไมโครสตริป ในปัจจุบันนี้สับสเตรตที่ใช้ทำแผ่นวงจรพิมพ์สองหน้านั้นมีด้วยกันหลายขนาดขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ ส่วนสารไดอิเล็กตริกที่นำมาใช้ทำเป็นสับสเตรตนั้นมีอยู่หลายชนิด และแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะถูกส่งผ่านอยู่ภายในสับสเตรตดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 นั้นเอง ซึ่งจะกล่าวถึงการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครสตริปโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.3.2 การส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครสตริป

ได้มีผู้ทำการศึกษาทฤษฎีแล้วพบว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านไปตามไมโครสตริปนั้นใกล้เคียงกับโหมด TEM มากแต่จะไม่ใช่มอด TEM เสียทีเดียว เพราะมีสนามในแนวแกนอยู่ด้วย จึงนิยมเรียกโหมดดังกล่าวนี้ว่าโหมดกึ่ง TEM (Quasi-TEM) [1] จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริป การที่มีสนามในแนวแกนอยู่ข้างนั้นเป็นเพราะไมโครสตริปมีโครงสร้างที่สารไดอิเล็กตริกและอากาศอยู่ในระนาบเดียวกันนั่นเอง

การที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายไปตามไมโครสตริปซึ่งเป็นโหมดกึ่ง TEM นั้นพออนุโลมให้วิเคราะห์ในโหมด TEM ได้ [1] ทำให้สามารถนำเอาหลักการของวงจรกระจายมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติของไมโครสตริปได้ กล่าวคือ ถ้าเราสามารถหาค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ก็สามารถที่จะนำค่าทั้งสองนี้ไปคำนวณหาค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของแถบไมโครสตริปได้ อย่างไรก็ตามในการหาค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของไมโครสตริปจะยุ่งยากกว่าของสายคู่ขนานหรือสายโคแอกเซียลมาก เนื่องจากบริเวณที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านไปตามไมโครสตริปนั้นเป็นบริเวณที่มีทั้งสารไดอิเล็กตริกและอากาศอยู่ แต่สำหรับในการหาค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวนั้นจะไม่มีผลกระทบจากเหตุการณ์ดังกล่าวแต่อย่างใด ถึงแม้การหาค่าคาปาซิแตนซ์จะยุ่งยากกว่าปกติ แต่ก็มียุทธวิธีทำให้ง่ายขึ้นโดยการใช้วิธีการหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิภาพ หรือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิภาพ (Effective Dielectric Constant ย่อว่า ϵ_{eff}) ของระบบซึ่งจะรวมผลของสารไดอิเล็กตริก และ อากาศเข้าด้วยกัน และ เนื่องจากสารไดอิเล็กตริกทั้งหลายมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่หรือมีดิสเพอร์ชันเชิงวัสดุ ดังนั้น ϵ_{eff} ที่หาได้ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ด้วยเช่นกัน

เมื่อคลื่นถูกอนุโลมให้ส่งผ่านไปตามไมโครสตริปได้ในโหมด TEM ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ Z_0 ของแถบไมโครสตริปสามารถเขียนในรูปของผลหารระหว่างค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว (L) และ ค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว (C) ดังสมการต่อไปนี้

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \quad (2.3)$$

ในขณะเดียวกันความเร็วเฟส v_p ของไมโครสตริปสามารถเขียนได้ดังนี้

$$v_p = 1/\sqrt{LC} \quad (2.4)$$

จากสมการ (2.3) และ (2.4) นั้น สามารถเขียน Z_0 ในรูปของ v_p กับ L หรือ C ดังนี้

$$Z_0 = v_p L = 1/v_p C \quad (2.5)$$

ในขั้นต่อไปจะพิจารณาขณะที่สับสเตรตหรือสารไดอิเล็กตริกนั้นอยู่ในกรณีที่ถูกดึงออกไปเหลือแต่อากาศเพียงอย่างเดียวที่โอบล้อมไมโครสตริปอยู่ กรณีที่อยู่ในสภาพเช่นนี้ความเร็วเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านในสับสเตรตของไมโครสตริปนั้นจะมีค่าเท่ากับความเร็วแสง และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะเปลี่ยนไป โดยที่ค่าอินดักแตนซ์ต่อหน่วยความยาวจะไม่ได้รับผลกระทบใด ๆ เพื่อให้ค่าคาปาซิแตนซ์ที่เปลี่ยนไปนี้มีค่าเป็น C_0 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง C_0 กับความเร็วเฟสเป็นดังนี้

$$c = 1/\sqrt{LC_0} \quad (2.6)$$

ในขณะเดียวกันค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของไมโครสตริปจะเขียนได้ดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{L/C_0} \quad (2.7)$$

เมื่อนำสมการ (2.6) พารด้วยสมการ (2.7) จะได้ผลดังนี้

$$C/C_0 = (c/v_p)^2 \quad (2.8)$$

ในกรณีที่กำลังพิจารณาอยู่นี้ ค่าของ C/C_0 นี้จะเปรียบเสมือนค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผลของไมโครสตริปซึ่งสับสเตรตเป็นสารไดอิเล็กตริกและมีด้านบนเป็นอากาศอยู่

$$\epsilon_{\text{eff}} = (c/v_p)^2 \quad (2.9)$$

จากสมการข้างต้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง Z_0 , Z_o และ ϵ_{eff} ได้ดังนี้

$$Z_o = Z_0/\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \text{ หรือ } Z_o = Z_0\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \text{ หรือ } \epsilon_{\text{eff}} = (Z_o/Z_0)^2 \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) จะเห็นได้ว่าเมื่อทราบค่า ϵ_{eff} ก็จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้ อย่างไรก็ตามค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงไปตามความกว้างของแถบไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของสับสเตรต (W/h) ซึ่งพิจารณาได้สองกรณีดังต่อไปนี้ กรณีแรกคือกรณีที่ $W/h \gg 1$ ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 (ก) ในกรณีนี้เนื่องจากเส้นแรงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณที่มีแถบไมโครสตริป หรือ กล่าวได้ว่าพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านในบริเวณดังกล่าวเกือบทั้งหมด ซึ่งทำให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ค่า ϵ_r ของสับสเตรต สำหรับกรณีที่สองคือกรณีที่ $W/h \ll 1$ ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 (ข) ในกรณีนี้เส้นแรงไฟฟ้าถูกส่งผ่านสับสเตรตและผ่านอากาศอย่างละครึ่ง ซึ่งทำให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ $(\epsilon_r + 1)/2$ จากที่ได้อธิบายมานี้จะเห็นได้ว่าค่า ϵ_{eff} จะเปลี่ยนแปลงตามค่า W/h และ กล่าวได้ว่า ϵ_{eff} มีขอบบนและขอบล่างเป็นไปตามกรณีที่กล่าวข้างต้นดังนี้

$$(\epsilon_r + 1)/2 < \epsilon_{\text{eff}} < \epsilon_r \quad (2.11)$$

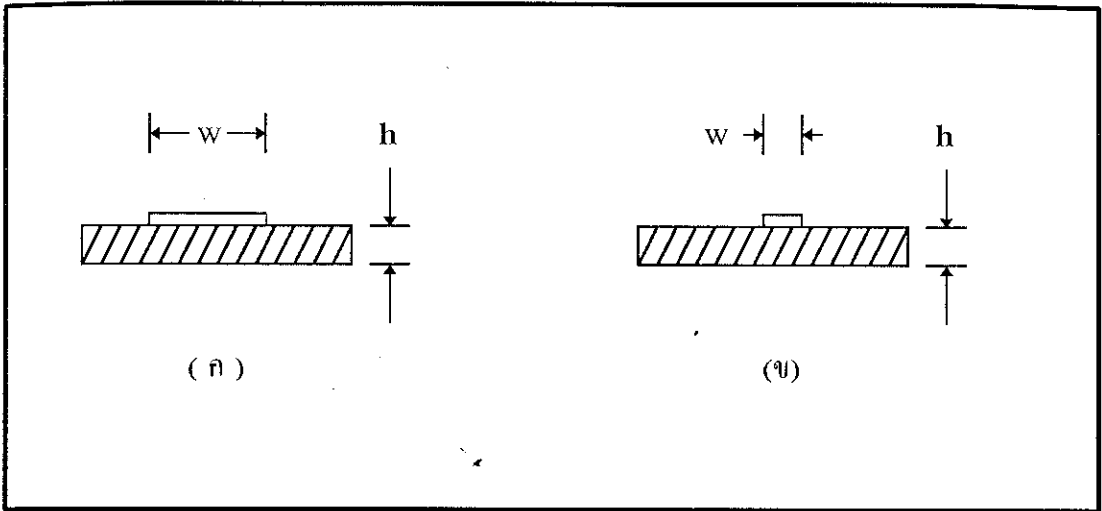
ในการหาค่า W/h นั้นโดยส่วนใหญ่แล้วจะไม่คำนึงถึงความหนาของแถบไมโครสตริปเนื่องจากมีค่าน้อยมาก ($t/h \leq 0.005$) ดังนั้นในการหาค่า W/h นั้นสามารถหาได้โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้ [7]

กรณีที่ 1 เมื่อ $W/h \leq 2$

$$W/h = 8 e^A / (e^{2A} - 2) \quad (2.12)$$

และ

$$A = (Z_0/60) \sqrt{(\epsilon_r + 1)/2} + [(\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 1)] (0.23 + 0.11/\epsilon_r)$$



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของไมโครสตริปที่มีค่า w/h ต่างกัน

(ก) $w/h \gg 1$

(ข) $w/h \ll 1$

กรณีที่ 2 เมื่อ $w/h \geq 2$

$$W/h = (2/\pi) \{ B - 1 - \ln(2B - 1) + [(\epsilon_r - 1)/2\epsilon_r] [\ln(B - 1) + 0.39 - 0.61/\epsilon_r] \} \quad (2.13)$$

และ $B = 592.2 / (Z_0 \sqrt{\epsilon_r})$

ส่วนในการคำนวณหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิภาพนั้น โดยส่วนใหญ่แล้ว จะไม่พิจารณาถึงความหนาของแถบไมโครสตริป ($t/h < 0.005$) เช่นกัน และสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 เมื่อ $w/h \leq 1$

$$\epsilon_{\text{eff}} = (\epsilon_r + 1)/2 + [(\epsilon_r - 1)/2] [(1 + 12h/w)^{-1/2} + (1 - W/h)^2 / 25] \quad (2.14)$$

กรณีที่ 2 เมื่อ $w/h \geq 1$

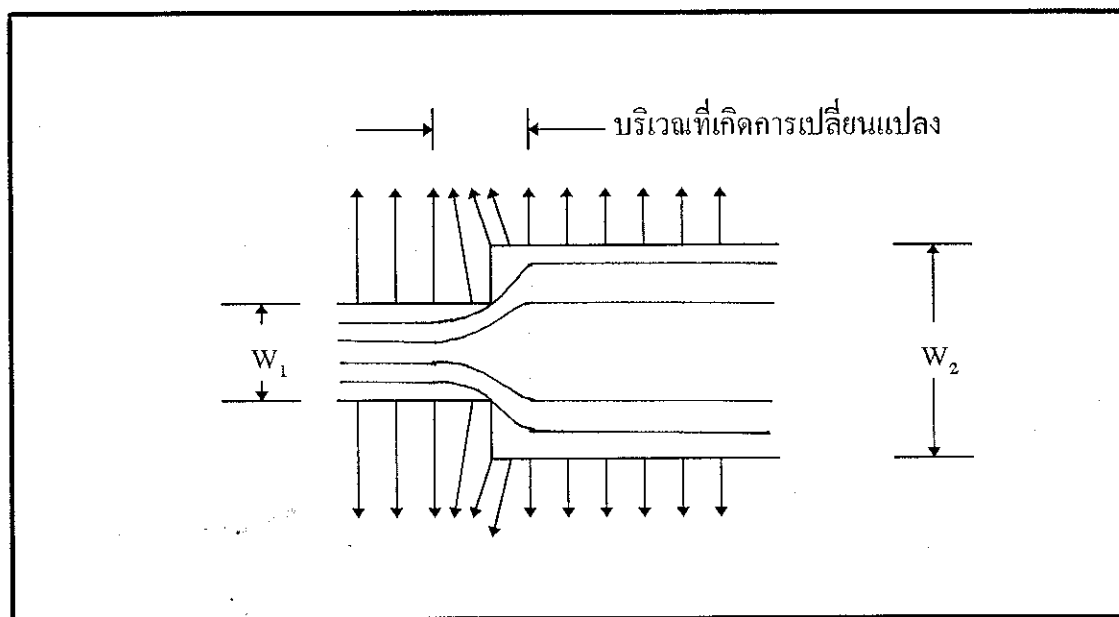
$$\epsilon_{\text{eff}} = 0.5[(\epsilon_r + 1) + (\epsilon_r - 1)(1 + 12h/w)^{-1/2}] \quad (2.15)$$

ดังนั้นความยาวคลื่นในการแพร่กระจายเป็นดังนี้

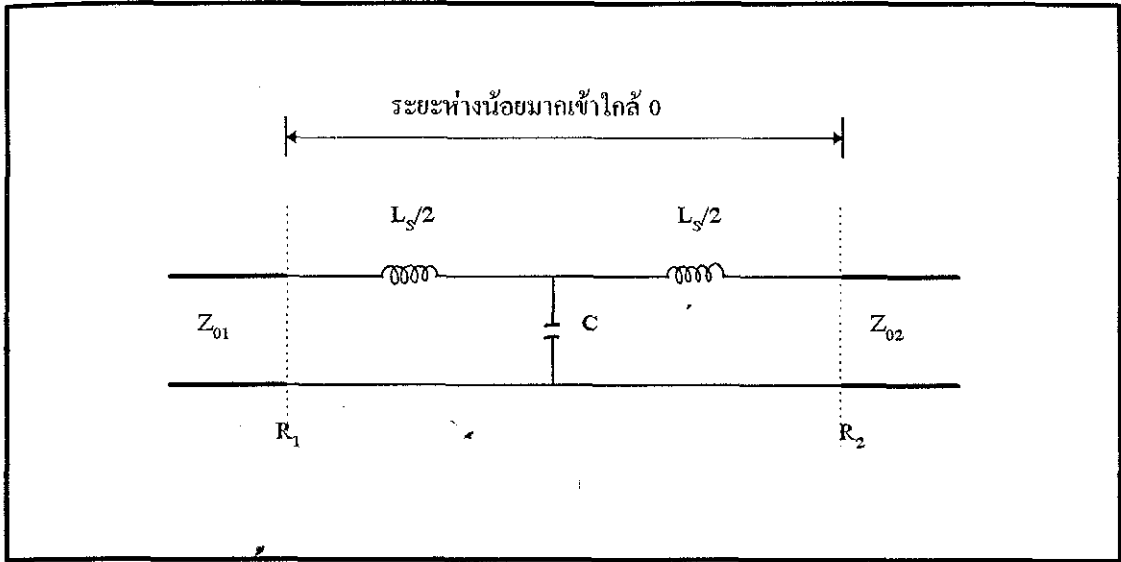
$$\lambda_g = c/f\sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (2.16)$$

เนื่องจากแถบไมโครสตริปแต่ละแถบมีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เป็นตัวกำหนดความกว้าง ดังนั้นกรณีที่มีการต่อกันของแถบไมโครสตริปที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ต่างกันบนสับสเตรตตัวเดียวกันจะเกิดบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงจากแถบไมโครสตริปที่มีความกว้างค่าหนึ่งไปยังแถบไมโครสตริปที่มีความกว้างอีกค่าหนึ่งทันทีทันใดดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเรียกจุดต่อบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเช่นนี้ว่าสเตป (Step) ตัวอย่างอุปกรณ์ไมโครสตริปที่มักจะเกิดสเตปขึ้นได้แก่ การแมตช์ของโครงข่ายต่าง ๆ ในการออกแบบตัวกรองสัญญาณนั่นเอง

ในรูปที่ 2.5 แสดงถึงลักษณะการเกิดสเตปและในบริเวณใกล้เคียง ๆ สเตปนั้นเป็นบริเวณที่ปลอดภัย และ เป็นบริเวณที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นที่ใช้งาน เมื่อกระแสไหลจากแถบความกว้างขนาดหนึ่งไปสู่ความกว้างอีกขนาดหนึ่งจะเกิดค่าอินดักแตนซ์อนุกรมตรงบริเวณสเตป (L_s) ขึ้นและจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณสเตปจะเกิดความผิดเพี้ยนไปจากเดิม กล่าวคือรอบ ๆ บริเวณที่เกิดสเตปนั้นจะเกิดสนามฟริงกิง (Fringing Electric Field) ขึ้น ซึ่งหมายความว่ามีการกระจายของประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในบริเวณนี้จนทำให้เกิดค่าคาปาซิแตนซ์ (C_s) ขึ้น ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของการเกิดสเตปได้ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ซึ่งมีส่วนประกอบของค่าอินดักแตนซ์แยกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน เมื่อ Z_{01} คือสายที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูง และ Z_{02} คือสายที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำ



รูปที่ 2.5 ลักษณะของกระแสและสนามไฟฟ้าในบริเวณที่เกิดสเตป



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของรูปลักษณะสเตปซึ่งมีส่วนประกอบของอิมพีแดนซ์แยกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกัน

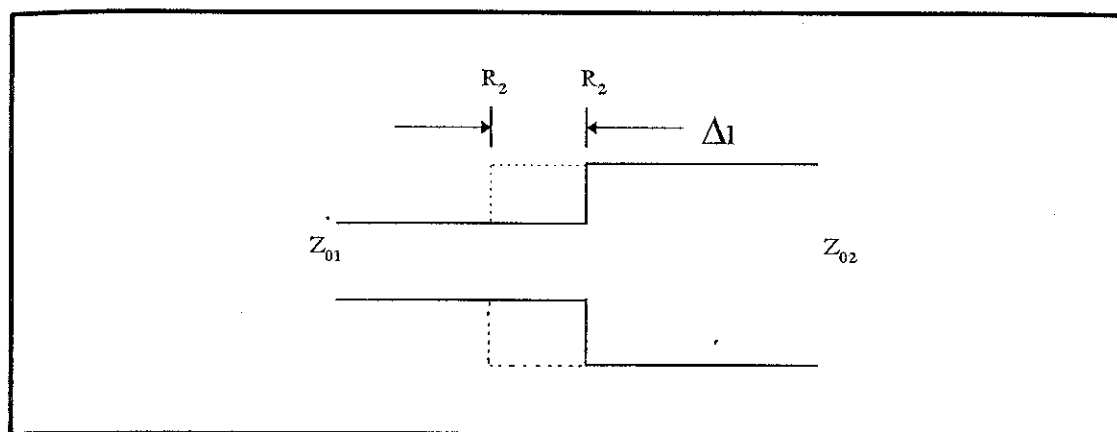
สำหรับการชดเชยฟริงกิงคาปาซิแตนซ์ (Fringing Capacitance) ต้องทำการชดเชยใกล้ ๆ กับจุดที่เกิดสเตป จากรูปที่ 2.7 ถ้าไมโครสตริปมีพฤติกรรมแบบอุดมคติแล้ว จากการคำนวณตามทฤษฎีบริเวณที่ควรเกิดสเตปคือตำแหน่งที่ระนาบ R_2 แต่ในความเป็นจริงแล้วเมื่อส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปตามไมโครสตริปจะเกิดฟริงกิงคาปาซิแตนซ์ขึ้น ซึ่งต้องทำการชดเชยในสิ่งที่เกิดขึ้นนี้ ฟริงกิงคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นจากสเตปในกรณี que แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 นั้นจะสมมูลกับแถบไมโครสตริปที่มีความยาวเท่ากับ Δl ซึ่งเป็นระยะที่เกินมาจากการคำนวณในตอนต้น และเกินเข้าไปในด้านของแถบไมโครสตริปที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ต่ำ หรือ แถบที่กว้างกว่า ดังนั้นการชดเชยค่าฟริงกิงคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นทำได้โดยการเลื่อนตำแหน่งที่เกิดสเตปจากระนาบ R_2 ไปยังตำแหน่งระนาบ R_1 ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 เมื่อทำเช่นนี้แล้วที่ระนาบ R_1 นั้นยังคงรักษาค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ที่ R_2 ไว้ได้เช่นเดิม

Hammerstad และ Bekkadal ได้เสนอการคำนวณค่า Δl ไว้ดังสมการต่อไปนี้ [3]

$$\Delta l = (1 - W_1 / W_2) \Delta l_{oc} \quad ; \quad W_2 > W_1 \quad (2.17)$$

เมื่อ Δl_{oc} คือแฟกเตอร์ (factor) ที่แก้การเปิดวงจรที่ส่วนปลายของแถบสตริป ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้ [3]

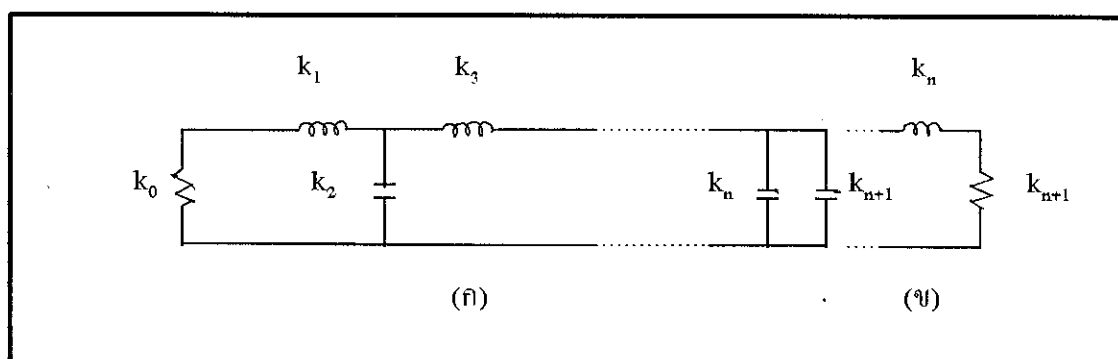
$$\Delta l / h = 0.412 [(\epsilon_{eff} + 0.3) / (\epsilon_{eff} - 0.258)] [(W/h + 0.262) / (W/h + 0.813)] \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.7 แสดงถึงไมโครสตริปที่ทำการชดเชยการเกิดฟริงกิงคาปาซิแตนซ์เนื่องจากการเกิดสเตป

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ

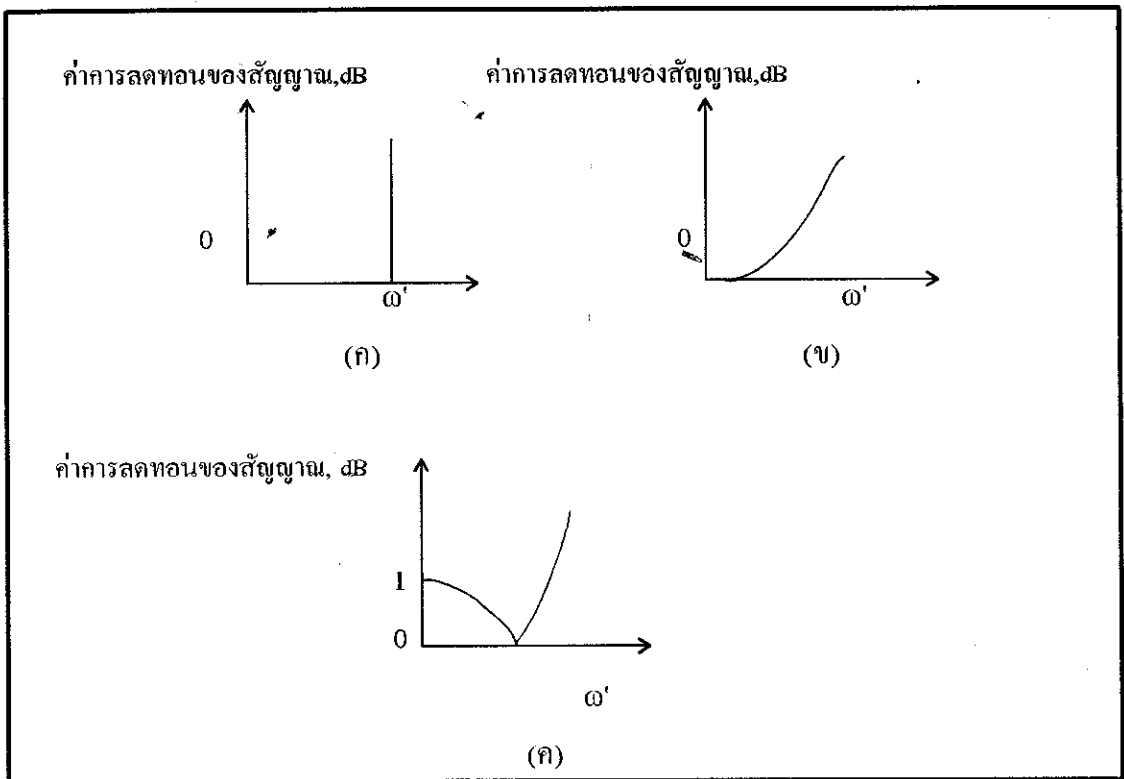
เมื่อพิจารณาในส่วนต้นแบบของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในส่วนประกอบแบบลัมปี n - section ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 ซึ่งมีค่า k สลับกันระหว่างอินดักแตนซ์ซึ่งต่ออนุกรมกับคาปาซิแตนซ์ที่ต่อขนานจาก 1 ถึง n ส่วนในเทอมของ k_0 และ k_{n+1} เมื่อพิจารณาในส่วนที่ต่อเนื่องติดกันไปทั้งแบบอนุกรมและขนานแล้วถ้า k_0 หรือ k_{n+1} อยู่ติดกับคาปาซิแตนซ์แล้วค่าดังกล่าวจะเป็นรีซีสแตนซ์ แต่ถ้า k_0 หรือ k_{n+1} อยู่ติดกับอินดักแตนซ์ค่าดังกล่าวจะเป็นคอนดักแตนซ์ ส่วนค่า k อื่น ๆ จะอยู่ในรูปของเฮนรี หรือ ฟารัดแล้วแต่กรณีไป ส่วนผลตอบแทนทางความถี่ของการลดทอนของสัญญาณในตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ โดยทั่วไปนั้นค่าอิมมิตแตนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดจะมีค่าเป็น 1 ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 ต้นแบบ n -section ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ ซึ่งมีอินดักเตอร์ k_1 เป็นส่วนแรก

- (ก) กรณีที่ค่า n เป็นเลขคู่ ซึ่งมี k_{n+1} เป็นรีซีสแตนซ์
- (ข) กรณีที่ค่า n เป็นเลขคี่ ซึ่งมี k_{n+1} เป็นคอนดักแตนซ์

การลดทอนของสัญญาณที่ออกจากแถบไมโครสตริปที่เกิดขึ้นระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด นั้นเกิดขึ้นจากการสะท้อนกลับของสัญญาณขาเข้ากลับมายังแหล่งจ่าย ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำที่มีอินดักแตนซ์เป็นรีแอคทีฟอันดับแรกนั้นแสดงว่ามีอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูงพ้นไปจากแถบผ่าน ซึ่งถูกต้องขนานกับสายหลักและในทางกลับกันถ้ามีคาปาซิแตนซ์เป็นรีแอคทีฟอันดับแรกแล้ว ตัวกรองสัญญาณจะมีอิมพีแดนซ์ขาเข้าต่ำจนพ้นจากแถบผ่านแทนกรณีของวงจรที่มีอินดักแตนซ์เป็นรีแอคทีฟอันดับแรก



รูปที่ 2.9 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ ในรูปการลดทอน/ความถี่

- (ก) ลักษณะสมบัติของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในอุดมคติ
- (ข) ผลตอบสนองของ Maximally-flat หรือ Butterworth ด้วย 2 section
- (ค) ผลตอบสนองของ 1.0 dB Equi-ripple หรือ Chebyshev ด้วย 2 section

สำหรับผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในอุดมคติ ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.9 (ก) นั้นจะเห็นได้ว่าไม่มีการลดทอนของสัญญาณเลย ณ ที่ความถี่ใด ๆ ที่ต่ำกว่าความถี่ ω_1' แต่ที่ความถี่ที่สูงขึ้นไปจากความถี่ดังกล่าวจะมีค่าการลดทอนของสัญญาณเป็นอนันต์ ส่วนผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำที่ออกแบบโดยใช้วิธี

ของ Maximally-flat หรือ Butterworth นั้นได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.9 (ข) จะเห็นได้ว่าค่าการลดทอนของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ ω_1' เท่านั้น และ สำหรับผลตอบสนองทางความถี่ของการออกแบบโดยใช้ Equi-ripple ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.9 (ค) จะเห็นได้ว่าไม่เกิดการลดทอนของสัญญาณ ณ ที่ความถี่เดียวคือที่ความถี่ ω_1' เท่านั้น

คุณสมบัติการส่งผ่านของคลื่นในตัวกรองสัญญาณนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยค่า P_{out}/P_{avs} เมื่อ P_{out} คือค่ากำลังขาออกของตัวกรองสัญญาณไปสู่โหลด และ P_{avs} คือค่ากำลังที่นำมาใช้ซึ่งได้จากแหล่งจ่าย P_{out}/P_{avs} คือรูปแบบที่รู้จักในความหมายของค่ากำลังขยายของทรานสดิวเซอร์ (G_t Transducer Power Gain) ของอุปกรณ์ 2 พอร์ต ซึ่ง G_t เป็นฟังก์ชันของอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย Z_s และอิมพีแดนซ์ของโหลดแทนด้วย Z_L โดยทั่วไปในทางปฏิบัติจะทำให้ $Z_s = Z_L = Z_0$ และสำหรับตัวกรองสัญญาณต้นแบบนั้น $Z_0 = 1$ ในการกล่าวถึงค่าการลดทอนของสัญญาณ หรือ การสูญเสียในการส่งสัญญาณนั้นจะนิยามด้วยค่า $10\log(P_{avs}/P_{out})$

2.4.1 ผลตอบสนองตามวิธีการของ Maximally-flat

ในโครงการนี้ได้ทำการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำโดยใช้วิธีการของ Maximally-flat ซึ่งกำลังงานขาออกของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ n -section ตามวิธีการของ Maximally-flat นั้นจะให้ผลตอบสนองทางความถี่โดยกำลังงานขาออกจะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังงานทางด้านขาเข้าที่ $\omega' = \omega_1'$ เมื่อ ω_1' คือความถี่ที่ค่าการลดทอนของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 3 dB ซึ่งค่าการลดทอนของสัญญาณของตัวกรองสัญญาณสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

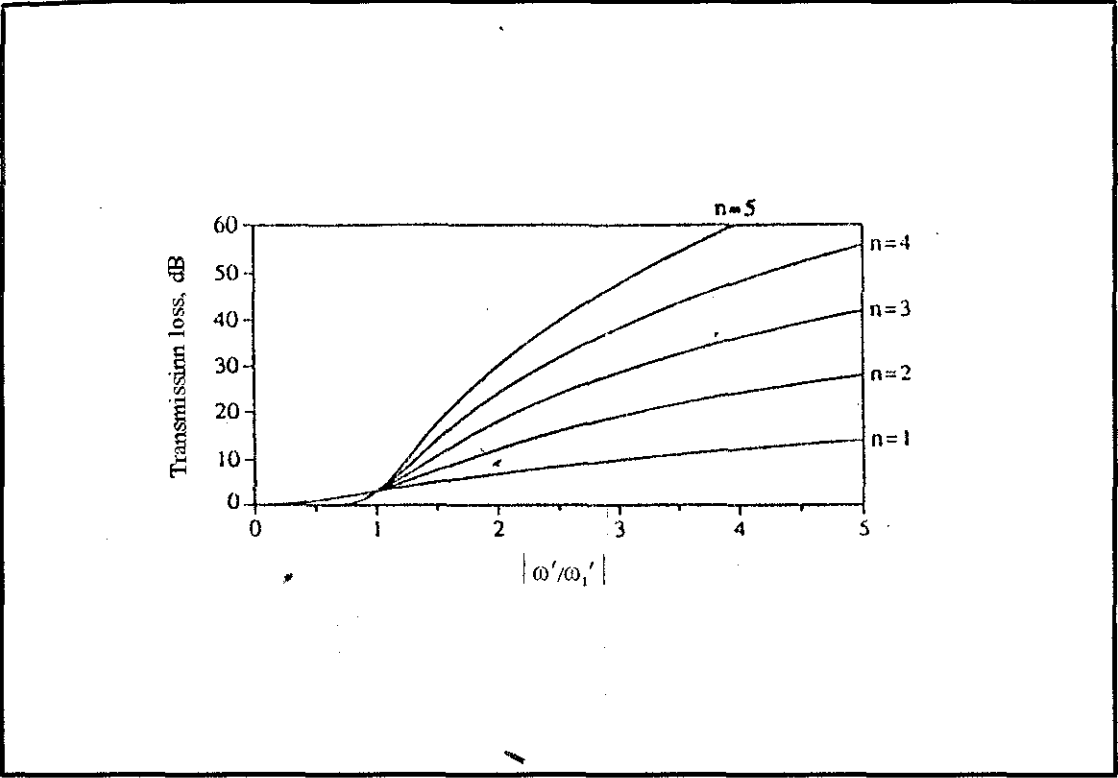
$$L = 10 \log_{10} [1 + (\omega' / \omega_1')^{2n}] \quad \text{dB} \quad (2.19)$$

ค่าที่หาได้จากสมการ (2.19) สามารถนำไปเขียนกราฟเพื่อแสดงถึงผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำโดยวิธีการของ Butterworth หรือ Maximally-flat ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10

ในการหาค่า k_k ที่ต้องการเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำแบบ Butterworth นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ โดยให้ $k_0 = k_{n+1} = 1$

$$k_k = 2 \sin [\pi (2k-1) / 2n] \quad k = 1, \dots, n \quad (2.20)$$

จากสมการ (2.20) เมื่อแทนค่า $n = 0, 1, \dots, 6$ จะได้ค่าของชิ้นส่วนต้นแบบตามวิธีการของ Butterworth ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำดังตารางที่ 2.1



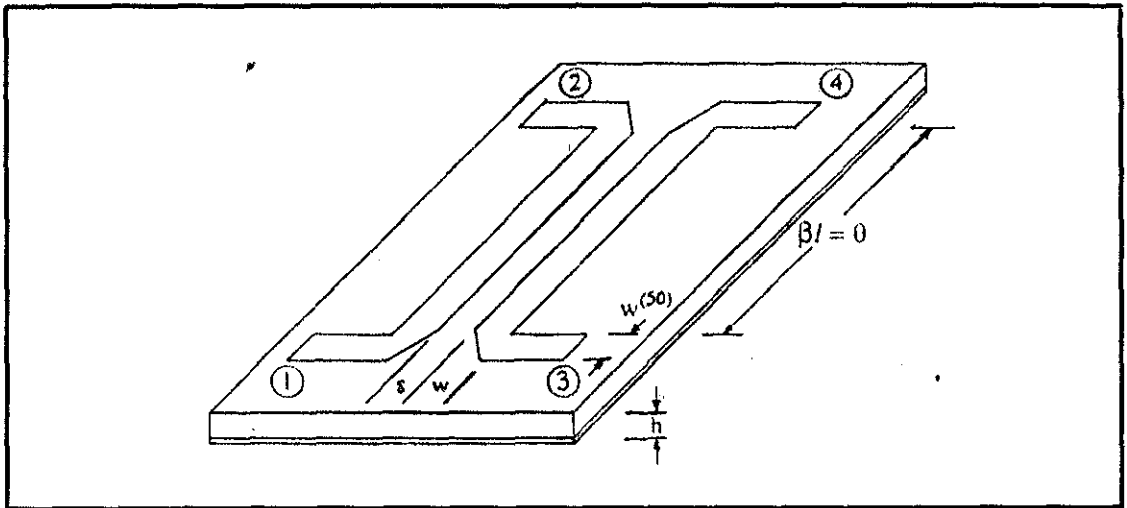
รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ
โดยวิธีการของ Butterworth

ตารางที่ 2.1 ค่าของชิ้นส่วนคั่นแบบตามวิธีการของ Butterworth ของตัวกรองสัญญาณผ่าน
แถบความถี่ต่ำ

n	1	2	3	4	5	6	7
k ₀	2.0000	1.4142	1.0000	0.7654	0.618	0.5176	0.445
k ₁		1.4142	2.0000	1.8478	1.618	1.4142	1.247
k ₂			1.0000	1.8478	2.000	1.9319	1.8019
k ₃				0.7654	1.618	1.9319	2.000
k ₄					0.618	1.4142	1.8019
k ₅						0.5176	1.247
k ₆							0.445

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง

ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.11 ประกอบไปด้วยแถบไมโครสตริปสองแถบที่วางขนานกัน ซึ่งสัญญาณจะเกิดการคัปปลิงที่บริเวณดังกล่าว โดยที่ระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อนี้ให้แทนด้วย s และความกว้างของแถบไมโครสตริปที่เกิดการคัปปลิงนั้นให้แทนด้วย w ซึ่งความกว้างของแถบไมโครสตริปช่วงที่เกิดการคัปปลิงต่อนั้นแตกต่างกับความกว้างของปลายตัวคัปเปิลอร์ที่จำเป็นต้องใช้แถบไมโครสตริปที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับ $50\ \Omega$ โดยใช้สัญลักษณ์แทนด้วย $w^{(50)}$ การวิเคราะห์การคัปปลิงของสัญญาณในตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางนี้จำเป็นต้องวิเคราะห์ในเทอมของโหมดคู่ และ โหมดคี่ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 2.11 แสดงแถบไมโครสตริปที่เกิดการคัปปลิงในตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง

จากรูปที่ 2.11 โดยปกติทั่วไปแล้วเป็นที่เข้าใจกันว่า พอร์ตที่ 1. คือพอร์ตทำการป้อนกำลังงานขาเข้า (Input Port) พอร์ตที่ 2 คือพอร์ตไดเร็กต์ (Direct Port) พอร์ตที่ 3 คือพอร์ตที่เกิดคัปปลิงของสัญญาณ (Coupled Port) และ พอร์ตที่ 4 คือพอร์ตที่ไม่มีการนำเอาสัญญาณไปใช้งานใดๆ (Isolate Port) สำหรับการวิเคราะห์ตามทฤษฎีพื้นฐานของการเชื่อมต่อนั้นจำเป็นต้องตั้งอยู่บนสมมุติฐาน 3 ข้อคือ

1. การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถือว่าเป็นโหมดกึ่ง TEM สถิตย์
2. ในทางทฤษฎีแล้วสายนำสัญญาณดังกล่าวจะมีค่า ϵ_{eff} และ ความเร็วเฟสที่เหมือนกันทั้งในโหมดคู่และโหมดคี่ แต่ในทางปฏิบัติแล้วความเร็วเฟสในทั้ง 2 นี้จะมีค่าต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นในการสร้างตัวคัปเปิลอร์นั้นจะได้ผลผลิตที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ด้วย
3. สายส่งจะต้องมีระนาบสมมาตรที่เหมาะสม

2.5.1 การวิเคราะห์ในโหมดคู่ และ โหมดคี่

เมื่อมีแถบไมโครสตริปวางขนานกันสองแถบ ทำให้เกิดอุปกรณ์ 4 พอร์ตขึ้น ดังที่กล่าวไปแล้วในข้างต้นนั้น เมื่อป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตที่ 1 สัญญาณที่แพร่กระจายไปตามตัวคัปเปิลอร์นี้จะมีการแพร่กระจายในโหมดคู่ และ คี่สลับกันไป ผลรวมของแรงดันที่เกิดขึ้นที่พอร์ต 2,3 และ 4 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 (ก) ถ้าที่พอร์ตสองพอร์ตที่ปลายของอุปกรณ์ 4 พอร์ตนี้มีแรงดันที่มีเฟสเดียวกัน และ มีขนาดเท่ากัน นั้นแสดงว่าอุปกรณ์ 4 พอร์ตนี้ทำงานอยู่ในโหมดคู่ ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 (ข) และ ในทางกลับกันถ้าที่พอร์ตสองพอร์ตที่ปลายของอุปกรณ์ 4 พอร์ตนี้มีแรงดันที่กลับเฟสกัน นั้นแสดงว่าอุปกรณ์ 4 พอร์ตนี้ทำงานอยู่ในโหมดคี่ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.12 (ค) ค่าแรงดัน และ กระแสในแต่ละพอร์ตเมื่อทำงานอยู่ในโหมดคู่จะใช้สัญลักษณ์ที่เขียนห้อยไว้ข้างบนดังนี้ “(e)” และ เมื่อค่าแรงดัน และ กระแสในแต่ละพอร์ตทำงานอยู่ในโหมดคี่จะใช้สัญลักษณ์ที่เขียนห้อยไว้ข้างบนดังนี้ “(o)” ผลรวมของแรงดันในแต่ละพอร์ตเมื่อพิจารณาแบบซูเปอร์โพสิชัน (Superposition) ของโหมดคู่ และ โหมดคี่ จะเป็นดังต่อไปนี้

$$V_1 = V_i^{(e)} + V_i^{(o)}$$

$$V_2 = V_o^{(e)} + V_o^{(o)}$$

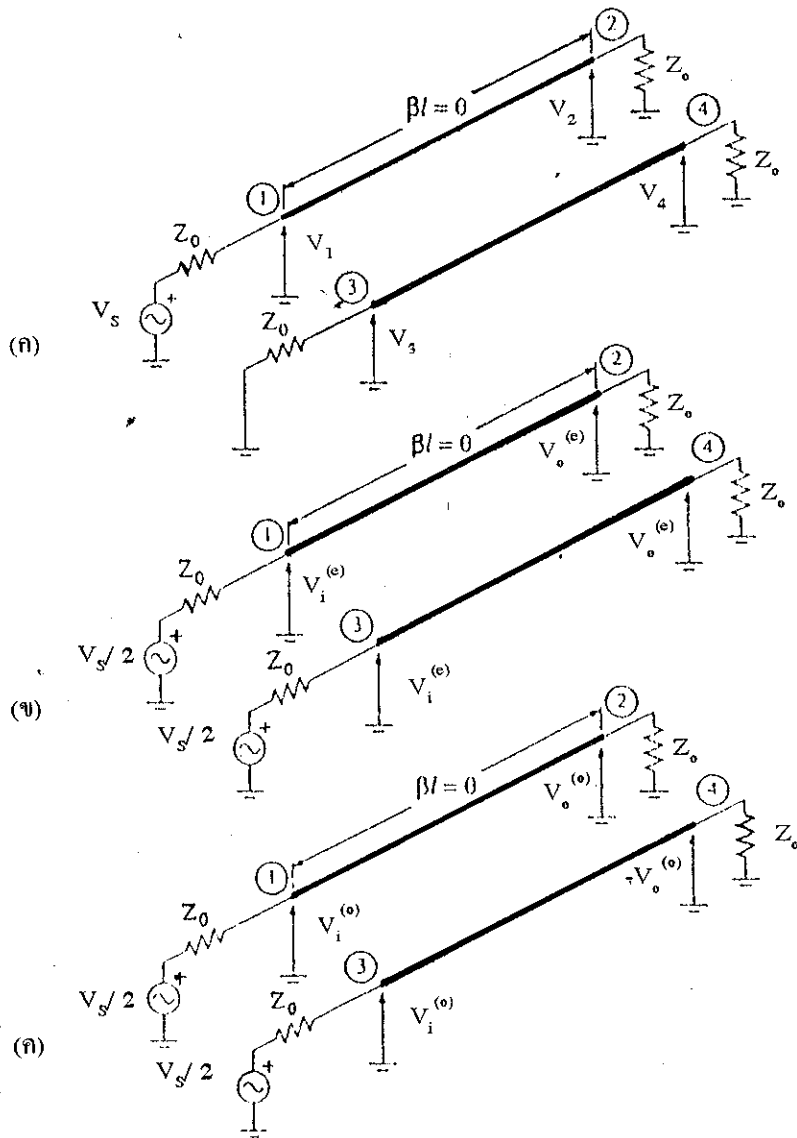
$$V_3 = V_i^{(e)} - V_i^{(o)}$$

$$V_4 = V_o^{(e)} - V_o^{(o)}$$

รูปแบบของสนามไฟฟ้าตามขวางที่แพร่กระจายไปในตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางในกรณีทำงานในโหมดคู่ และ โหมดคี่แสดงไว้ในรูปที่ 2.13

ค่าอินดักแตนซ์ของตัวคัปเปิลอร์นี้สามารถหาได้เช่นเดียวกับกรณีของแถบไมโครสตริปเดี่ยวกล่าวคือ สามารถคำนวณได้จากค่าอินดักแตนซ์ต่อหน่วยความยาวในแต่ละโหมด และ ค่าอิมพีแดนซ์ในโหมดคู่ และ โหมดคี่แทนด้วย Z_{oe} และ Z_{oo} ซึ่งหาได้จากค่าคาปาซิแตนซ์ในแถบไมโครสตริปที่มีระยะนาบอยู่ในอากาศและสารไดอิเล็กตริก ค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละโหมคนั้นแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนแรงดันต่อกระแสของสัญญาณที่แพร่กระจายไปตามแถบไมโครสตริปในแต่ละแถบ เมื่อแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมแน่นต่อถูกกระตุ้นอย่างเหมาะสม

ในการวิเคราะห์แรงดันของตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางนี้สามารถวิเคราะห์ได้เช่นเดียวกับการวิเคราะห์แรงดันในสายส่งสัญญาณทั่วไป เมื่อพิจารณาสายส่งสัญญาณซึ่งมีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ Z_0 ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 ให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแรงดันที่โหลด และ แผลงจ่ายที่ปลายของสายส่งสัญญาณ (Voltage Reflection Coefficients) แทนด้วย Γ_L และ Γ_S ตามลำดับ แรงดันที่ปลายของสายส่งสัญญาณเป็นดังต่อไปนี้



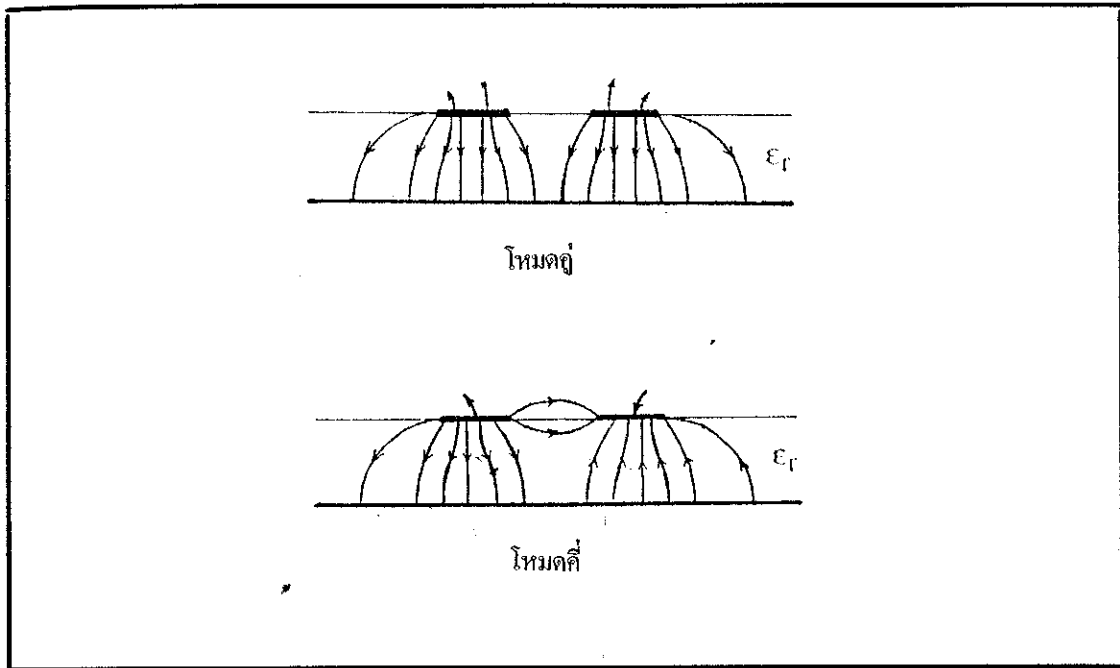
รูปที่ 2.12 พารามิเตอร์สำหรับแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อ

ก) ผลรวมแรงดันทั้งหมดเมื่อพอร์ต 1 ถูกกระตุ้นโดย

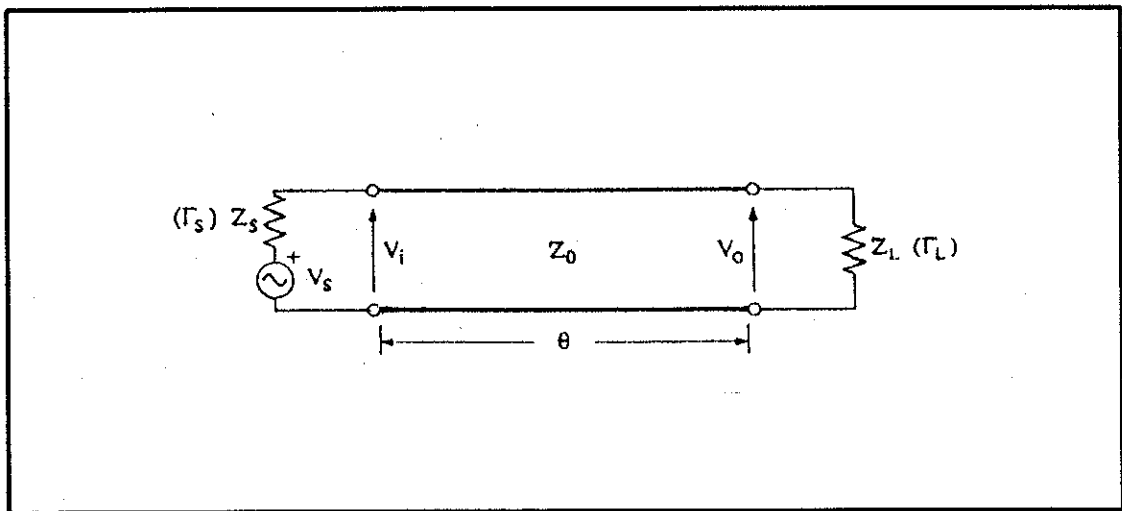
สัญญาณอินพุต แรงดันใน ก) จะจำแนกออกเป็น 2 ชุดคือ

ข) แรงดันในโหมดคู่

ค) แรงดันในโหมดคี่



รูปที่ 2.13 สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายไปตามไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อกันของสัญญาณใน โหมดคู่ และ โหมดคี่



รูปที่ 2.14 พารามิเตอร์ที่เข้าของสายส่งสัญญาณที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ Z_0

$$V_i = (V_s/2) \times [1 - (\Gamma_s - \Gamma_L e^{-j2\theta}) / (1 - \Gamma_s \Gamma_L e^{-j2\theta})] \quad (2.21)$$

$$V_o = (V_s/2) \times [(1 - \Gamma_s) \times (1 + \Gamma_L) e^{-j\theta} / (1 - \Gamma_s \Gamma_L e^{-j2\theta})] \quad (2.22)$$

เมื่อ $\Gamma_s = \Gamma_L = \Gamma$ ดังนั้นสมการข้างต้น เขียนได้ใหม่ได้ดังนี้

$$V_i = (V_g/2) \times [1 - \Gamma \times (1 - e^{-j2\theta})] / (1 - \Gamma^2 e^{-j2\theta}) \quad (2.23)$$

และ
$$V_o = (V_g/2) \times [(1 - \Gamma^2) e^{-j2\theta} / (1 - \Gamma^2 e^{-j2\theta})] \quad (2.24)$$

แรงดันของสายส่งสัญญาณจากสมการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแถบไมโครสตริป ที่เกิดการคับปลิงในเทอมของโหนดคู่และโหนดคี่ในตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางได้ สำหรับโหนดคู่ ในรูปที่ 2.12 (ข) นั้น เมื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดและแหล่งจ่าย แทนด้วย Z_o และลักษณะ สมบัติทางอิมพีแดนซ์แทนด้วย Z_{oe} ดังนั้นจะได้

$$\Gamma \rightarrow \Gamma_e = (Z_o - Z_{oe}) / (Z_o + Z_{oe}) \quad (2.25)$$

เมื่อค่า V_g ในรูปที่ 2.14 มีค่าเป็น $V_g/2$ ดังนั้นค่าแรงดันขาเข้า และ แรงดันขาออกในรูปที่ 2.11 (ข) จะเป็นดังต่อไปนี้

$$V_i^{(e)} = (V_g/4) \times [1 - \Gamma_e \times (1 - e^{-j2\theta})] / (1 - \Gamma_e^2 e^{-j2\theta}) \quad (2.26)$$

และ
$$V_o^{(e)} = (V_g/4) \times [(1 - \Gamma_e^2) e^{-j2\theta} / (1 - \Gamma_e^2 e^{-j2\theta})] \quad (2.27)$$

ในทำนองเดียวกันค่าแรงดันขาเข้า และ แรงดันขาออกในรูปที่ 2.12 (ค) เป็นดังต่อไปนี้

$$\Gamma \rightarrow \Gamma_o = (Z_o - Z_{oo}) / (Z_o + Z_{oo}) \quad (2.28)$$

จะได้

$$V_i^{(o)} = (V_g/4) \times [1 - \Gamma_o \times (1 - e^{-j2\theta})] / (1 - \Gamma_o^2 e^{-j2\theta}) \quad (2.29)$$

$$V_o^{(o)} = (V_g/4) \times [(1 - \Gamma_o^2) e^{-j2\theta} / (1 - \Gamma_o^2 e^{-j2\theta})] \quad (2.30)$$

เมื่อ θ ในสมการที่ (2.29) และ (2.30) คือตัวเดียวกันกับ θ ในสมการที่ (2.26) และ (2.27) โดยตั้งอยู่ในสมมติฐานที่ว่าความเร็วเฟสในโหนดคี่ และ โหนดคี่นั้นมีค่าเท่ากัน ในขั้นต่อไปจะทำการพิจารณาในส่วนของแต่ละพอร์ต

2.5.2 สภาวะของการแมตซ์ที่ขาเข้าที่พอร์ตที่ 1

ให้สัญญาณขาเข้าป้อนเข้าที่พอร์ตที่ 1 เท่านั้น ซึ่งผลรวมของแรงดันขาเข้าเป็นดังต่อไปนี้
 $V_1 = V_1^{(e)} + V_1^{(o)}$ ดังนั้น

$$V_1 = (V_s/4) \times \{1 + 1 - (1 - e^{-j2\theta}) \times [\Gamma_e / (1 - \Gamma_e^2 e^{-j2\theta}) + \Gamma_o / (1 - \Gamma_o^2 e^{-j2\theta})]\} \quad (2.31)$$

สภาวะสำหรับการแมตซ์ที่พอร์ตที่ 1 ในรูปที่ 2.12 (ก) นั้น เมื่อกำหนดให้ $V_1 = V_s/2$ ซึ่งจะได้ดังต่อไปนี้

$$\Gamma_e / (1 - \Gamma_e^2 e^{-j2\theta}) + \Gamma_o / (1 - \Gamma_o^2 e^{-j2\theta}) = 0 \quad (2.32)$$

จากสมการ (2.25) และ (2.28) จะได้ว่า

$$\Gamma_e = -\Gamma_o \rightarrow Z_o / Z_{oe} = Z_{oo} / Z_o$$

นั่นคือ $Z_{oe} Z_{oo} = Z_o^2 \quad (2.33)$

2.5.3 สภาวะของพอร์ตที่ 4 (Isolate Port)

ผลรวมของแรงดันขาออกที่พอร์ต 4 คือ $V_o^{(e)} - V_o^{(o)}$ เป็นดังต่อไปนี้

$$V_4 = (V_s/4) \times \{[(1 - \Gamma_e^2) e^{j\theta} / (1 - \Gamma_e^2 e^{-j2\theta})] - [(1 - \Gamma_o^2) e^{j\theta} / (1 - \Gamma_o^2 e^{-j2\theta})]\} \quad (2.34)$$

และเมื่อกำหนดให้ $\Gamma_e = -\Gamma_o$ แล้วจะทำให้ค่า V_4 ในสมการ (2.34) มีค่าเท่ากับ 0

2.5.4 สภาวะของพอร์ตที่ 3 (Coupled Port)

พอร์ตที่ 3 คือ พอร์ตที่การกลับปลิงของสัญญาณในตัวคัปเปิลอร์นี้ ซึ่งสามารถเขียนผลรวมของแรงดันที่พอร์ตที่ 3 นี้ได้ดังต่อไปนี้

$$V_3 = (V_s/4) \times \{1 - [\Gamma_e \times (1 - e^{-j2\theta}) / (1 - \Gamma_e^2 e^{-j2\theta})] - 1 + [\Gamma_o \times (1 - e^{-j2\theta}) / (1 - \Gamma_o^2 e^{-j2\theta})]\} \quad (2.35)$$

เมื่อ $V_3 = -(V_s/2) \times \{\Gamma_e \times (e^{j\theta} - e^{-j\theta}) / (e^{j\theta} - \Gamma_e^2 e^{-j\theta})\} \quad (2.36)$

จะได้
$$V_3 = -(V_g/2) \times \{ 2j \Gamma_e \sin \theta / [(1 - \Gamma_e^2) \cos \theta + j \sin \theta (1 + \Gamma_e^2)] \} \quad (2.37)$$

$$= -(V_g/2) \times [2 \Gamma_e / (1 + \Gamma_e^2)] \times j \sin \theta / [(1 - \Gamma_e^2) / (1 + \Gamma_e^2)] \cos \theta + j \sin \theta$$

ดังนั้นจากสมการ (2.25) และ (2.33) สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

โดยการนิยาม
$$-2 \Gamma_e / (1 + \Gamma_e^2) = (Z_{0e} - Z_{0o}) / (Z_{0e} + Z_{0o}) \quad (2.38)$$

$$= c$$

เมื่อ c คือสัมประสิทธิ์ของการกลับปฏิกิริยา ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแรงดันดังต่อไปนี้

$$1 - c^2 = \{(1 - \Gamma_e^2) / (1 + \Gamma_e^2)\}^2 \quad (2.39)$$

ดังนั้น
$$V_3 = (V_g/2) \times \{ j c \sin \theta / (1 - c^2 \cos \theta + j \sin \theta) \} \quad (2.40)$$

2.5.5 สภาวะของพอร์ตที่ 2 (Direct Port)

ในการพิจารณาถึงสภาวะของพอร์ตที่ 2 นี้ยังคงวิเคราะห์ในสภาวะเดิมกล่าวคือ กำหนดให้ $\Gamma_e = -\Gamma_o$ ดังนั้นผลรวมของแรงดันที่พอร์ตที่ 2 เป็นดังต่อไปนี้

$$V_2 = (V_g/2) \times \{ 1 - c^2 / (1 - c^2 \cos \theta + j \sin \theta) \} \quad (2.41)$$

โดยทั่วไปแล้วค่าของการกลับปฏิกิริยา (Coupling) แบบมทีทิสทางจะแสดงในรูปของ dB เป็นดังนี้

$$\text{coupling, } C \text{ (dB)} = -20 \log_{10} (c) \quad (2.42)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$Z_{0e} = Z_0 \{(1+c)/(1-c)\}^{1/2} = Z_0 \{(1+10^{-C/20}) / (1-10^{-C/20})\} \quad (2.43)$$

และ
$$Z_{0o} = Z_0^2 / Z_{0e} = Z_0 \{(1-10^{-C/20}) / (1+10^{-C/20})\} \quad (2.44)$$

2.5.6 พารามิเตอร์ของแถบไมโครสตริปที่วางขนานกันและเกิดการเชื่อมต่อของสัญญาณขึ้น

การวิเคราะห์แถบไมโครสตริปที่วางขนานกันและเกิดการคับปลิงของสัญญาณขึ้นนั้น มีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังต่อไปนี้ ค่าความกว้างของแถบสตริปที่เกิดการคับปลิงของสัญญาณต่อความหนาของสับสเตรต (w/h) ค่าระยะห่างระหว่างแถบที่วางขนานกันที่ทำให้เกิดการคับปลิงของสัญญาณ (s/h) และ สภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผลของไดอิเล็กตริก ส่วนค่าอิมพีแดนซ์จะเสนอในรูปของค่าอิมพีแดนซ์ในโหมดคู่ Z_{0e} และ โหมดคี่ Z_{0o} และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผล (Effective Relative Permittivity) ต้องวิเคราะห์ในแต่ละโหมดเช่นเดียวกัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วเฟสดังต่อไปนี้

$$v_{\text{phase}}^{(e, o)} = c / \epsilon_{\text{eff}}^{(e, o)} \quad (2.45)$$

จากการสังเกตหลักการของ Kirschning และ Jansen [4],[5] จะเห็นว่า Z_{0e}, Z_{0o} และ $\epsilon_{\text{eff}}^{(e, o)}$ เป็นฟังก์ชันของค่า w/h , s/h และ ความถี่ (f) ด้วย สูตรในการคำนวณของ Kirschning และ Jansen จะใช้สัญลักษณ์ w แทนความกว้างของแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อของสัญญาณ และ ใช้สัญลักษณ์ s แทนระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปที่วางขนานกันและเกิดการเชื่อมต่อของสัญญาณ และสูตรต่าง ๆ ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น $\epsilon_{\text{eff}}^{(e)}$ และ $\epsilon_{\text{eff}}^{(o)}$ เป็นดังต่อไปนี้

$$u = w/h, \quad g = s/h$$

$$\text{และ } 0.1 \leq u \leq 10.0 \quad 0.1 \leq g \leq 10.0 \quad 1.0 \leq \epsilon_r \leq 18.0$$

ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดได้ $< 0.7\%$ สำหรับค่า $\epsilon_{\text{eff}}^{(e)}$, $< 0.5\%$ สำหรับค่า $\epsilon_{\text{eff}}^{(o)}$, $< 0.6\%$ สำหรับค่า Z_{0e} และ Z_{0o}

ในการคำนวณค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผลในโหมดคู่สามารถคำนวณได้ตามสูตรต่อไปนี้

$$\epsilon_{\text{eff}}^{(e)} = (\epsilon_r + 1)/2 + (\epsilon_r - 1) \times \{ [1 + (10/v)]^{-a(v) \times b(\epsilon_r)} \} / 2 \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned}
 \text{ซึ่ง} \quad v &= u \times (20 + g^2)/(10 + g^2) + g \times \exp(-g) \\
 a_e(v) &= 1 + (1/49) \times \ln\{(v^4 + (v/52)^2)/(v^4 + 0.432)\} + (1/18.7) \times \ln\{1 + (v/18.1)^3\} \\
 b_e(\varepsilon_r) &= 0.564 \times \{(\varepsilon_r - 0.9)/(\varepsilon_r + 3.0)\}^{0.053}
 \end{aligned}$$

และการคำนวณค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิภาพในโหมดก็สามารถคำนวณได้ตามสูตรต่อไปนี้

$$\varepsilon_{\text{eff}}^{(o)} = \varepsilon_{\text{eff}} + \{(\varepsilon_r + 1)/2 + a_o(u, \varepsilon_r) - \varepsilon_{\text{eff}}\} \times \exp(-c_o \times g^d) \quad (2.47)$$

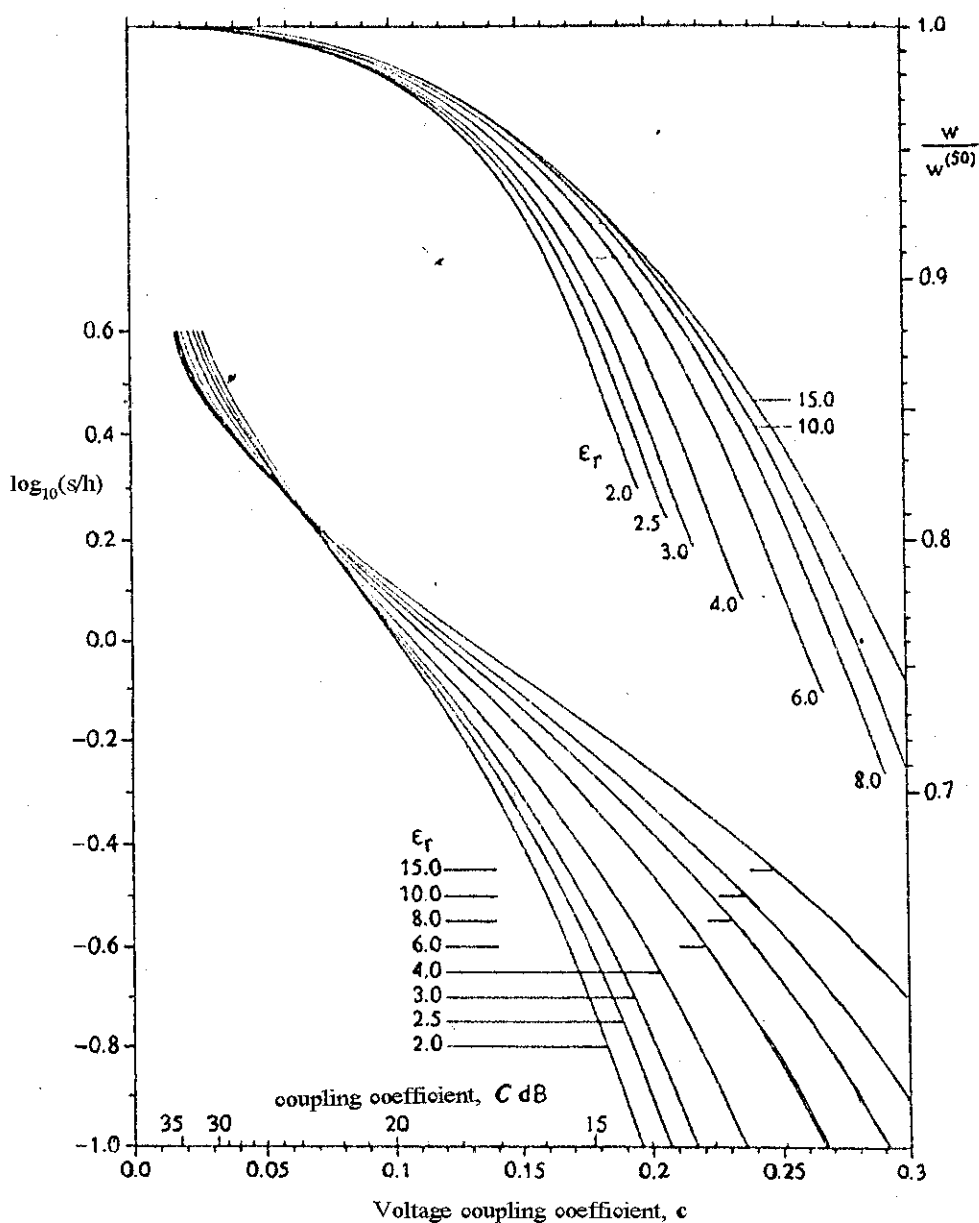
$$\begin{aligned}
 \text{ซึ่ง} \quad a_o(u, \varepsilon_r) &= 0.7287 \times \{\varepsilon_{\text{eff}} - (\varepsilon_r + 1)/2\} \times (1 - \exp(-0.179u)) \\
 b_o(\varepsilon_r) &= 0.747 \times \varepsilon_r / (0.15 + \varepsilon_r) \\
 c_o &= b_o(\varepsilon_r) - (b_o(\varepsilon_r) - 0.207) \times \exp(-0.414u) \\
 d_o &= 0.593 + 0.694 \times \exp(-0.562u)
 \end{aligned}$$

สำหรับการแมตช์ระหว่างตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางกับสายนำสัญญาณจากแหล่งจ่ายและโหลดโดยทั่วไปแล้วจะถูกออกแบบมาเพื่อต่อกับลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เท่ากับ $50 \, \Omega$ ซึ่งเป็นการรวมของค่า Z_{∞} และ Z_{00} และสถานะนี้หาได้จากสมการ (2.33) ความกว้างของแถบไมโครสตริปซึ่งแปรผันตามกับค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง

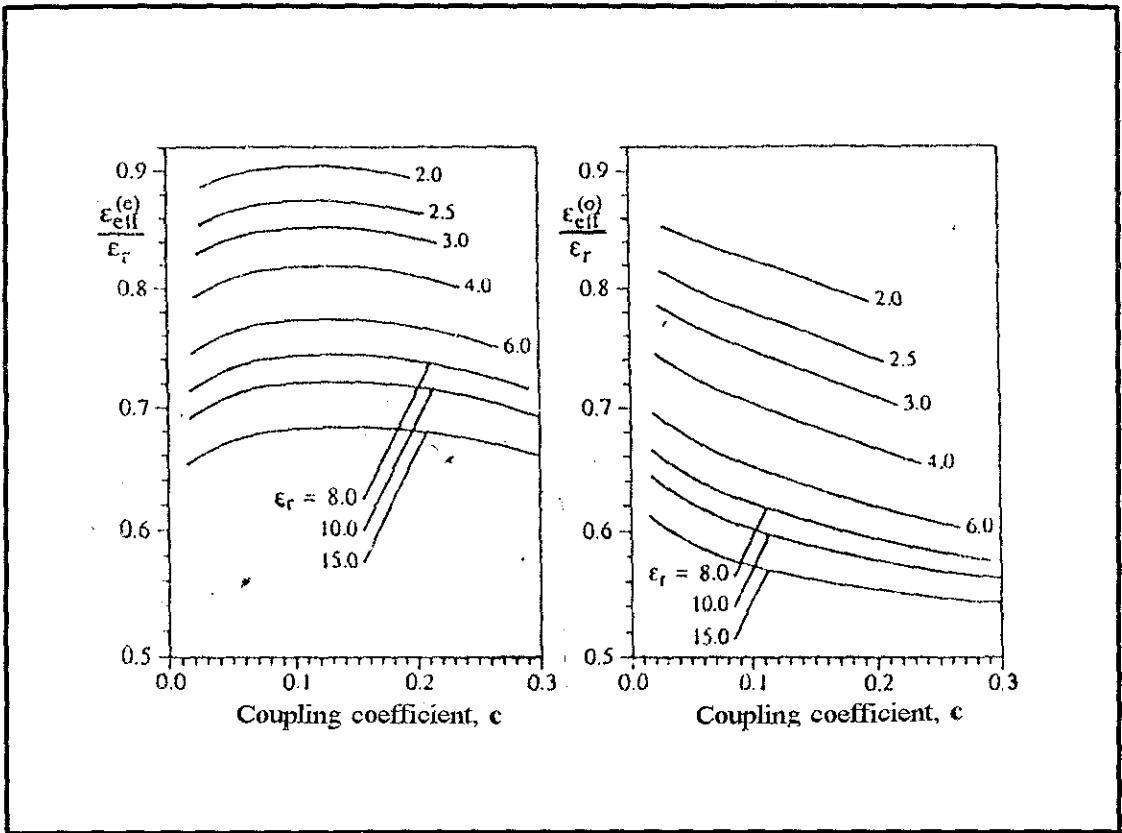
ในการออกแบบคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางนั้นก่อนที่จะพิจารณาพารามิเตอร์ของสาย จำเป็นต้องทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงของตัวคัปเปิลอร์เสียก่อน ซึ่งเมื่อทราบค่าดังกล่าวแล้วจึงหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแถบไมโครสตริปได้โดยใช้รูปที่ 2.15 ซึ่งเส้นกราฟทั้งหมดจะอยู่ในช่วง $0.1 < s/h < 4.0$ และแต่ละเส้นกราฟ จะให้ความกว้างของแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อของสัญญาณ โดยแสดงความสัมพันธ์เป็นอัตราส่วนกับความกว้างของแถบไมโครสตริปที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เท่ากับ $50 \, \Omega$

เส้นกราฟที่แสดงถึงสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิภาพในแต่ละโหมด ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าเป็นฟังก์ชันของค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิภาพที่นำไปใช้ในการออกแบบตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางนั้นคำนวณได้จากค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิภาพเฉลี่ยในโหมดคู่และโหมดคี่ดังต่อไปนี้

$$\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} = (\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}^{(e)}} + \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}^{(o)}})/2 \quad (2.48)$$



รูปที่ 2.15 แสดงค่าระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปที่เกิดการคับปลิงของสัญญาณ และความกว้างของแถบสตริปที่เกิดการคับปลิง



รูปที่ 2.16 แสดงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผลในของโหมคคู่และโหมคเดี่ยวที่ใช้ในการออกแบบคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง

2.6 สรุป

ในบทนี้เป็นการศึกษาถึงโครงสร้างของไมโครสตริป และศึกษาถึงการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปตามไมโครสตริปว่ามีพฤติกรรมอย่างไร จากนั้นได้ทำการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่นำไปใช้ในการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ และ ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง ในส่วนของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ เลือกศึกษาตามวิธีการออกแบบของ Butterworth หรือ Maximally-flat และในส่วนของตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางได้ศึกษาถึงพฤติกรรมของคลื่นที่แพร่กระจายไปในโหมคคู่ และโหมคเดี่ยว เมื่อทราบถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของไมโครสตริป และค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ๆ ของไมโครสตริปแล้ว ในขั้นตอนต่อไปคือการนำทฤษฎีต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาในบทนี้ไปทำการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF และ ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบไมโครสตริปเพื่อประยุกต์ใช้งานและวิธีการทดลอง

3.1 กล่าวนำ

การประยุกต์ไมโครสตริปเพื่อใช้งานของโครงงานที่เลือกศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF และตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง ซึ่งจากทฤษฎีพื้นฐานในบทที่ 2 แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของไมโครสตริปที่ประกอบด้วยความกว้างและความยาวนั้นมีผลในการออกแบบ เช่น ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ จะใช้ในการคำนวณหาความกว้างของแถบไมโครสตริป และในรายละเอียดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบไมโครสตริป เช่น ความยาวของแถบไมโครสตริปและระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญอีกส่วนหนึ่ง ที่ประกอบให้ไมโครสตริปที่ออกแบบมีลักษณะที่ใช้งานได้เสมือนตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF และตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง ซึ่งรายละเอียดได้แสดงไว้ในบทนี้ รวมถึงวิธีการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าไมโครสตริปที่ประยุกต์นั้นมีลักษณะการใช้งานเสมือนเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF และตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางหรือไม่

3.2 ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF

3.2.1 การออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF

ตามวิธีการของ Butterworth หรือ Maximally-flat ในการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ที่ได้ศึกษานั้น ค่าคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ซึ่งเป็นส่วนประกอบของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้ [3]

$$L_k = k_k Z_0 / \omega \quad ; H \quad (3.1)$$

$$C_k = k_k / \omega Z_0 \quad ; F \quad (3.2)$$

ซึ่งค่า k_k สามารถหาได้จากสมการ (2.20) และค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม โดยเลือกออกแบบให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz และเลือกโพลเป็นจำนวน 5 โพล ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่าคาปาซิแตนซ์ และค่าอินดักแตนซ์จากสมการข้างต้นดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

เนื่องจากความกว้างของแถบไมโครสตริป (w) ความหนาของสารไดอิเล็กตริก (h) และความยาวของแถบไมโครสตริป (l) นั้นเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการออกแบบให้ไมโครสตริปมีลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์หรืออินดักแตนซ์ ดังนั้นค่าความกว้างของแถบไมโครสตริปหาได้จากสมการ (2.12) และ (2.13) ส่วนความยาวของแถบไมโครสตริปนั้นแยกออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนของคาปาซิแตนซ์และส่วนของอินดักแตนซ์โดยใช้สมการต่อไปนี้ [3]

$$l = (\lambda_L / 2\pi) \sin^{-1} (\omega C_k Z_L) \quad ; \text{คาปาซิแตนซ์} \quad (3.3)$$

$$l = (\lambda_H / 2\pi) \sin^{-1} (\omega L_k / Z_H) \quad ; \text{อินดักแตนซ์} \quad (3.4)$$

และในการคำนวณหาความยาวของแถบไมโครสตริปนั้น จำเป็นต้องทราบค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิภาพ (ϵ_{eff}) และความยาวคลื่น (λ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.14) (2.15) และสมการ (2.16) และได้แสดงค่าที่คำนวณได้ไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าคาปาซิแตนซ์ และ อินดักแตนซ์ที่ได้จากการคำนวณ

k	k_k	L_k , nH	C_k , pF
1	0.618	-	2.458
2	1.618	16.09	-
3	2.000	-	7.958
4	1.618	16.09	-
5	0.618	-	2.458

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าของส่วนประกอบของไมโครสตริปที่ค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ

Z_0 , Ω	w/h	w , mm	ϵ_{eff}	λ , mm at 8 MHz
20	6.663	9.497	4.035	0.187
30	3.952	5.69	3.846	0.1912
50	1.79	2.58	3.584	0.1981
100	0.399	0.574	3.268	0.207

จากทฤษฎีที่ได้ศึกษาตามวิธีการของ Butterworth หรือ Maximally-flat ในการออกแบบ ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ให้แถบไมโครสตริปมีความกว้างและความยาว จนได้ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์นั้น พบว่าที่ปลายของแถบนี้จะเกิด ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ที่เสมือนเป็นอินดักแตนซ์เพิ่มขึ้นอีกด้วย และค่าอินดักแตนซ์ที่เกิด เนื่องจากการตัดแถบไมโครสตริปดังกล่าว สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [3]

$$L_c = (Z_L/\omega) \tan (\pi l / \lambda_L) \quad (3.5)$$

และในกรณีเดียวกันนี้ เมื่อออกแบบให้แถบไมโครสตริปมีความกว้างและความยาว จนได้ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นอินดักแตนซ์นั้น พบว่าที่ปลายของแถบนี้จะเกิด ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ที่เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้นเช่นกัน และค่าคาปาซิแตนซ์ ที่เกิดเนื่องจากการตัดแถบไมโครสตริปดังกล่าว สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [3]

$$C_L = (1/\omega Z_H) \tan (\pi l / \lambda_H) \quad (3.6)$$

เริ่มออกแบบโดยกำหนดค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ให้มีค่าต่ำ (Z_L) ในการคำนวณ เมื่อต้องการให้ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์นี้เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์ เช่นเดียวกันกับวงจร ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF และในโครงการนี้กำหนดให้

$$Z_L = 30 \, \Omega \quad \text{เมื่อ} \quad C_1 = C_5 = 2.458 \, \text{pF}$$

$$Z_L = 20 \, \Omega \quad \text{เมื่อ} \quad C_3 = 2.458 \, \text{pF}$$

และกำหนดค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ให้มีค่าสูง (Z_H) ในการคำนวณเมื่อต้องการ ให้ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์นี้เสมือนเป็นอินดักแตนซ์เช่นเดียวกันกับวงจรของตัวกรอง สัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF และในโครงการนี้กำหนดให้

$$Z_H = 100 \, \Omega \quad \text{เมื่อ} \quad L_2 = L_5 = 16.09 \, \text{nH}$$

การคำนวณหาความยาวของแถบไมโครสตริปเพื่อให้มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์และเสมือนเป็นอินดักแตนซ์นั้นใช้สมการ (3.3) และ (3.4) ในการคำนวณ

ตามลำดับ โดยเลือกออกแบบให้ค่าการลดทอนของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ใช้ในการคำนวณตามสมการดังกล่าวได้จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ค่าความยาวที่ได้จากการคำนวณจะได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ความยาวของ } C_1 \text{ และ } C_5 \Rightarrow l_1 = l_5 = 1.159 \text{ cm}$$

$$\text{ความยาวของ } C_3 \Rightarrow l_3 = 2.755 \text{ cm}$$

$$\text{ความยาวของ } L_2 \text{ และ } L_4 \Rightarrow l_2 = l_4 = 3.109 \text{ cm}$$

ส่วนค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นที่ปลายของแถบไมโครสตริปเมื่อแถบนี้มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ตามลำดับนั้น จะใช้สมการ (3.5) และ (3.6) ในการคำนวณ และได้ค่าดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าอินดักแตนซ์ที่เกิดขึ้น } L_{C1} = L_{C5} = 1.1474 \text{ nH}$$

$$\text{ค่าอินดักแตนซ์ที่เกิดขึ้น } L_{C3} = 1.989 \text{ nH}$$

$$\text{ค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้น } C_{L2} = C_{L4} = 1.0131 \text{ pF}$$

ค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ ที่เกิดขึ้นที่ปลายของแถบไมโครสตริปดังกล่าวนี้มีผลคือทำให้ค่าอินดักแตนซ์ และค่าคาปาซิแตนซ์ของวงจรตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ซึ่งคำนวณไว้ในตารางที่ 3.1 มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ค่าอินดักแตนซ์เดิมและค่าคาปาซิแตนซ์เดิมในตารางที่ 3.1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงต้องชดเชยโดยการนำค่าที่เพิ่มขึ้นนี้ไปหักออกจากของเดิมในตารางที่ 3.1 นั้นเองและค่าที่ทำการชดเชยแล้วจะได้ดังต่อไปนี้

$$C_1 = C_5 = 2.458 \text{ nF} - 1.031 \text{ nF} = 1.446 \text{ pF}$$

$$C_3 = 7.958 \text{ nF} - 2 \times (1.0131 \text{ nF}) = 5.932 \text{ pF}$$

$$L_2 = L_4 = 16.09 \text{ nH} - 1.1474 \text{ nH} - 1.989 \text{ nH} = 12.953 \text{ nH}$$

ค่าคาปาซิแตนซ์และค่าอินดักแตนซ์ที่ได้ตามข้างบนนั้น เมื่อนำไปคำนวณหาความยาวของแถบไมโครสตริปแล้ว แถบไมโครสตริปใหม่จะเป็นแถบที่ถูกทำการชดเชยจากผลที่ปลายของแถบไมโครสตริปนั้นมีค่าอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ที่เกินมาตามลำดับ โดยที่การคำนวณ

ความยาวของแถบไมโครสตริปใหม่นี้ยังคงใช้สมการ (3.3) และ (3.4) เหมือนเดิม และความยาวใหม่ที่คำนวณได้จะเป็นดังต่อไปนี้

$$\text{ความยาวของ } C_1 \text{ และ } C_5 \Rightarrow l_1 = l_5 = 0.6688 \text{ cm}$$

$$\text{ความยาวของ } C_3 \Rightarrow l_3 = 1.898 \text{ cm}$$

$$\text{ความยาวของ } L_2 \text{ และ } L_4 \Rightarrow l_2 = l_4 = 2.34 \text{ cm}$$

เนื่องจากที่บริเวณของการต่อแบบสเทประหว่างแถบไมโครสตริปที่ใช้แมตซ์ (w^{50}) และแถบไมโครสตริปที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์ (C_1, C_5) นั้นจะเกิดสนามฟริงกิงคาปาซิแตนซ์ขึ้นซึ่งได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 ดังนั้นการชดเชยสนามฟริงกิงคาปาซิแตนซ์นี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (2.18) ได้แก่

$$\Delta l_{oc}/h = 0.412 \times [(\epsilon_{eff} + 3)/(\epsilon_{eff} - 0.258)] \times [(w/h + 0.262)/(w/h + 0.813)]$$

เมื่อแทนแล้วจะได้ $\Delta l_{oc}/h = 0.3793$

$$\Delta l_{oc} = 0.546$$

ดังนั้นความยาวที่เกินมาสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.17) ได้แก่

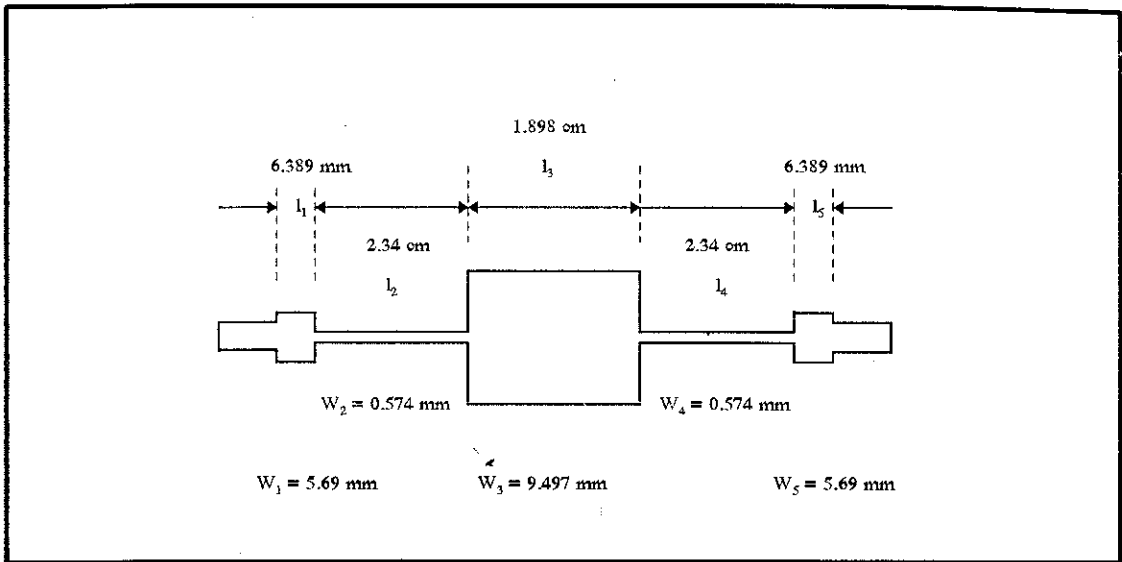
$$\Delta l = [1 - (w_1/w_2)] \times \Delta l_{oc} \quad ; w_1 < w_2$$

เมื่อแทนค่าแล้วได้ $\Delta l = 0.2995 \text{ mm}$

เมื่อนำค่า Δl ที่ได้นี้ ลบออกจากความยาวของแถบไมโครสตริปที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์ C_1 และ C_5 จะได้ความยาวใหม่เป็นดังต่อไปนี้

$$l_1 = l_5 = 6.688 \text{ mm} - 0.2995 \text{ mm} = 6.389 \text{ mm}$$

ดังนั้นค่าความกว้างและความยาวของแถบไมโครสตริป ที่ออกแบบเพื่อใช้งานเสมือนเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF โดยสมบูรณ์แล้ว ซึ่งจะมีรูปร่างดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำที่มีค่าการลดทอนเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz

เนื่องจากผลการทดลอง ที่ทำการหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ไม่ใกล้เคียงกับทฤษฎีที่ทำการศึกษาไว้ จึงทดลองเพิ่มเติมโดยทำการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ขึ้นอีกและเลือกให้มีค่าของการลดทอนสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 600 MHz และวิธีในการคำนวณยังคงใช้วิธีเดิมดังที่กล่าวไว้แล้ว แต่ได้เลือกค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์แตกต่างไปจากการออกแบบครั้งแรกดังต่อไปนี้

เลือกค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ต่ำ (Z_L) เท่ากับ 20Ω ในการคำนวณเพื่อใช้หาความยาวของแถบไมโครสตริป ที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์ C_1 และ C_5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.28 pF

เลือกค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ต่ำ (Z_L) เท่ากับ 15Ω ในการคำนวณหาความยาวของแถบไมโครสตริป ที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์ C_1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.61 pF

และได้เลือกค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์สูง (Z_H) เท่ากับ 110Ω สำหรับการคำนวณหาความยาวของแถบไมโครสตริป ที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นอินดักแตนซ์ L_2 และ L_4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 21.46 nH

จากค่าทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นนั้น สามารถคำนวณหาความยาวของแถบไมโครสตริปที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ ที่ได้ทำการชดเชยทั้งหมดแล้วนั้น ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ความยาวของ } C_1 \text{ และ } C_5 \Rightarrow l_1 = l_5 = 0.6276 \text{ cm}$$

$$\text{ความยาวของ } C_3 \Rightarrow l_3 = 1.956 \text{ cm}$$

$$\text{ความยาวของ } L_2 \text{ และ } L_4 \Rightarrow l_2 = l_4 = 3.232 \text{ cm}$$

เนื่องจากผลการทดลอง ที่ทำการหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ยังคงมีค่าคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีที่ทำการศึกษาไว้จึงทำการทดลองเพิ่มเติมโดย ทำการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ขึ้นอีกและเลือกให้มิตการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 500 MHz และใช้วิธีเดิมในการคำนวณโดย

เลือกค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ต่ำ (Z_L) เท่ากับ 20 Ω ในการคำนวณเพื่อใช้หาความยาวของแถบไมโครสตริป ที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์ C_1 และ C_5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.93 pF

เลือกค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ต่ำ (Z_L) เท่ากับ 15 Ω ในการคำนวณหาความยาวของแถบไมโครสตริป ที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์ C_3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.73 pF

และได้เลือกค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์สูง (Z_H) เท่ากับ 110 Ω สำหรับการคำนวณหาความยาวของแถบไมโครสตริป ที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นอินดักแตนซ์ L_2 และ L_4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25.75 nH

จากค่าทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นนั้น สามารถคำนวณหาค่าความยาวของแถบไมโครสตริปที่มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ ที่ได้ทำการขดเชยทั้งหมดแล้วนั้น ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ความยาวของ } C_1 \text{ และ } C_5 \Rightarrow l_1 = l_5 = 0.759 \text{ cm}$$

$$\text{ความยาวของ } C_3 \Rightarrow l_3 = 2.3468 \text{ cm}$$

$$\text{ความยาวของ } L_2 \text{ และ } L_4 \Rightarrow l_2 = l_4 = 3.8789 \text{ cm}$$

เมื่อได้ขนาดของแถบไมโครสตริปที่ต้องการนำไปใช้งานเสมือนเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF แล้ว ต่อไปคือการตัดแถบไมโครสตริป ซึ่งโครงงานเลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์สองหน้า ที่มีสารไดอิเล็กตริกเป็นสารอีพ็อกซีในการกัดลายเป็นแถบไมโครสตริปตามที่ออกแบบไว้ เมื่อได้แผ่นวงจรไมโครสตริปที่มีลักษณะการใช้งานเป็นตัวกรองสัญญาณ

ผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ตามที่ออกแบบแล้ว ต่อไปคือการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณนี้

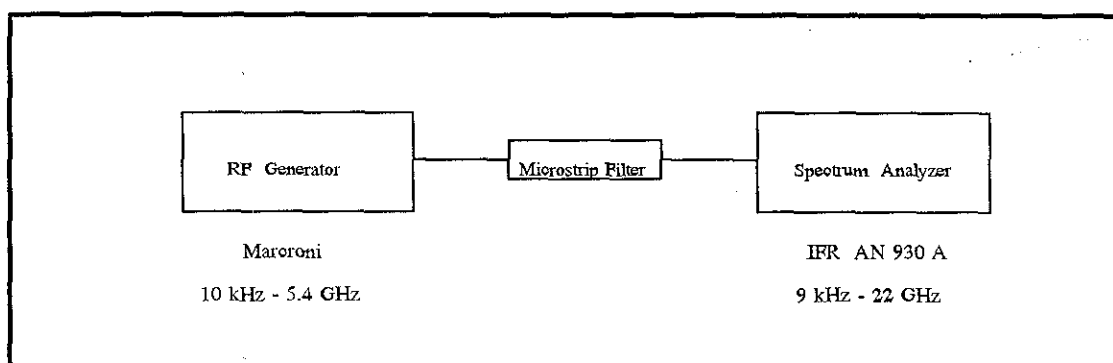
3.2.2 วิธีการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง คือ ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ที่ได้ ออกแบบไว้ เครื่อง Spectrum Analyzer และเครื่อง RF Generator และทำการทดลองดังต่อไปนี้

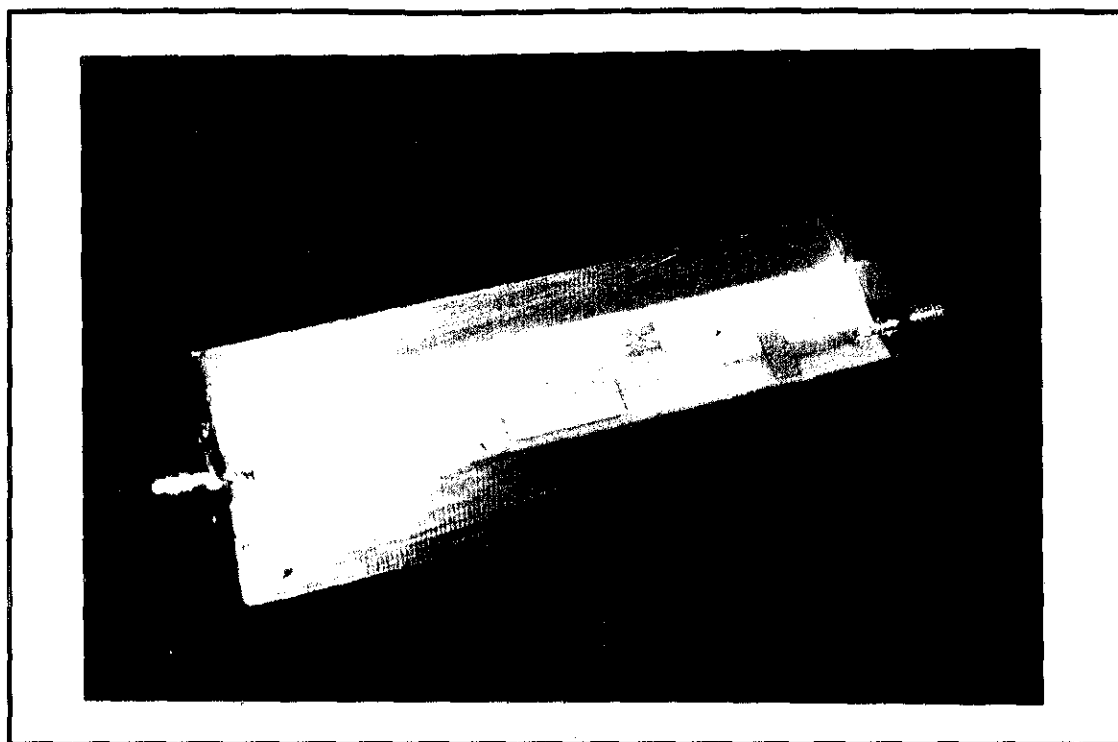
1. นำตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF มาทำความสะอาดโดยใช้ยางลบ ก่อนที่จะนำไปบัดกรีเข้ากับสายส่งสัญญาณ และสายส่งสัญญาณนี้จะใช้สายแบบกึ่งแข็งเพราะสามารถรองรับสัญญาณในย่านความถี่ขนาด UHF ได้ จากนั้นต่อตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF นี้เข้ากับเครื่อง RF Generator และเครื่อง Spectrum Analyzer ดังรูปที่ 3.2

2. ทำการทดลองหาผลตอบสนองทางความถี่ ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF โดยเปลี่ยนความถี่ทางด้านเครื่อง RF generator ตั้งแต่ 150 MHz จนถึง 2000 MHz (เหตุที่เริ่มบันทึกผลตอบสนองทางความถี่ที่ 150 MHz เพราะความถี่ที่ต่ำกว่านี้ จะข้ามเครื่องไปโดยไม่ผ่านตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF เพราะเครื่อง RF Generator และเครื่อง Spectrum Analyzer อยู่ใกล้กันมาก เนื่องจากสายส่งสัญญาณแบบกึ่งแข็งสั้นมากนั่นเอง) ปรับให้ค่าลดทอนที่เครื่อง RF Generator ให้เท่ากับ 40 dB เพื่อให้เครื่อง Spectrum Analyzer สามารถอ่านค่ากำลังงานด้านขาออกได้ แล้วทำการบันทึกค่ากำลังงานขาออก ณ ที่แต่ละความถี่ที่เปลี่ยนไป

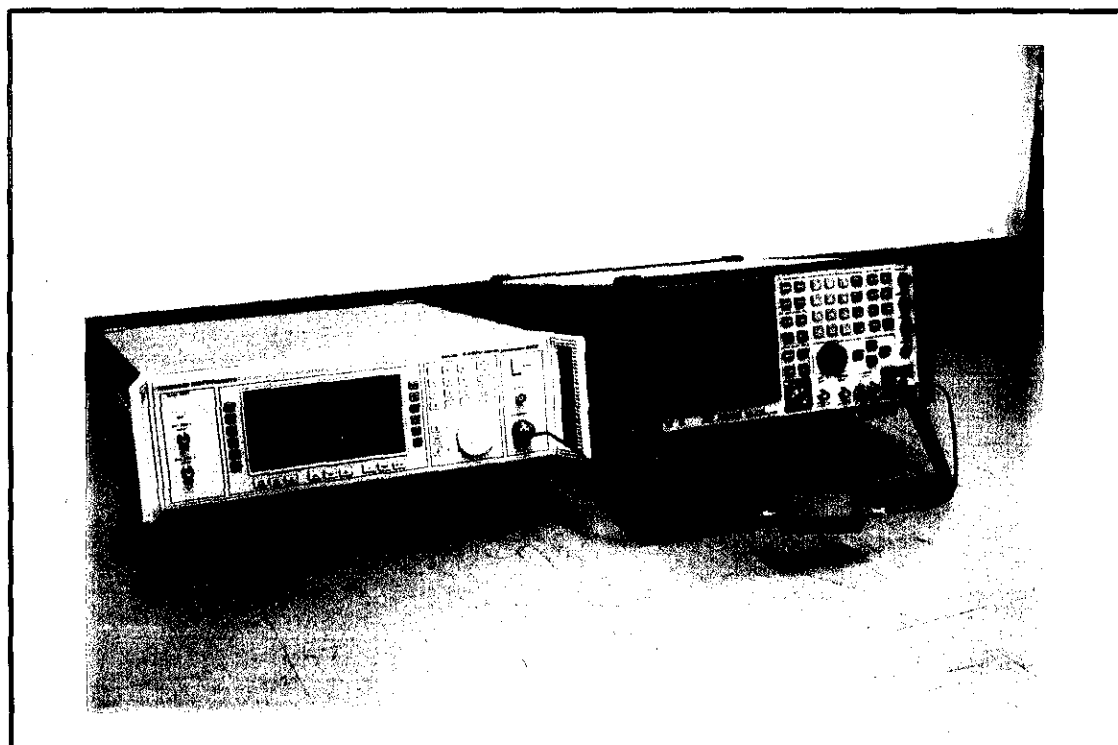
3. นำค่าที่บันทึกไว้ไปพล็อตกราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ เมื่อให้แกนแนวนอนแสดงความถี่ที่ทำการทดลอง และแกนแนวตั้งแสดงผลตอบสนองทางความถี่



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์และการต่ออุปกรณ์ในการทดลองหาผลตอบสนองทางความถี่
ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF



รูปที่ 3.3 รูปร่างของไมโครสตริปที่ออกแบบให้มีลักษณะเสมือนเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF



รูปที่ 3.4 แสดงการต่อเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF

3.3 ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง

3.3.1 การออกแบบตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง

โครงการนี้เลือกออกแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 15 dB ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางสามารถหาได้จากกราฟในรูปที่ 2.15 แต่เนื่องจากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสารไดอิเล็กตริก ที่เลือกใช้ในโครงการคือ สารอีพ็อกซี ซึ่งค่าโดยประมาณคือ 4.8 ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในกราฟ ดังนั้นจึงใช้วิธีการเทียบค่าโดยการอ่านค่าที่สภาพยอมทางไฟฟ้าคือ 4 และ 6 ก่อน แล้วเทียบหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า 4.8 จาก 2 ค่าข้างต้นซึ่งได้ผลดังนี้

$$\epsilon_r^4 \Rightarrow \log(s/h) = -0.43$$

$$\epsilon_r^6 \Rightarrow \log(s/h) = -0.32$$

จากค่าที่ได้ในข้างต้นนั้น สามารถหาค่าของ $\log(s/h)$ เมื่อ $\epsilon_r = 4.8$ ได้ดังนี้

$$\epsilon_r^{4.8} \Rightarrow \log(s/h) = -0.386$$

เพราะฉะนั้น $s/h = 0.411$

และเมื่อ $h = 1.44 \text{ mm} \Rightarrow s = 0.59184 \text{ mm}$

และจากกราฟในรูปที่ 2.15 ยังสามารถหาค่าความกว้างของแถบไมโครสตริปได้ ซึ่งใช้วิธีการเทียบเช่นเดิมดังต่อไปนี้

$$\epsilon_r^4 \Rightarrow w/w^{(50)} = 0.909$$

$$\epsilon_r^6 \Rightarrow w/w^{(50)} = 0.92$$

จากค่าดังกล่าว สามารถหาค่าของ $w/w^{(50)}$ เมื่อ $\epsilon_r = 4.8$ ได้ดังนี้

$$\epsilon_r^{4.8} \Rightarrow w/w^{(50)} = 0.9142$$

เนื่องจาก $w^{(50)}/h = 1.79$ และ $w^{(50)} = 2.577 \text{ mm}$

ดังนั้นจะได้ว่า $w = 2.3564 \text{ mm}$

จากสมการ (2.46), (2.47) และ (2.48) ตามทฤษฎีซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางได้ดังนี้

$$\epsilon_{\text{eff}}^{(e)} = 3.812$$

$$\epsilon_{\text{eff}}^{(o)} = 3.08$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = 3.436$$

และสามารถหาค่าความยาวคลื่นได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_o / \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \\ &= 0.2023\end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความยาวของแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อของคลื่นมีค่าดังนี้

$$\lambda/4 = 0.05058 \text{ m}$$

โดยมุมที่ตัดออกสามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$y = (1.04 + 1.3 \times \exp(-1.35w/h)) \times w \quad (3.7)$$

เมื่อ $w = 2.3564 \text{ mm}$ และ $h = 1.44 \text{ mm}$

จะได้ $y = 2.787 \text{ mm}$

$$m = 52 + 65 \times \exp(-1.35 \times w/h) \quad (3.8)$$

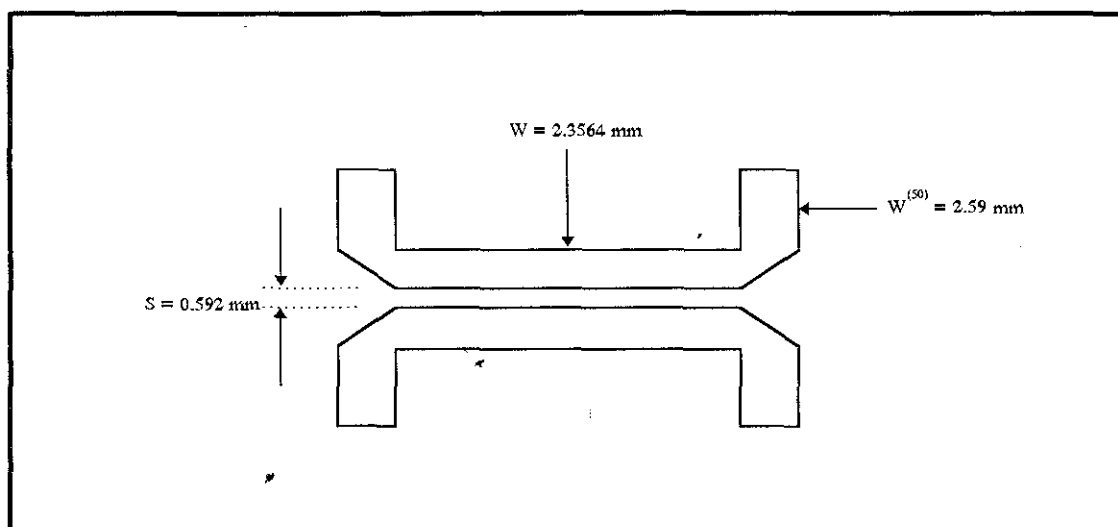
แทนค่าจะได้ $m = 59.13678$

เมื่อ $m = (x \times 100\%) / d \quad (3.9)$

และ $d = (2.3564^2 + 2.577^2) = 3.49206$

ดังนั้นจะได้ $x = 2.0451$

รูปร่างของตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางที่ได้ออกแบบไว้ จะแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงรูปร่างของตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางที่ใช้งานที่ความถี่ 800 Mhz และมีค่าสัมประสิทธิ์ของการเชื่อมต่อเท่ากับ 15 dB

เมื่อได้ขนาดของแถบไมโครสตริป ที่ต้องการนำไปใช้งานเสมือนเป็นตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางแล้ว ต่อไปคือการตัดแถบไมโครสตริป ซึ่งโครงงานเลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์สองหน้าที่มีสารไดอิเล็กตริกเป็นสารอีพ็อกซี ในการกัดลาย เพื่อให้ได้แผ่นวงจรไมโครสตริปที่มีลักษณะการใช้งานเป็นตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางตามที่ได้ออกแบบไว้ ต่อไปคือการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองกำลังงานการคัปปลิงของตัวคัปเปิลอร์นี้

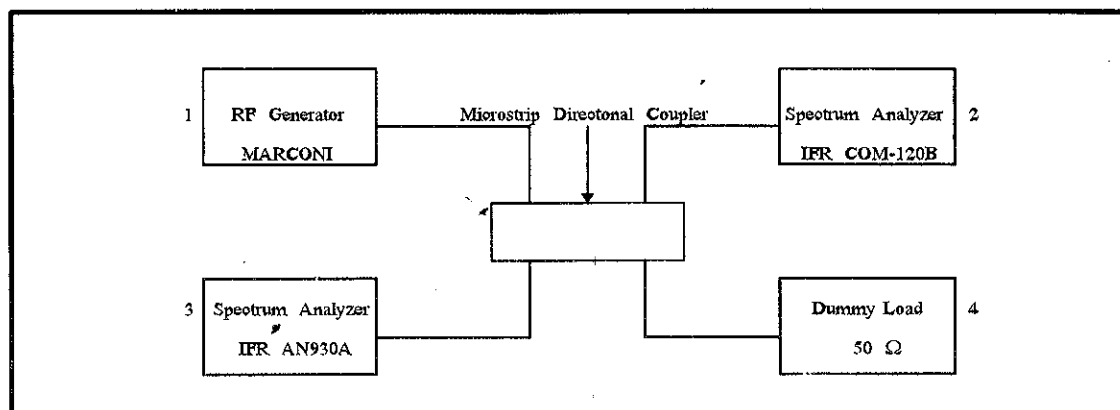
3.3.2 วิธีการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองกำลังงานการคัปปลิง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง คือ ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางที่ได้ออกแบบไว้ เครื่อง Spectrum Analyzer และเครื่อง RF Generator และทำการทดลองดังต่อไปนี้

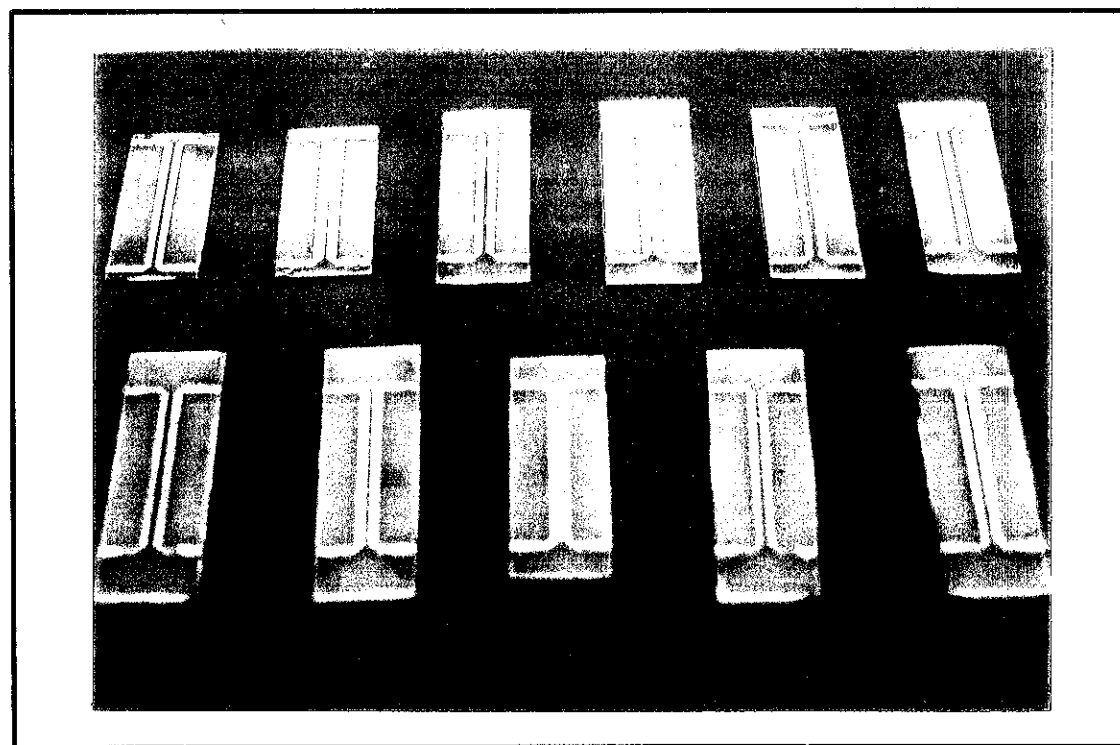
1. นำตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง มาทำความสะอาดโดยใช้ยางลบ ลบก่อนนำไปบัดกรีเข้ากับสายส่งสัญญาณ และสายส่งสัญญาณนี้จะใช้สายแบบกึ่งแข็งเพราะสามารถรองรับสัญญาณในย่านความถี่ขนาด UHF ได้ จากนั้นต่อตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางนี้เข้ากับเครื่อง RF Generator และเครื่อง Spectrum Analyzer ดังรูปที่ 3.6

2. ทำการทดลองหาผลตอบสนองกำลังงานการคัปปลิง ของตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง โดยให้ความถี่ทางเข้าเครื่อง RF Generator เท่ากับ 800 MHz และส่งด้วยกำลัง 0 dB ขณะที่

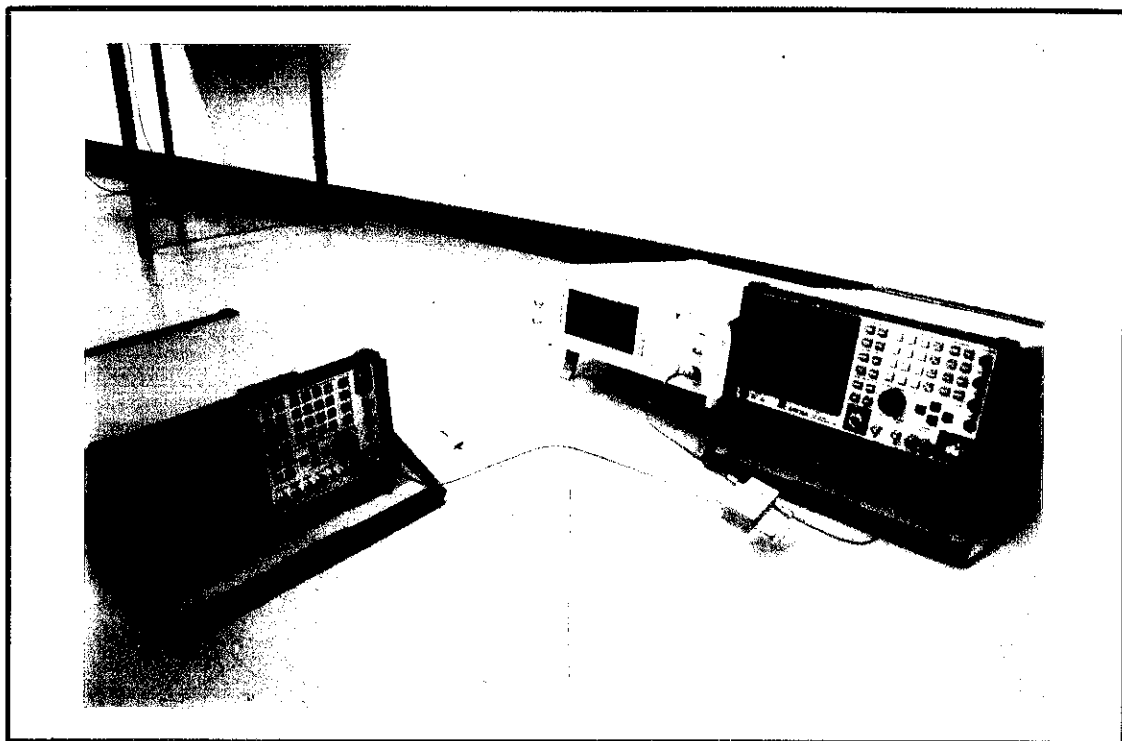
เครื่อง Spectrum Analyzer รับด้วยค่าการลดทอน 30 dB เพื่อให้อ่านกำลังด้านขาออกได้ แล้วบันทึกผลของผลตอบแทนกำลังงานการคับปลิงที่พอร์ต 2 และ 3 ส่วนที่พอร์ต 4 ใส่คัมมีโหลดขณะทำการทดลอง



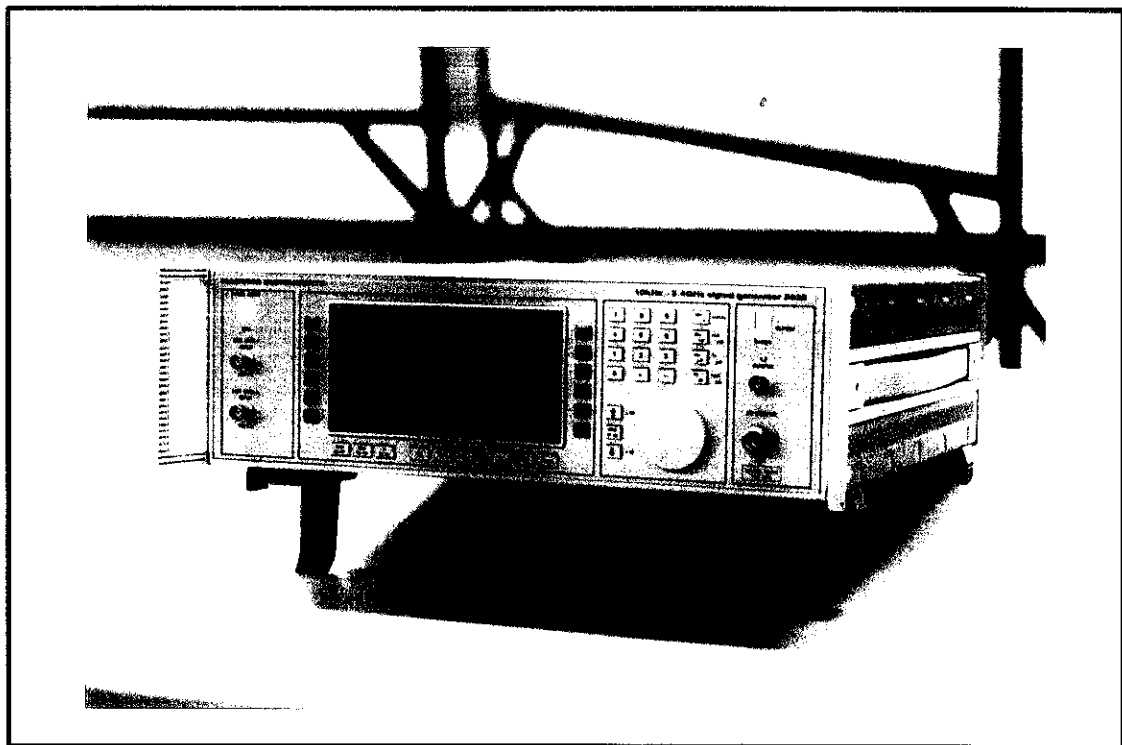
รูปที่ 3.6 แสดงอุปกรณ์และการต่ออุปกรณ์ในการทดลองหาผลตอบแทนกำลังงานการคับปลิงของตัวตัวคับเพลอร์แบบมีทิศทาง



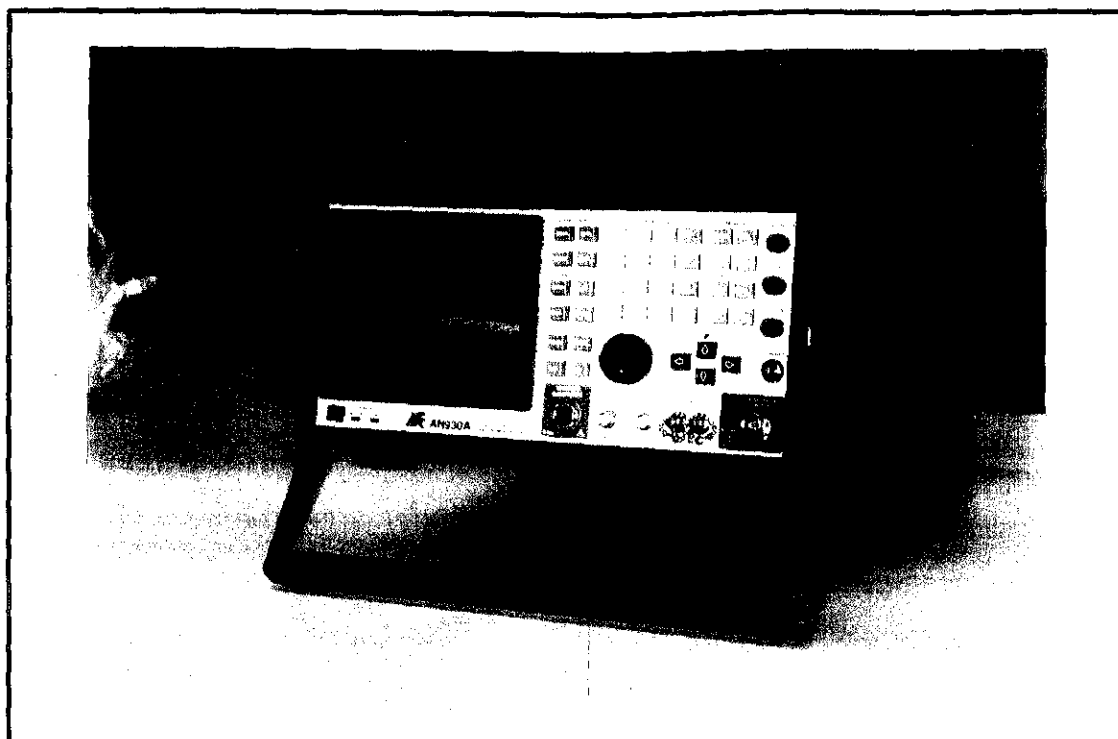
รูปที่ 3.7 รูปร่างของไมโครสตริปที่ออกแบบให้มีลักษณะเหมือนเป็นตัวคับเพลอร์แบบมีทิศทางขนาดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง



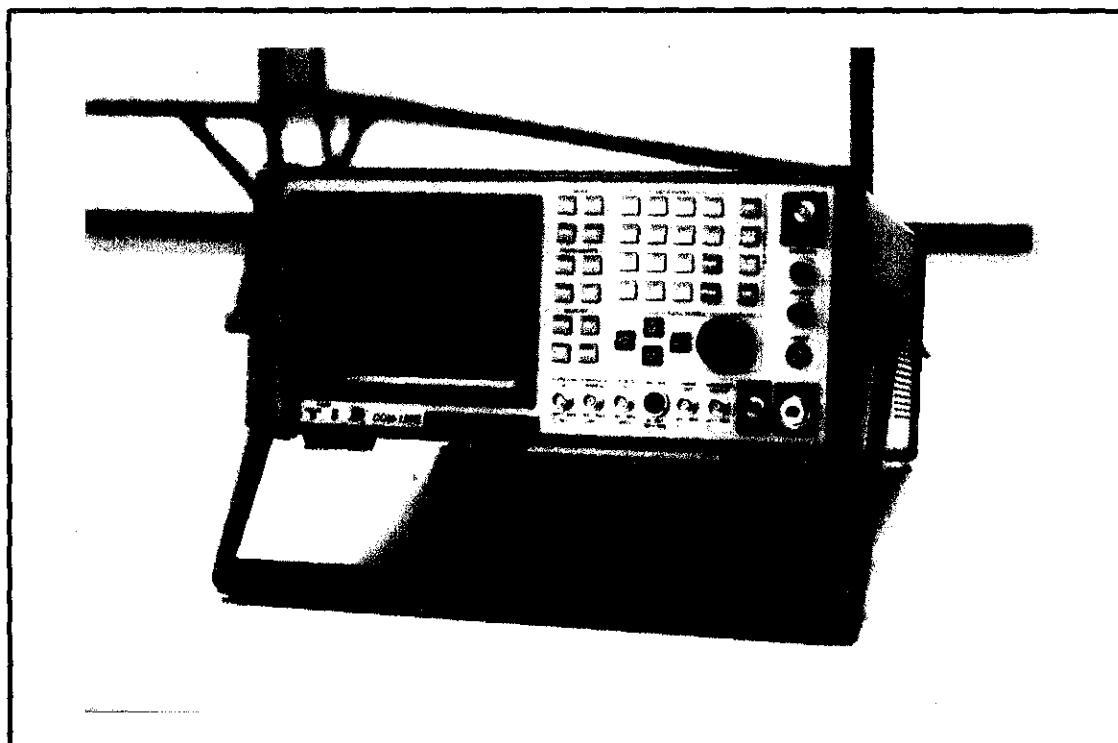
รูปที่ 3.8 แสดงการต่อเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาผลตอบสนองกำลังงานการคับปลิง
ของตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง



รูปที่ 3.9 เครื่อง RF Generator 10 kHz-5.4 GHz ของ MARCONI



รูปที่ 3.10 เครื่อง Spectrum Analyzer 9 kHz-22 GHz รุ่น AN930A ของ IFR



รูปที่ 3.11 เครื่อง Spectrum Analyzer รุ่น COM-120B ของ IFR

3.4 สรุป

การออกแบบไมโครสตริปเพื่อให้มีลักษณะการใช้งานที่เสมือนเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF นั้น อันดับแรกที่ต้องทราบคือค่าคาปาซิแตนซ์และค่าอินดักแตนซ์ที่ต้องการในวงจรของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ซึ่งมีความถี่ในการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB และจำนวนโพลเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการหาค่าดังกล่าว อันดับต่อไปคือการหาความกว้างและความยาวของแถบไมโครสตริป เพื่อให้มีค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นค่าคาปาซิแตนซ์และค่าอินดักแตนซ์ที่หาได้ในอันดับแรกของการออกแบบ นอกจากนี้ยังต้องทำการชดเชยค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ที่เพิ่มมา ซึ่งเกิดที่ปลายของแถบไมโครสตริปเมื่อตัดแถบไมโครสตริปตามทีออกแบบได้จากค่าคาปาซิแตนซ์และค่าอินดักแตนซ์ในอันดับแรกตามลำดับ จากนั้นจึงหาความยาวใหม่ของค่าคาปาซิแตนซ์และค่าอินดักแตนซ์ที่ผ่านการชดเชยแล้ว ส่วนอันดับสุดท้าย คือ บริเวณที่มีการเชื่อมต่อระหว่างแถบไมโครสตริปเพื่อการแมตช์ของวงจรกับแถบไมโครสตริปที่มีลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์เสมือนเป็นคาปาซิแตนซ์ตัวที่ 1 และ ตัวที่ 5 เพราะบริเวณนี้จะเกิดสนามฟริ่งกิ้งคาปาซิแตนซ์ขึ้น ในส่วนของการออกแบบไมโครสตริปเพื่อให้มีลักษณะการใช้งานเสมือนเป็นตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางนั้น อันดับแรก คือ ต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของการเชื่อมต่อที่ต้องการ แล้วนำไปหาความกว้างของแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อและหาความกว้างของระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อ ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปและความกว้างของแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อซึ่งแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์ของการเชื่อมต่อ กับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าต่างๆ ของสารไดอิเล็กตริก อันดับต่อไป คือการหาความยาวแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อ และอันดับสุดท้าย คือการตัดมุม ระหว่างแถบไมโครสตริปเพื่อการแมตช์ของวงจร และแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

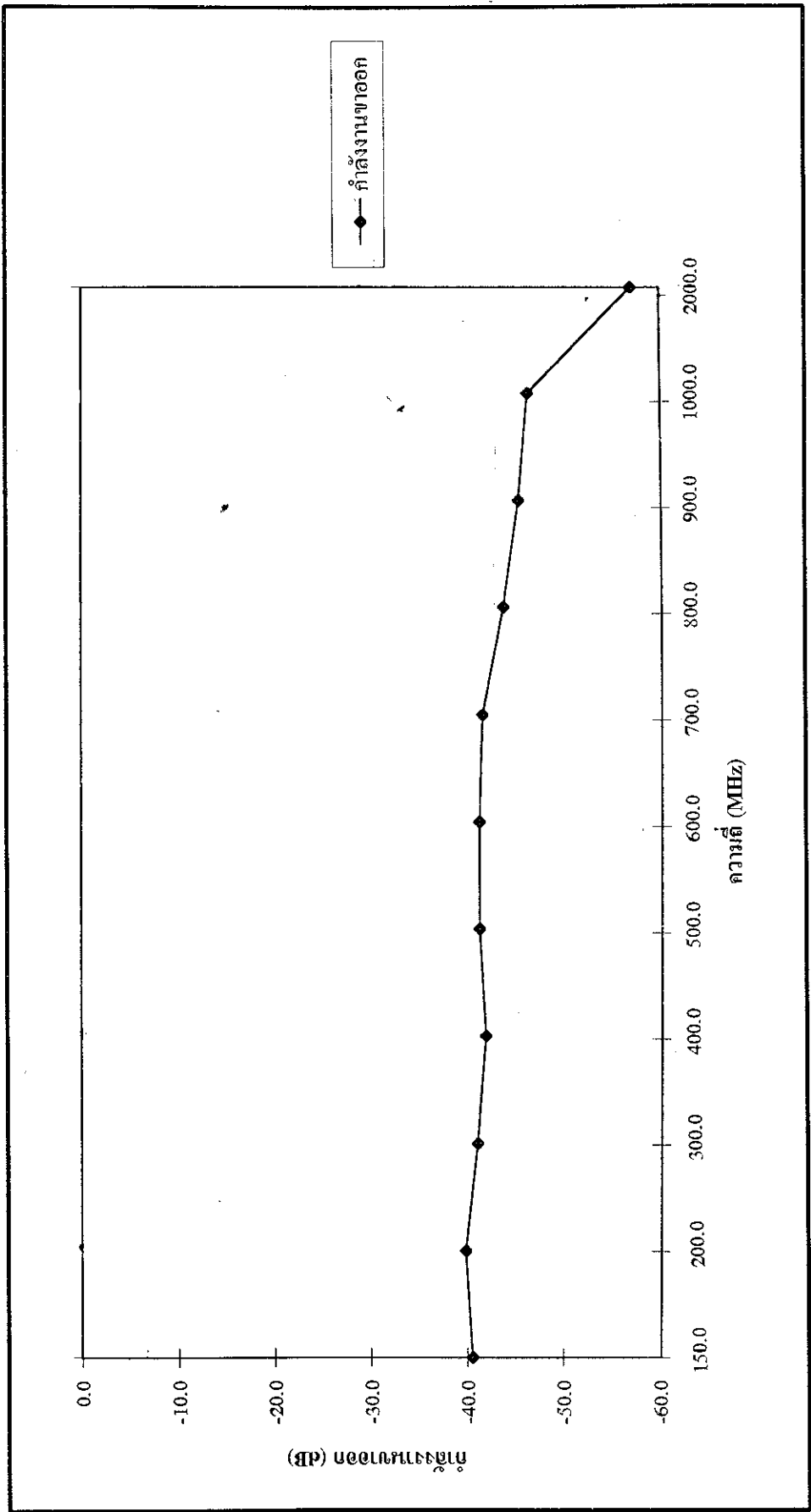
ผลการทดลองในโครงการนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามการออกแบบและวิธีการทดลอง ในบทที่ 3 คือ ผลการทดลองหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ ในย่าน UHF และผลการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองกำลังงานการคับปลิงของตัวคับเปลอร์แบบ มีทิศทาง

4.2 ผลการทดลองหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ ในย่าน UHF

เมื่อทำการทดลองตามวิธีการทดลองเพื่อดูผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำที่มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz ที่ได้ออกแบบไว้ โดยการเปลี่ยนค่าความถี่ตั้งแต่ 150 MHz ถึง 2000 MHz แล้วบันทึกผลการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลตอบสนองทางความถี่ เมื่อค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz

ความถี่ (MHz)	กำลังงานขาออก
150.0	-40.6
200.0	-39.9
300.0	-41.2
400.0	-42.1
500.0	-41.5
600.0	-41.5
700.0	-41.8
800.0	-44.0
900.0	-45.6
1000.0	-46.5
2000.0	-57.1

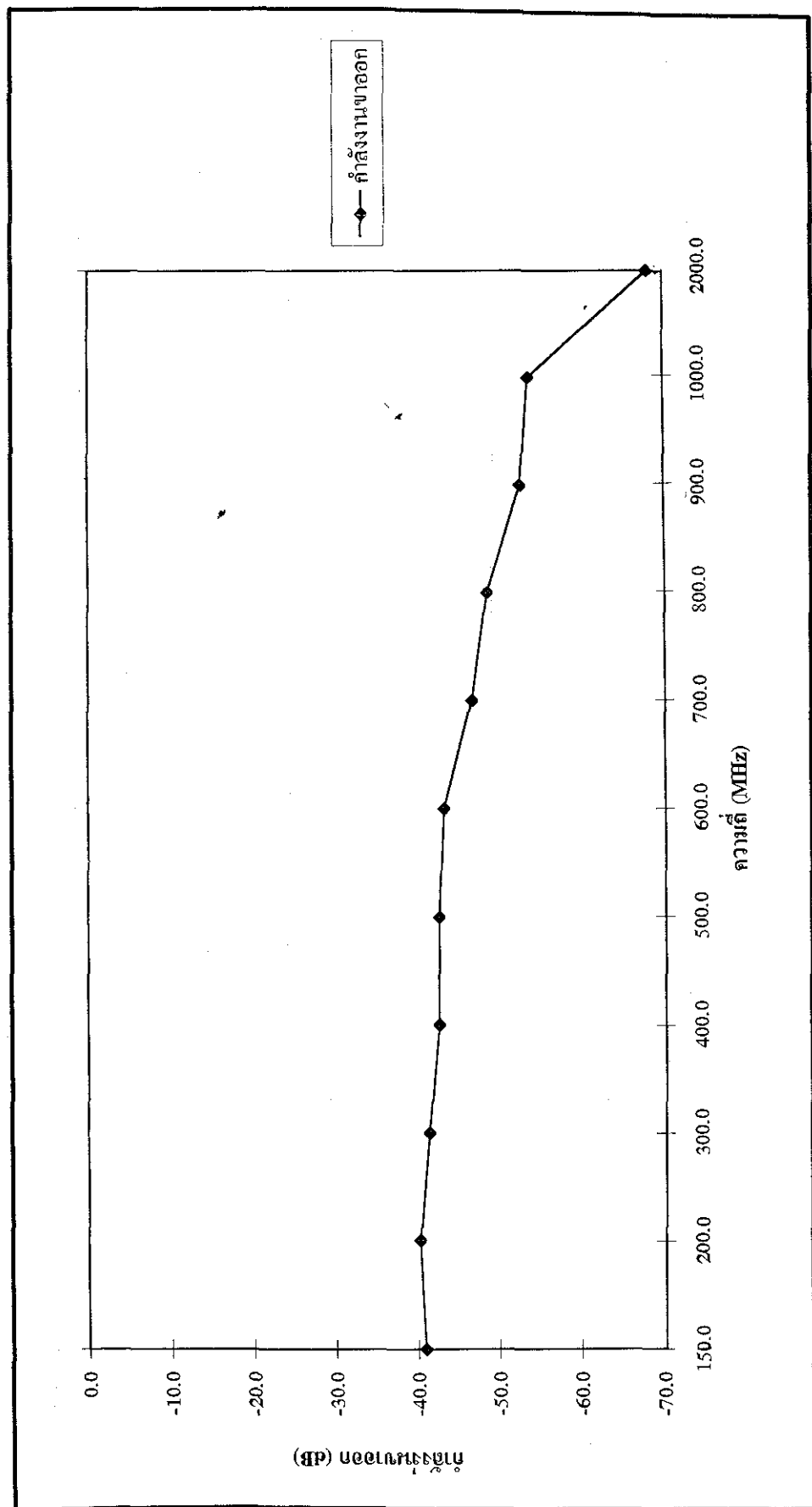


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่เมื่อออกแบบให้ค่าการลดพอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz

จากผลการทดลองเมื่อออกแบบให้ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz พบว่ากำลังงานขาออกยังคงลดลงเรื่อย ๆ จนถึงที่ความถี่ 1000 MHz กำลังงานขาออกจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งในการใช้งานตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำนี้ควรมีการลดทอนของสัญญาณลงอย่างรวดเร็ว เมื่อถึงความถี่ที่ออกแบบให้มีการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ไว้นั้นคือ ควรมีการลดทอนของสัญญาณลงอย่างรวดเร็วเมื่อถึงความถี่ 800 MHz ดังนั้นผลที่ได้จากการทดลองจึงคลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎีมาก จึงทดลองเพิ่มโดยทำการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 600 MHz แล้วทำการทดลองและบันทึกผลการทดลองด้วยวิธีเดิม เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณตัวนี้ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลตอบสนองทางความถี่ เมื่อค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 600 MHz

ความถี่ (MHz)	กำลังงานขาออก
150.0	-40.9
200.0	-40.3
300.0	-41.5
400.0	-42.8
500.0	-42.8
600.0	-43.4
700.0	-46.8
800.0	-48.7
900.0	-52.8
1000.0	-53.7
2000.0	-68.1



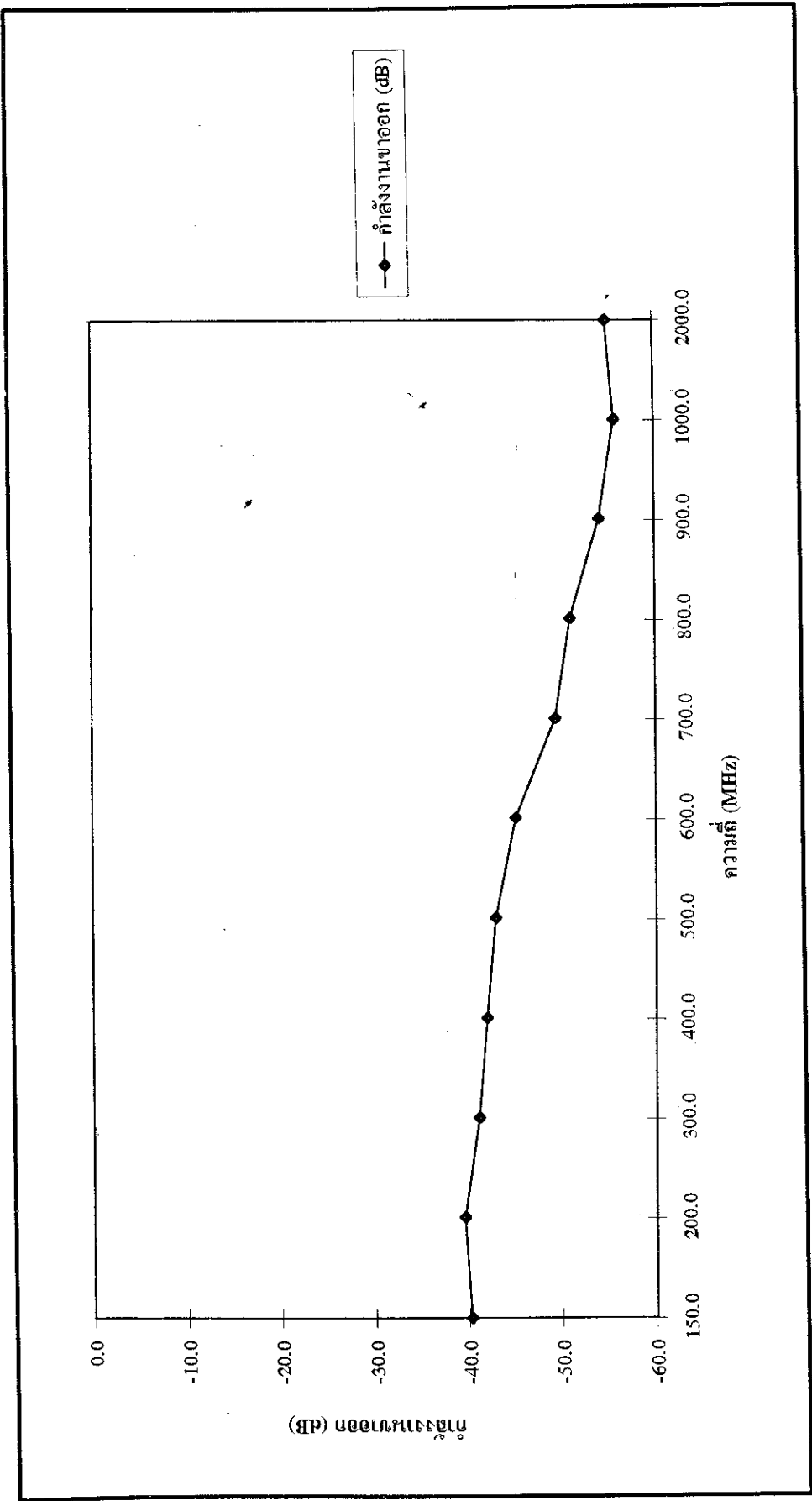
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่เมื่อออกแบบให้ค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 600 MHz

จากผลการทดลองเมื่อออกแบบให้ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 600 MHz พบว่ากำลังงานขาออกคงลดลงเรื่อย ๆ จนถึงความถี่ 700 MHz กำลังงานขาออกจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งในการใช้งานตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำนี้ควรมีการลดทอนของสัญญาณลงอย่างรวดเร็วเมื่อถึงความถี่ที่ออกแบบให้มีการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ไว้นั้นคือ ควรมีการลดทอนของสัญญาณลงอย่างรวดเร็วเมื่อถึงความถี่ 600 MHz ดังนั้นผลที่ได้จากการทดลองจึงยังคงคลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎีอยู่บ้าง จึงทำการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF เพิ่มโดยให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 500 MHz แล้วทำการทดลองและบันทึกผลการทดลองด้วยวิธีเดิม เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสัญญาณตัวนี้ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.3 ผลตอบสนองทางความถี่ เมื่อค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 500 MHz

ความถี่ (MHz)	กำลังงานขาออก (dB)
150.0	-40.3
200.0	-39.6
300.0	-41.2
400.0	-42.1
500.0	-43.1
600.0	-45.3
700.0	-49.6
800.0	-51.2
900.0	-54.3
1000.0	-55.9
2000.0	-55.0

จากผลการทดลองพบว่า ผลตอบสนองทางความถี่ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF เมื่อออกแบบให้ค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 500 MHz มีการลดทอนของสัญญาณอย่างรวดเร็วที่ความถี่ประมาณ 500 MHz ซึ่งใกล้เคียงกับทฤษฎี



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่เมื่อออกแบบให้ค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 500 MHz

4.3 ผลการทดลองหาผลตอบสนองกำลังงานการคับปลิงของตัวคับปลอร์แบบมีทิศทาง

เมื่อทำการทดลองหาผลตอบสนองกำลังงานการคับปลิงของตัวคับปลอร์แบบมีทิศทางตามวิธีการทดลองในบทที่ 3 โดยตั้งความถี่ไว้ที่ 800 MHz แล้วบันทึกผลการทดลองได้ดังนี้

เมื่อออกแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 15 dB, $\epsilon_r = 4.8$ และระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปที่เกิดการคับปลิง $S = 0.547$ mm

$$\text{กำลังงานขาออกของพอร์ตที่ 2} = -26.3 \text{ dB}$$

$$\text{กำลังงานขาออกของพอร์ตที่ 3} = -18.0 \text{ dB}$$

จากผลการทดลองพบว่ากำลังงานขาออกทั้ง 2 พอร์ตไม่เป็นไปตามทฤษฎีจึงออกแบบการทดลองเพิ่มโดยใช้หลักการคับปลิงของคลื่นที่เกี่ยวข้องกับระยะห่างระหว่างการคับปลิงซึ่งมีผลต่อการคับปลิงของคลื่นในตัวคับปลอร์แบบมีทิศทางดังนี้

เมื่อออกแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 15 dB, $\epsilon_r = 4.8$ และระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปที่เกิดการคับปลิง $S = 1.00$ mm

$$\text{กำลังงานขาออกของพอร์ตที่ 2} = -24.2 \text{ dB}$$

$$\text{กำลังงานขาออกของพอร์ตที่ 3} = -15.1 \text{ dB}$$

จากผลการทดลองพบว่ากำลังงานขาออกพอร์ตที่ 2 ยังไม่เป็นไปตามทฤษฎี จึงทดลองออกแบบตัวคับปลอร์แบบมีทิศทางอีกครั้งโดยเปลี่ยนค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ϵ_r จากเดิมเป็น 4.8 ให้เปลี่ยนเป็น $\epsilon_r = 4$ แทน เนื่องจากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่ใช้งานและสารไดอิเล็กตริกที่เป็นสารอีพ็อกซีซึ่งถูกเลือกใช้ในโครงงานนี้ และไม่ทราบค่าที่แน่นอนของสภาพยอมทางไฟฟ้าของอีพ็อกซีนี้ ณ ความถี่ที่เลือกใช้งาน 800 MHz จึงทดลองโดยการสุ่มค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่ใกล้เคียงมาใช้ในการทดลองดังนี้

เมื่อออกแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 15 dB, $\epsilon_r = 4.0$ และระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปที่เกิดการคับปลิง $S = 1.00$ mm

$$\text{กำลังงานขาออกของพอร์ตที่ 2} = -20.5 \text{ dB}$$

$$\text{กำลังงานขาออกของพอร์ตที่ 3} = -13.0 \text{ dB}$$

จากผลการทดลองพบว่ากำลังงานขาออกของพอร์ตทั้ง 2 ลดลงจากเดิมเมื่อ $\epsilon_r = 4.8$ ดังนั้นจึงทดลองเพิ่มโดยการเพิ่มค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าจากเดิมเป็น $\epsilon_r = 5.0$ จะได้ผลดังนี้

เมื่อออกแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 15 dB, $\epsilon_r = 5.0$ และระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปที่เกิดการคับปลิง $S = 1.0$ mm

$$\text{กำลังงานขาออกของพอร์ตที่ 2} = 27.5 \text{ dB}$$

$$\text{กำลังงานขาออกของพอร์ตที่ 3} = 14.6 \text{ dB}$$

จากผลการทดลองพบว่ากำลังงานขาออกขาออกของพอร์ตที่ 2 เพิ่มขึ้นจากเดิม แต่ในพอร์ตที่ 3 ไม่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับผลของการทดลองที่ $\epsilon_r = 4.8$

4.4 สรุป

เมื่อนำแผ่นไมโครสตริปที่ออกแบบให้มีลักษณะการใช้งานเสมือนเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF มาทำการทดลองตามวิธีการทดลองในบทที่ 3 ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้ จะเกิดความคลาดเคลื่อนไปไม่ตรงตามทฤษฎี เมื่อออกแบบให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz และที่ความถี่ 600 MHz และเมื่อออกแบบให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 500 MHz ผลการทดลองที่จะได้ใกล้เคียงกับทฤษฎี ส่วนการทดลองหาผลตอบสนองกำลังงานการคับปลิงของตัวคับเปลอร์แบบมีทิศทางนั้น ผลการทดลองเมื่อออกแบบตามหลักการออกแบบที่เสนอนั้น ไม่เป็นไปตามทฤษฎี และเมื่อทำการแก้ไขโดยใช้หลักการของการคับปลิง และหลักการพื้นฐานของไมโครสตริปแล้ว ผลการทดลองยังคงไม่เป็นไปตามทฤษฎีเช่นเดิม

บทที่ 5

สรุป และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

5.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงการออกแบบและวิธีการทดลองหาผลตอบสนองของไมโครสตริป ที่ออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้งาน 2 งาน คือ ให้เสมือนเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำ ในย่าน UHF ซึ่งออกแบบให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 500 MHz 600 MHz และ 800 MHz และให้เสมือนเป็นตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง ซึ่งได้ออกแบบให้มีค่าสัมประสิทธิ์ของการเชื่อมต่อของสัญญาณเท่ากับ 15 dB และใช้งานได้ที่ความถี่ 800 MHz ส่วนในบทที่ 5 นี้กล่าวถึงการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง โดยแบ่งการสรุปเป็น 2 หัวข้อตามที่ได้ทำการออกแบบและการทำการทดลอง จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ผลโดยรวมตั้งแต่การออกแบบ การสร้างอุปกรณ์และการทดลอง จากนั้นในขั้นสุดท้ายคือการสรุปประโยชน์ที่ได้จากการทำโครงการในครั้งนี้

5.2 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง

5.2.1 ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF

ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ที่ได้ทำการสร้างขึ้นจากไมโครสตริป ซึ่งการออกแบบนั้นใช้วิธีการของ Butterworth หรือ Maximally-flat ในขั้นแรกได้ทำการออกแบบให้ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz เริ่มทำการทดลองที่ความถี่ 150 MHz เนื่องจากที่ความถี่ต่ำกว่า 150 MHz คลื่นจะถูกเหนี่ยวนำเข้าไปที่เครื่องรับโดยไม่ผ่านตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำนี้เลย และจากผลการทดสอบที่ความถี่ 150 MHz จะเห็นได้ว่ากำลังงานขาออกค่อนข้างใกล้เคียงกับกำลังงานขาเข้า ซึ่งผลต่างของค่ากำลังงานทั้งสองนั้น ณ ที่ความถี่นี้คือค่า Insertion Loss ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.3 dB และเมื่อทำการทดลองที่ความถี่สูงขึ้น ค่ากำลังงานขาออกจะลดลงไปเรื่อย ๆ ซึ่งเห็นได้ว่าที่ความถี่ 800 MHz กำลังงานขาออกมีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ยังคงลดลงอย่างสม่ำเสมอจนถึงความถี่ 1000 MHz กำลังงานขาออกจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งการนำไปใช้งานจริงนั้นค่ากำลังขาออกที่ความถี่มากกว่า 800 MHz เป็นต้นไป ควรที่จะมีค่ากำลังงานขาออกลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงให้เห็นว่าตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ที่มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 800 MHz นี้ให้ผลตอบสนองทางความถี่ที่คลาดเคลื่อนออกไป

ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบเพิ่มเติมโดยการออกแบบตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 600 MHz เพื่อดูผลตอบสนองทางความถี่เปรียบเทียบกับตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำที่ได้ทดลองในช่วงต้น โดยใช้หลักการเดิมในการออกแบบ และใช้วิธีการเช่นเดิมในการทดลอง ผลจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่ากำลังงานขาออกที่ความถี่ประมาณ 700 MHz มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งในการนำไปใช้งานจริงนั้น ค่ากำลังงานขาออกที่ความถี่มากกว่า 600 MHz เป็นต้นไปควรที่จะมีกำลังงานขาออกลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงว่าตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำซึ่งมีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ณ ที่ความถี่ 600 MHz นี้ให้ผลตอบสนองทางความถี่ที่ยังคงคลาดเคลื่อนออกไป

ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบและสร้างตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF เพิ่มเติม โดยออกแบบให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ที่ความถี่ 500 MHz เพื่อดูผลตอบสนองทางความถี่เปรียบเทียบกับตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF 2 ตัวช่วงต้น โดยใช้หลักการเดิมในการออกแบบและใช้วิธีการเดิมในการทดลอง ผลจากการทดลองจะเห็นว่าค่ากำลังงานขาออกที่ความถี่ประมาณ 500 MHz มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB และค่ากำลังงานขาออกที่ความถี่มากกว่า 500 MHz เป็นต้นไปมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับทฤษฎี

5.2.2 ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง

ตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางที่ทำการสร้างจากไมโครสตริป ได้ออกแบบให้มีการใช้งานที่ความถี่ 800 MHz และมีค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อเท่ากับ 15 dB ผลที่ได้จากการทดลองคือค่ากำลังงานขาออกที่พอร์ต 3 มีค่าเท่ากับ 18 dB และ ค่ากำลังงานขาออกที่พอร์ต 2 มีค่าเท่ากับ 26.3 dB ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่เป็นไปตามทฤษฎี จึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่คาดว่าจะมีผลต่อการเชื่อมต่อของคลื่นภายในตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางดังนี้ จากการศึกษาทฤษฎีการออกแบบตัวคัปเปิลอร์ในหัวข้อ 2.4 ทำให้ทราบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเชื่อมต่อของคลื่นภายในตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง ได้แก่ ระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อของคลื่น (S) และ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผล (ϵ_{eff}) ดังนั้นเพื่อให้ได้กำลังงานขาออกที่พอร์ต 3 และ พอร์ต 2 มีค่าเท่ากับ 15 dB ตามที่ได้ออกแบบไว้ จึงทำการเลื่อนระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อของคลื่นให้ห่างออกไปเพื่อให้การเหนี่ยวนำของคลื่นลดลงจากการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างแถบไมโครสตริปที่เกิดการเชื่อมต่อของคลื่นที่ให้กำลังงานที่พอร์ต 3 มีค่าใกล้เคียง 15 dB มากที่สุดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร แต่จะเห็นได้ว่าค่ากำลังงานขาออกที่พอร์ต 2 มีค่าไม่เท่ากับ 15 dB

ดังนั้นจึงได้ทำการเปลี่ยนค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ เนื่องจากว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผลมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และไม่ทราบแน่ชัดที่ความถี่ 800 MHz นั้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผลมีค่าเท่าไร ดังนั้นจึงทดลองใช้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผลที่น้อยกว่า 4.8 คือ 4.0 และที่มากกว่า 4.8 คือ 5.0 ในการออกแบบแทน แต่ผลที่ได้จากการทดลองยังคงให้ค่ากำลังงานขาออกที่พอร์ต 3 และพอร์ต 2 มีค่าไม่เท่ากับ 15 dB อยู่เช่นเดิม

5.3 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของไมโครสตริปที่ออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้งานนั้นมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎี ซึ่งสามารถวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดความคลาดเคลื่อนได้ดังต่อไปนี้

5.3.1 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผล ซึ่งค่าดังกล่าวนี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการคำนวณค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ในโครงงานนี้ และค่านี้มีการเปลี่ยนแปลงค่าตามความถี่ที่ใช้งาน เนื่องจากตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF นั้น ต้องทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ โดยเริ่มตั้งแต่ที่ความถี่ 150 MHz ถึง 2000 MHz ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผลที่ใช้ในการคำนวณในโครงงานนี้ นอกจากนั้นสารไดอิเล็กตริกที่เลือกใช้ในโครงงานนี้ คือ สารอีพอกซีนั้น ไม่มีรายละเอียดของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าประสิทธิผลอ้างอิงเลย

5.3.2 จากการสังเกตผลการทดลองของตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF ที่ได้สร้างขึ้นนั้น พบว่าตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำที่ออกแบบให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ณ ความถี่ 500 MHz ให้ผลตอบสนองทางความถี่ดีกว่าตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำที่ออกแบบให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ณ ความถี่ 600 MHz และ 800 MHz นั้นอาจเป็นเพราะว่าสารไดอิเล็กตริก คือ อีพอกซีที่ใช้ในโครงงาน มีการกำหนดช่วงความถี่ที่ใช้งาน แต่เนื่องจากไม่ทราบถึงช่วงความถี่ที่ใช้งานของอีพอกซีนี้ จึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำที่ออกแบบให้มีค่าการลดทอนของสัญญาณเท่ากับ 3 dB ณ ความถี่ 600 MHz และ 800 MHz ให้ผลตอบสนองทางความถี่มีค่าคลาดเคลื่อนออกไป ส่วนในกรณีของตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางที่ออกแบบการใช้งานที่ความถี่ 800 MHz อาจเกิดจากสาเหตุในกรณีเดียวกัน

5.3.3 ในการสร้างอุปกรณ์จากไมโครสตริปนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้ความสนใจและความประณีตอย่างสูงในการทำลายบนแผ่นพิมพ์สองหน้า การพันสเปรย์เพื่อไม่ให้เกิดสนิม

และ การบัดกรีระหว่างสายส่งสัญญาณกับอุปกรณ์ไมโครสตริป ในแต่ละครั้งของการแก้ไข ซึ่งจะทำให้การบัดกรีซ้ำแล้วซ้ำอีก ทำให้หัวต่อที่ถูกบัดกรีบ่อยครั้งเกิดการชำรุดหรือเสื่อมสภาพได้ และถ้าไม่มีความระมัดระวังในการบัดกรี ความร้อนจากหัวแร้งอาจทำให้สารไดอิเล็กตริกเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นในการทำแต่ละครั้งควรตรวจสอบสภาพความเรียบร้อยของอุปกรณ์ต่าง ๆ และควรมีความระมัดระวังอย่างสูง

5.3.4 สาเหตุอีกประการหนึ่งซึ่งสำคัญมากนั่นคือ เนื่องจากห้องปฏิบัติการยังขาดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าพารามิเตอร์ภายในของอุปกรณ์ในโครงการนี้ ดังนั้นจึงไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าค่าพารามิเตอร์ภายในที่แท้จริงของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนั้นมีค่าตรงตามทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบหรือไม่ ซึ่งถ้าค่าพารามิเตอร์ภายในมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎีที่ได้ออกแบบไว้ จะไม่สามารถทราบและทำการแก้ไขได้เลย ค่าพารามิเตอร์ภายในที่คลาดเคลื่อนไปนี้ มีผลกระทบอย่างมากต่อผลตอบแทนของอุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้น เพราะว่า อุปกรณ์ที่ออกแบบไว้นี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานที่ความถี่สูง

5.4 ประโยชน์ที่ได้จากโครงการ

ในปัจจุบัน ไมโครสตริปถูกนำเข้ามาใช้กับระบบการสื่อสารมาก ซึ่งส่วนใหญ่เกี่ยวกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ทางกาสื่อสาร เช่น สายอากาศ สายนำสัญญาณ และอุปกรณ์อื่น ๆ ดังนั้นประโยชน์ที่ได้รับโดยตรงจากโครงการนี้ คือ ความรู้ในเรื่องของไมโครสตริป และความรู้ในเรื่องของการออกแบบไมโครสตริปเพื่อประยุกต์ใช้งานให้สามารถใช้ได้เสมือนเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF และตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง จากการศึกษาเรื่องไมโครสตริป ทำให้ทราบว่าพารามิเตอร์สำคัญของไมโครสตริป ได้แก่ ค่าอัตราส่วนระหว่างความกว้างของแถบไมโครสตริปกับความหนาของสารไดอิเล็กตริก และความยาวของแถบไมโครสตริป เพราะว่าค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของไมโครสตริปนั้น ถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์ดังกล่าว และจากการศึกษาการออกแบบไมโครสตริปเพื่อประยุกต์ให้สามารถใช้งานได้เสมือนเป็นตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF และตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางนั้น นอกจากหลักการพื้นฐานของไมโครสตริปเกี่ยวกับพารามิเตอร์ดังกล่าวที่เป็นตัวสำคัญในการออกแบบแล้ว เรื่องของการชดเชยก็เป็นสิ่งสำคัญอีกส่วนหนึ่ง เพราะรูปร่างของไมโครสตริปที่ออกแบบมาเพื่อประยุกต์ใช้งานนั้นแตกต่างไปจากลักษณะของไมโครสตริปที่เป็นสายส่งสัญญาณธรรมดา ดังนั้นการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เมื่อเดินทางผ่านแถบไมโครสตริป เช่น ตัวกรองสัญญาณผ่านแถบความถี่ต่ำในย่าน UHF นั้นจะมีรูปร่างเป็นสเตป และตัวคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางนั้นจะมีช่วงที่เกิดการหักงออย่างกระทันหัน ดังนั้นการชดเชยจึงจำเป็นต้องคำนึงถึง

ในการออกแบบ เพื่อให้การเดินทางของคลื่นแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปนั้น มีผลต่อค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์โดยรวมของไมโครสตริปที่ออกแบบมาเพื่อประยุกต์ใช้งานน้อยที่สุด

นอกจากความรู้ที่ได้จากการศึกษาแล้ว ในการทดลองยังให้ประสบการณ์ ความเข้าใจ และความคิดในการแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าอีกด้วย เนื่องจากการกัดแผ่นวงจรพิมพ์สองหน้าให้ได้ขนาดของแถบไมโครสตริปตามที่ออกแบบไว้ทั้ง 2 อุปกรณ์นั้น ต้องทำด้วยมือทั้งหมดทำให้ได้ความชำนาญในเรื่องของการกัดลายแผ่นวงจรพิมพ์สองหน้า และเมื่อผลการทดลองที่ได้ไม่ตรงกับทฤษฎี ทำให้ต้องคิดหาทางแก้ไขเพื่อให้ผลออกมาดีกว่าเดิม ซึ่งต้องอาศัยความรู้ที่ได้จากการศึกษา การประมวลผลและประมวลสาเหตุ มาใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งเป็นการฝึกให้คิดอย่างมีเหตุมีผล และสุดท้ายได้มีโอกาสใช้เครื่องมือที่สำคัญอย่างเครื่อง RF Generator และเครื่อง Spectrum Analyser จึงได้ความรู้ในเรื่องของการใช้เครื่องมือเหล่านี้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะอนุกรรมการปรับปรุงศัพท์เทคนิคทางวิศวกรรมไฟฟ้าในคณะกรรมการวิชาการสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. ศัพท์เทคนิควิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร, กรุงเทพมหานคร : คณะอนุกรรมการปรับปรุงศัพท์เทคนิคทางวิศวกรรมไฟฟ้า
- [2] บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, วิศวกรรมไมโครเวฟ. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2536
- [3] Fook, B.H., and Zakarevicius, R.A. Microwave Engineering Using Microstrip Circuit , New York : Prentice Hall, 1990
- [4] Jansen, R.H., “High-speed computation of single and couples microstrip parameters including dispersion, high-order modes, loss and finite strip thickness” , IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-26 No. 2, February 1978, pp. 75-82.
- [5] Kirschning, M. and Jansen, R.H., “Accurate wide-range design equation for the frequency-dependent characteristic of parallel coupled microstrip lines” . IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-32, No. 1, January 1984, pp.83-90. Corrections: IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol.MTT-33, No. 3, March 1985, p. 288.
- [6] The American Radio Relay League. The ARRL UHF/Microwave Experimenter's Manual Antennas, Components and Design. America : Newington, 1990
- [7] Young, H. Paul, “Microstrip Design Laboratory” , IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-34, No. 1, February 1991

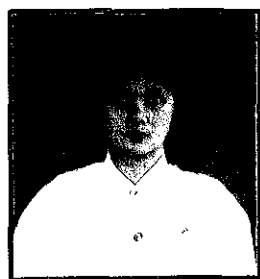
ประวัติผู้เขียน



ชื่อ นางสาวมนต์ทิพย์ภา อินทราวุธ
 เกิดวันที่ 29 เมษายน 2518
 ภูมิลำเนา จังหวัดอุดรธานี
 การศึกษา ระดับประถม โรงเรียนเซ็นเมรี่ จังหวัดอุดรธานี
 ระดับมัธยมต้น โรงเรียนสตรีราชินูทิศ จังหวัดอุดรธานี
 ระดับมัธยมปลาย โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล จังหวัดอุดรธานี
 ปัจจุบันกำลังศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ปีที่ 4
 สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่อยู่ปัจจุบัน

74 ถ. บ้านโนน อ. เมือง จ. อุดรธานี 41000



ชื่อ นางสาวเนตรนภา สุขวัจณี
 เกิดวันที่ 28 มีนาคม 2518
 ภูมิลำเนา จังหวัดชัยภูมิ
 การศึกษา ระดับประถม โรงเรียนอนุบาลชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ
 ระดับมัธยมต้น โรงเรียนสตรีชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ
 ระดับมัธยมปลาย โรงเรียนสตรีชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ
 ปัจจุบันกำลังศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ปีที่ 4
 สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่อยู่ปัจจุบัน

134/1-4 บ้านหนองหลอด ถ. ชัยภูมิ-บ้านเขว้า ต.โนนเมือง
 อ. เมือง จ. ชัยภูมิ 36000

