

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตัวกรองผ่านแถบความถี่ชนิดไมโครสตริปสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

MICROSTRIP BANDPASS FILTER FOR 2.4 GHz AND 5.2 GHz BANDS



T110553



ฉพ.
๒๖๓๖๙๓
๒๕๕๓

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **110553**
วัน,เดือน,ปี. - 4 พ.ย. 2553

b. 12259111
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2010-EN-M-010-091

MICROSTRIP BANDPASS FILTER FOR 2.4 GHz AND 5.2 GHz BANDS



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KMITL-2010-EN-M-010-091
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ตัวกรองแถบความถี่ชนิดไมโครสตริปสำหรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz
 Thesis Title Microstrip Bandpass Filter for 2.4 GHz and 5.2 GHz Bands
 นักศึกษา นายณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน
 รหัสประจำตัว 51060910
 ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
 หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-010-091

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์	
ผศ.ดร. ทองทศ วาณิชศรี	
รศ.เกรียงไกร วงศ์โรจนภรณ์	
รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร	
ผศ.ดร. ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2553 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งคณ.วิทยานิพนธ์รับสมบูรณ์
วันที่ 4 เดือน 5 พ.ศ. 53
ลงชื่อ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวกรองแถบความถี่ชนิดไมโครสตริปสำหรับย่านความถี่
	2.4 GHz และ 5.2 GHz
นักศึกษา	นายณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน
รหัสประจำตัว	51060910
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปขนาดเล็ก โดยอาศัยการดัดแปลงเรโซเนเตอร์รูปตัวเอช เพื่อให้ได้การปฏิบัติการแถบความถี่คู่ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ โดยเพิ่มไมโครสตริปรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าลงในเรโซเนเตอร์รูปตัวเอช จากผลการทดสอบและการจำลอง ค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 เดซิเบล ตลอดย่านความถี่และค่าการสูญเสียใส่แทรกมีค่าน้อยกว่า 2 เดซิเบล ที่ความถี่กลางของทั้งสองความถี่ ตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปนี้ให้ผลตอบสนองทางความถี่เป็นที่พอใจด้วยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ขนาดเล็กและสามารถเลือกความถี่เรโซแนนซ์ที่สองได้ โดยการปรับขนาดความยาวของไมโครสตริปรูปทรงสี่เหลี่ยม ดังนั้นตัวกรองผ่านแถบคู่ชนิดไมโครสตริปนี้จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานและเหมาะสมสำหรับเป็นเรโซเนเตอร์ต้นแบบในการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านการกรองความถี่ผ่านต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Microstrip Bandpass Filter for 2.4 GHz and 5.2 GHz Bands
Student	Mr. Nattaset Mhudtongon
Student ID.	51060910
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

The design of compact size dual-band microstrip filter is presented. The H-shape resonator is used to reduce the dimension of the filter. Moreover, the modified H-shape resonator with the rectangular strip is performed to realize the dual band operation at 2.4 and 5.2 GHz. From the simulation, the return loss is lower than -10 dB along the pass band and the insertion loss is lower than 2 dB at both center frequencies. The satisfied overall performance is the simple and compact structure, and can select the dual resonant frequencies by adjusting the length of the rectangular strip. The proposed filter is suitable to use in WLAN systems

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ เป็นผู้ให้โอกาสทั้งในด้านการศึกษา เกี่ยวเนื่องอบรมสั่งสอน ขอขอบคุณ รศ. ดร. สมผล โกศลวิทย์ ผู้ซึ่งให้คำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางในการศึกษาออกแบบงานวิจัย ขอขอบคุณ คุณ กิตติศักดิ์ แพบัว ผู้ซึ่งให้แนวทางตลอดจนแนวคิดในการวิจัย คำแนะนำต่างๆ ในการวิเคราะห์ และทดสอบ รวมถึงการสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ขอขอบคุณ คุณสุภกิต แก้วดวงตา คุณกิตติมา เลิศศักดิ์วิมาน ผู้ซึ่งช่วยค้นคว้าข้อมูลการวิจัย การสร้างและทดสอบตัวกรองผ่านแถบความถี่ รวมถึงกำลังใจที่ตีมาโดยตลอด ขอขอบคุณ คุณไพโรจน์ วนธุม คุณสัณชัย เอียดปราบ คุณรัฐพงษ์ สุวลักษณ์ คุณ สุพัตนา วงสัก คุณรัชชัย พุ่มพวง ผู้ซึ่งช่วยให้คำแนะนำและเทคนิคต่างที่ดี ในการสร้างและทดสอบตัวกรองผ่านแถบความถี่ รวมถึงพี่ๆ เพื่อนๆ และสมาชิกในห้องปฏิบัติการการสื่อสารไร้สายทุกท่าน ที่ไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมด ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และ ผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจในทุกสิ่ง คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอบแต่ บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักยิ่งของ ข้าพเจ้า ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้แก่ข้าพเจ้า

ณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูปภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	6
1.3 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 โครงสร้างสายนำสัญญาณบน ไมโครสตริป.....	8
2.2.1 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสายนำสัญญาณ แบบไมโครสตริป.....	9
2.2.2 ค่าความยาวคลื่นบนสตริป ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นและ ค่าความเร็วเฟส.....	11
2.2.3 การสังเคราะห์หาค่าความกว้างต่อความหนา w/h	12
2.2.4 ผลกระทบจากความหนาของสตริป.....	12
2.2.5 การสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่น.....	15
2.2.5.1 การลดทอนหรือการสูญเสียบนโครงสร้างไมโครสตริป.....	15
2.2.5.1.1 ค่าการสูญเสียของแผ่นตัวนำ.....	15
2.2.5.1.2 ค่าการสูญเสียในไดอิเล็กตริก.....	17
2.2.5.1.3 ค่าการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น.....	17
2.3 โหมดในการเชื่อมต่อสายนำสัญญาณบน โครงสร้างไมโครสตริป.....	18
2.3.1 ค่าความจุไฟฟ้าของโหมดคู่และโหมดคี่.....	19
2.3.2 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก.....	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สำหรับ โหมดคู่และ โหมดคี่..... 21
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 พารามิเตอร์เอส.....	23
2.5 คุณลักษณะของวงจรองความถี่วิทยุ.....	27
2.5.1 การออกแบบวงจรองโดยใช้หนึ่งคู่ของการส่งผ่านที่เป็นศูนย์.....	27
2.6 ตัวเชื่อมต่อในงาน ไมโครเวฟ.....	30
2.7 บทสรุป.....	31
บทที่ 3 รูปแบบเรโซเนเตอร์ชนิดไมโครสตริปรีปตัวเอช.....	32
3.1 บทนำ.....	32
3.2 รูปแบบของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรีปตัวเอช.....	32
3.2.1 โครงสร้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยว.....	33
3.2.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว.....	34
3.3 การจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรีปตัวเอช.....	35
3.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรีปตัวเอช.....	36
3.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรีปตัวเอช.....	37
3.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_G ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรีปตัวเอช.....	38
3.3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_S ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรีปตัวเอช.....	39
3.4 รูปแบบของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรีปตัวเอช.....	41
3.4.1 โครงสร้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่.....	41
3.4.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่.....	43
3.5 การจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรีปตัวเอช.....	43
3.5.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{E2} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรีปตัวเอช.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{E2} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า ของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช	45
3.6 บทสรุป.....	48
บทที่ 4 การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริป	49
4.1 บทนำ	49
4.2 การจำลองผลของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริป	50
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (L_1).....	51
4.2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (W_1).....	53
4.2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (L_2).....	54
4.2.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (W_2).....	56
4.2.5 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อน กับเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (<i>gap</i>).....	58
4.3 การจำลองของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....	61
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (L_1).....	62
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (W_1).....	64
4.4 การศึกษาลักษณะการเชื่อมต่อของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่.....	66
4.4.1 ขั้นตอนการหาค่าตัวประกอบคุณภาพและค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ	66
4.4.2 ขั้นตอนการหาค่าตัวประกอบคุณภาพและค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio	68
4.5 บทสรุป	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดสอบและผลการทดสอบ	73
5.1 บทนำ	73
5.2 การสร้างและทดสอบคุณสมบัติตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่.....	73
5.3 ผลการทดสอบของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่	75
5.3.1 การทดสอบ $ S_{21} $ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ.....	75
5.3.2 การทดสอบ $ S_{11} $ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ.....	76
5.4 บทสรุป	78
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	79
6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม.....	79
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	81
เอกสารอ้างอิง.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ค่าตัวประกอบรูปแบบของการไม่ต่อเนื่องบนไมโครสตริป.....	18
3.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว	35
3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองเพื่อศึกษาแนวโน้มความสอดคล้อง ในการตอบสนองทางความถี่ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่าน แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปคู่ตัวเอช	41
3.3 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่.....	44
3.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ ชนิดไมโครสตริปคู่ตัวเอช	47
4.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยว	51
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (L_1) กับแบนด์วิดธ์ของค่า $ S_{21} $	52
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_1) กับแบนด์วิดธ์ของค่า $ S_{21} $	53
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (L_2) กับแบนด์วิดธ์ของค่า $ S_{21} $	55
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_2) กับแบนด์วิดธ์ของค่า $ S_{21} $	57
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนของ เรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวกับแบนด์วิดธ์ของค่า $ S_{21} $	59
4.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว.....	60
4.8 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่.....	62
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ (L_3) กับแบนด์วิดธ์ของค่า $ S_{21} $	63
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ (W_3) กับแบนด์วิดธ์ของค่า $ S_{21} $	64
4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่	66
4.12 ค่าองค์ประกอบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิดแบบที่ได้จากการคำนวณ.....	67
4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อของแต่ละเรโซเนเตอร์จากการคำนวณ	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่..... 75
 ไม่วารณี่ใดๆทั้งสิน อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกคร้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
5.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ กับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio.....	78
6.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ.....	80
6.2 ผลการทดสอบวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ.....	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติ	2
1.2 การนำสายนำสัญญาณมาสร้างเป็นวงจรกรองความถี่	3
1.3 วงจรกรองความถี่แบบท่อโพรง	3
1.4 เรโซเนเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์แบบขั้น	4
1.5 เรโซเนเตอร์บ่วงเปิด	5
1.6 เรโซเนเตอร์หลายตัวที่สร้างขึ้นโดยใช้หลักการของเรโซเนเตอร์แบบขั้น	6
2.1 ลักษณะโครงสร้างของไมโครสตริป	9
2.2 รูปแบบการกระจายสนามของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	9
2.3 ไมโครสตริปที่ใช้ในการประมาณค่าการสูญเสียในตัวนำของวิลเลอร์	16
2.4 ลักษณะการเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณบนโครงสร้างไมโครสตริป	18
2.5 โหมดในการเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณบนโครงสร้างไมโครสตริป	19
2.6 วงจรสองพอร์ต	25
2.7 วงจรกรองผ่านคั่นแบบผ่านต่ำสำหรับการตั้งแคว่ห้วงจรกรอง	29
2.8 โครงสร้างการเชื่อมต่อต่างๆไปของวงจรกรองผ่านแถบ โดยใช้คู่ของการส่งผ่านที่เป็นศูนย์	29
3.1 โครงสร้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช	33
3.2 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยว ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช	34
3.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช	35
3.4 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ C_{E1} ของ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช	36
3.5 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ L_{E1} ของ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช	37
3.6 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ C_G ของ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช	38
3.7 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ C_S ของ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 โครงสร้างเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช.....	42
3.9 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ ชนิดไมโครสตริปตัวเอช	42
3.10 วงจรสมมูลของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่.....	43
3.11 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ C_{E2} ของ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช.....	45
3.12 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ L_{E2} ของ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช.....	46
3.13 ผลการจำลองเปรียบเทียบตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ ที่ได้จาวงจรสมมูลทาง ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่และตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ ชนิดไมโครสตริปตัวเอช	47
4.1 โครงสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยว.....	50
4.2 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของ เรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (L_1)	51
4.3 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{11} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของ เรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (L_1)	52
4.4 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของ เรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (W_1)	53
4.5 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{11} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของ เรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (W_1)	54
4.6 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของ เรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (L_2)	55
4.7 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{11} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของ เรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (L_2)	56
4.8 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของ เรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (W_2)	57
4.9 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{11} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของ เรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (W_2)	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่าง สายนำสัญญาณป้อนกับตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวนิคม ไครสตริปรูปตัวเอช (gap)	59
4.11 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{11} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่าง สายนำสัญญาณป้อนกับตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวนิคม ไครสตริปรูปตัวเอช (gap)	60
4.12 โครงสร้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช	61
4.13 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของ ตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช. (L_3)	62
4.14 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{11} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของ ตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช. (L_3)	63
4.15 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของ ตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช. (W_3)	64
4.16 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{11} $ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของ ตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช. (W_3)	65
4.17 วงจรสมมูลของวงจรกรองผ่านแถบ โดยวิธีการเชื่อมต่อแบบ 2 โพล	68
4.18 โครงสร้างการเชื่อมต่อ	68
4.19 การเชื่อมต่อของสายป้อนสัญญาณ (ก) แบบคัปเปิลไลน์ (ข) แบบแท็ปไลน์	69
4.20 รูปแบบการจัดวางของเรโซเนเตอร์	70
4.21 ผลตอบสนองทางด้านความถี่จากการจำลองหาค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ	71
4.22 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองผ่านที่มีลักษณะการเชื่อมต่อแบบลำดับ	71
5.1 ลักษณะ โครงสร้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่	74
5.2 การเปรียบเทียบผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{21} $ ที่ได้จากการจำลอง และทดสอบของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ	76
5.3 การเปรียบเทียบผลตอบสนองความถี่ของค่า $ S_{11} $ ที่ได้จากการจำลอง และทดสอบของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

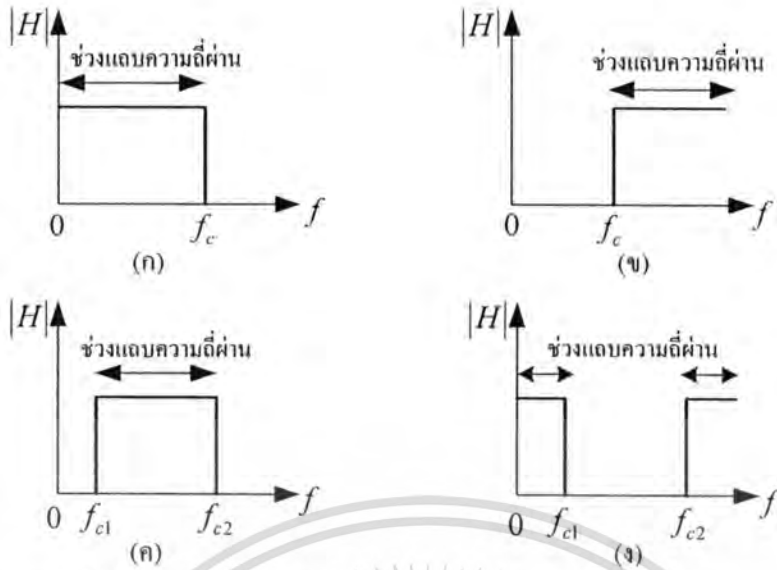
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากประโยชน์ของการสื่อสารไร้สายมีอยู่มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสื่อสารไร้สาย สร้างความสะดวกและอิสระในการใช้งานและติดตั้งเครือข่าย เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายทำให้การเชื่อมต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ในบ้านหรือสำนักงานเข้าด้วยกันหรือต่อเข้ากับเครือข่าย ไม่จำเป็นต้องใช้สายนำสัญญาณให้ยุ่งยากและดูแลรักษาอีกต่อไป อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ทั้งแบบตั้งโต๊ะและพกพาสามารถเชื่อมต่อถึงกันหรือเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายจากตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ในรัศมีของการรับสัญญาณได้อย่างอิสระ เทคโนโลยีสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ผ่านสื่อไร้สายที่รู้จักกันมีอยู่หลายเทคโนโลยีเช่น Bluetooth, IEEE 802.11, IrDA, HiperLAN, HomeRF และ GPRS เป็นต้น แต่เทคโนโลยีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดสำหรับการสื่อสารไร้สายคือ เทคโนโลยีตามมาตรฐาน IEEE 802.11 เนื่องจากอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN มีราคาไม่แพงนักและมีแนวโน้มลดลง อีกทั้งมีสมรรถนะในการรับส่งข้อมูลค่อนข้างสูง ง่ายต่อการติดตั้งและใช้งาน IEEE 802.11 WLAN ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมากขึ้น

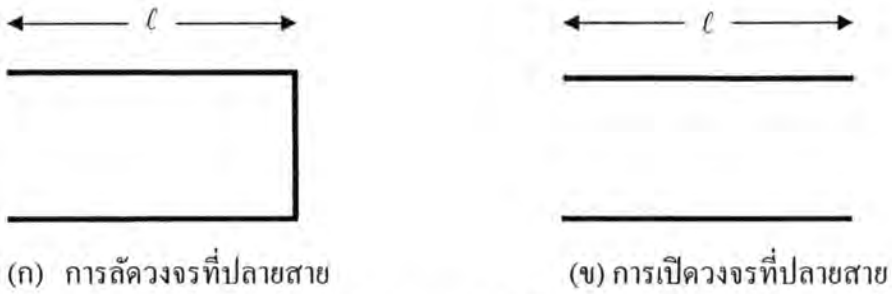
ดังนั้นอุปกรณ์สื่อสารนั้นจะต้องสามารถรองรับการใช้งานได้สองระบบหรือมากกว่าที่จะเป็นผลดีอย่างมากต่อการออกแบบและยังสะดวกต่อการใช้งานอีกด้วย หนึ่งในอุปกรณ์ที่สำคัญของระบบสื่อสารไร้สายโดยทั่วไปที่จำเป็นคือ วงจรกรองความถี่ (Filter) ซึ่งหลักการทำงานของวงจรกรองความถี่ สามารถแบ่งตามคุณลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency response) ดังรูปที่ 1.1 ได้ 4 ชนิดด้วยกันคือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass filter ; LPF), วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (Highpass filter ; HPF), วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Bandpass filter ; BPF), วงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน (Bandstop filter ; BSF)



รูปที่ 1.1 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติ

จากผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในทางอุดมคติ ในรูปที่ 1 เมื่อให้ $|H|$ คือขนาดของแรงดันทางด้านเอาต์พุต วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน จะยอมให้ความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่ f_c ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจรได้ ส่วนความถี่ที่สูงกว่า f_c ความถี่จะไม่ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร แสดงดังรูปที่ 1 (ก) สำหรับวงจรกรองความถี่สูงผ่านจะยอมให้ความถี่ที่สูงกว่าความถี่ f_c ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจรได้ ส่วนความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่ f_c จะไม่ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร แสดงได้ดังรูปที่ 1 (ข) สำหรับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน จะยอมให้ความถี่ตั้งแต่ f_{c1} ถึงความถี่ f_{c2} ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร ส่วนความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่ f_{c1} กับความถี่ที่สูงกว่า f_{c2} จะไม่ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร แสดงได้ดังรูปที่ 1 (ค) และวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน จะไม่ยอมให้ช่วงความถี่ f_{c1} ถึงความถี่ f_{c2} ผ่าน ไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร ส่วนความถี่อื่นๆ วงจรยอมให้ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตได้ แสดงได้ดังรูปที่ 1 (ง)

แรกเริ่มของวงจรกรองความถี่นั้นเป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างจากสายนำสัญญาณ โดยวงจรกรองความถี่เป็นสายนำสัญญาณแบบคู่ขนานและแบบ โคอแอกเซียล โดยทำการตัดให้มีความยาวที่เหมาะสมพร้อมกับจัดทำเงื่อนไขที่ปลายสายให้เหมาะสม เงื่อนไขที่ปลายที่เป็นไปได้จะมีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ ลัดวงจรและเปิดวงจรดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ การหาความยาวที่เหมาะสมนั้นจะทำให้หลายแบบด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่นจะพิจารณาจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายนำสัญญาณนั้น

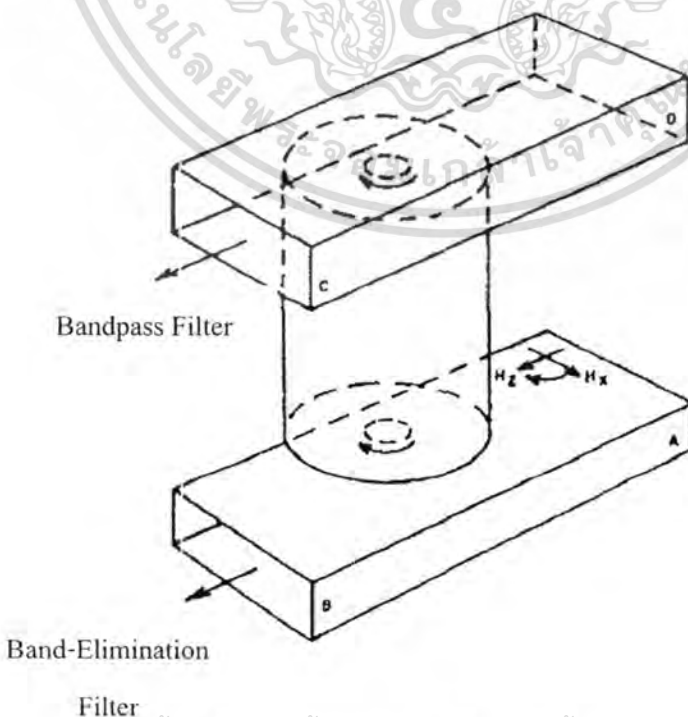


(ก) การลัดวงจรที่ปลายสาย

(ข) การเปิดวงจรที่ปลายสาย

รูปที่ 1.2 การนำสายนำสัญญาณมาสร้างเป็นวงจรกรองความถี่

ในย่านความถี่ไมโครเวฟคือความถี่ที่สูงกว่า 1 GHz ขึ้นไปนั้นวงจรเรโซแนนซ์แบบที่ใช้สายนำสัญญาณ จะเริ่มมีคุณสมบัติแย่งคือมีค่าประกอบคุณภาพ (Q) จะต่ำลง ดังนั้นจึงมักต้องใช้วงจรกรองความถี่ที่มีโครงสร้างแบบโพรงที่มีผนังเป็นโลหะรอบ (Cavity resonator) ซึ่งพลังงานแม่เหล็กและพลังงานไฟฟ้าก็จะสะสมอยู่ในโพรงนั้น และเนื่องจากผนังโลหะที่ใช้เป็นตัวนำที่ไม่สมบูรณ์แบบ ดังนั้นจะมีการสูญเสียเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไหลในเนื้อโลหะเช่นเดียวกัน และค่าการสูญเสียนี้ก็จะส่งผลต่อค่า Q ของวงจรเช่นเดียวกัน วงจรเรโซเนเตอร์แบบโพรงนี้ส่วนใหญ่จะสร้างจากท่อนำคลื่นทั้งแบบสี่เหลี่ยมและแบบวงกลม โดยทำการปิดปลายทั้งสองด้านของท่อนำคลื่นด้วยแผ่นโลหะ แล้วเจาะรูเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อ (Coupling) กำลังคลื่นเข้าออกกับภายนอกได้ ในปี ค.ศ. 1941 ถึง 1954 ได้มีการวิจัยและพัฒนาวงจรกรองความถี่ที่สร้างท่อโพรง (Waveguide Cavity Filter) [1] แสดงดังรูปที่ 1.3 แต่โครงสร้างนั้นมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก ด้วยข้อจำกัดนี้จึงถูกนำมาใช้งานเฉพาะด้านเท่านั้น

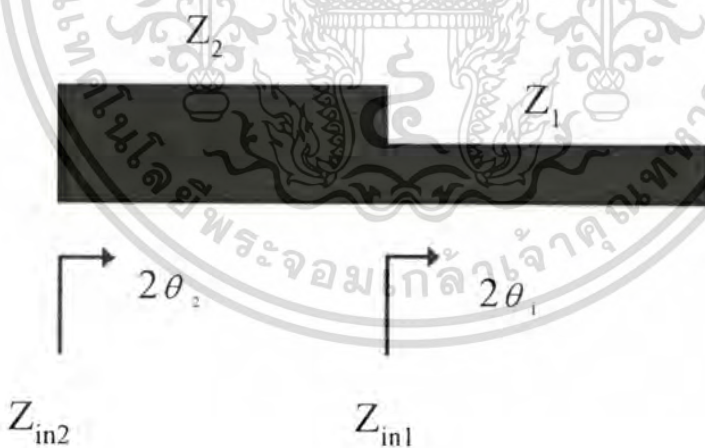


รูปที่ 1.3 วงจรกรองความถี่แบบท่อโพรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

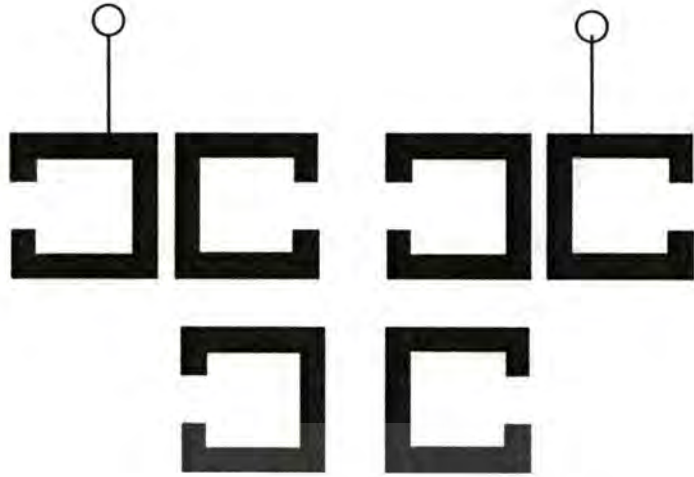
อีกรูปแบบหนึ่งสำหรับโครงสร้างของสายนำสัญญาณก็คือโครงสร้างสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปซึ่งเป็นสายนำสัญญาณที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ และใช้ในการเชื่อมโยงชิ้นส่วนวงจรต่างๆ ของวงจรไมโครเวฟ เนื่องจากไมโครสตริปมีขนาดเล็กจึงมีความเหมาะสมสำหรับทำวงจรรวมของไมโครเวฟ (Microwave Integrated Circuit ย่อว่า MIC) แต่มีข้อจำกัดที่สามารถรับกำลังงานได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนำคลื่น นอกจากนี้ยังมีค่าการลดทอนสัญญาณค่อนข้างสูงด้วย ดังนั้นจึงใช้ในการส่งผ่านและการจัดการกับสัญญาณที่มีระดับต่ำและในบริเวณจำกัด เช่นภายในแผ่นวงจรพิมพ์ อันเดียวกันเป็นต้น ในการออกแบบวงจรรองความถี่บนโครงสร้างไมโครสตริปนั้นได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจากโครงสร้างของไมโครสตริป จะมุ่งเน้นพัฒนาเพื่อให้เกิดการสูญเสียที่ต่ำ วงจรมีขนาดเล็กกะทัดรัดและมีคุณสมบัติในการตอบสนองทางความถี่ที่ดี

รูปแบบของวงจรรองความถี่โดยใช้เรโซเนเตอร์บนโครงสร้างไมโครสตริป ได้มีการพัฒนามากมายหลายรูปแบบและหลายระบบของการสื่อสาร แรกเริ่มของวงจรรองความถี่จะเป็นเรโซเนเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์แบบขั้นสมมาตร (Step impedance resonator) [2, 3] หรือ SIR ซึ่งสามารถควบคุมความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่หนึ่ง (First Harmonic) หรือความถี่ปลอมเทียม (Spurious Frequency) ได้ ซึ่งโครงสร้างของเรโซเนเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์แบบขั้น (SIR) แสดงได้ดังรูปที่ 1.4 โดยความถี่ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากตัวเรโซเนเตอร์เอง ซึ่งในการควบคุมความถี่ดังกล่าวนั้นจำเป็นต้องเพิ่มอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ซึ่งจะส่งผลให้เรโซเนเตอร์มีขนาดที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 1.4 เรโซเนเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์แบบขั้น

จากนั้นมาได้นักวิจัยเสนอการนำโครงสร้าง SIR มาพับปลายเพื่อทำให้ได้ขนาดของเรโซเนเตอร์ที่มีขนาดเล็กลงกว่าเดิม โดยเรียกว่า เรโซเนเตอร์บ่วงเปิด (Open-Loop Resonator) แสดงได้ดังรูปที่ 1.5 รวมทั้งกำหนดการจัดวางเรโซเนเตอร์เป็นการเชื่อมแบบไขว้ (Cross Coupling) [4, 5] เพื่อปรับปรุงผลตอบสนองทางด้านความถี่ให้ดีขึ้น และลดขนาดของวงจรไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



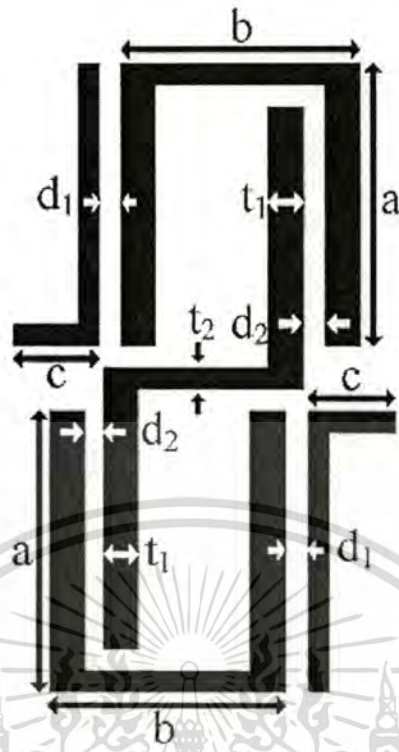
รูปที่ 1.5 เรโซเนเตอร์บ่วงเปิด

ต่อมาได้มีการพัฒนาออกแบบเรโซเนเตอร์ด้วยการพับตัวเรโซเนเตอร์ [6, 7, 8] เพื่อที่จะลดขนาดของเรโซเนเตอร์ให้มีขนาดเล็กมากที่สุด แต่ก็ยังมีนักวิจัยที่พยายามพัฒนาที่จะทำให้โครงสร้างมีขนาดเล็กลงอีก โดยการทำเป็นแบบแฮร์พินไลน์ (Hairpin Line) และทำการลดฮาร์โมนิกส์ที่จะเกิดขึ้นในความถี่ถัดมาด้วย [9, 10] แต่จะมีผลต่อค่า $|S_{11}|$ คือมีค่าที่ไม่ต่ำมาก และค่าศูนย์ (Zero) ที่ความถี่ด้านสูงไม่ดี

การสื่อสารในยุคปัจจุบันอุปกรณ์สื่อสารนั้นจะต้องสามารถรองรับการใช้งานในสองระบบหรือมากกว่า เนื่องจากย่านความถี่ในปัจจุบันมีความใกล้เคียงกันมากและบางการประยุกต์ใช้งานมีการใช้งานในสองย่านความถี่ ดังนั้นหากเราสามารถที่จะออกแบบวงจรเพียงวงจรเดียวแต่สามารถใช้งานได้ครอบคลุมการใช้งานในสองระบบหรือมากกว่าก็จะเป็นผลดีอย่างมากต่อการออกแบบและยังสะดวกต่อการใช้งานได้อีกด้วย

สำหรับวงจรกรองความถี่แบบหลายความถี่ (Multi-band Filter) นั้นสิ่งสำคัญในการออกแบบที่ต้องคำนึงถึงคือเรื่องของประสิทธิภาพในการใช้งาน ปัจจุบันงานวิจัยส่วนใหญ่ในระบบการสื่อสารไร้สาย ได้มีการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่สามารถครอบคลุมการใช้งานในสองระบบโดยการนำเรโซเนเตอร์หลายตัว (Multi-resonator) มาเชื่อมต่อกันในลักษณะเป็นลำดับ [11] เพื่อที่จะกำจัดเรโซแนนซ์โหมดอันดับที่สูงขึ้น (higher order resonant mode) หรือเพื่อสร้างแถบความถี่คู่ (Second passband) และอีกหนึ่งงานวิจัยที่นำเรโซเนเตอร์หลายตัวมาสร้างขึ้นโดยใช้หลักการของเรโซเนเตอร์แบบขั้นและแบบแฮร์พินไลน์ เพื่อทำให้เกิดแถบความถี่คู่ขึ้นมา [12] ดังแสดงในรูปที่ 1.6 จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า การเกิดของแถบความถี่คู่เกิดขึ้นจากการนำเรโซเนเตอร์หลายตัวมาต่อเรียงกัน ซึ่งมีผลทำให้เพิ่มขนาดของวงจรกรองความถี่ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.6 เรโซเนเตอร์หลายตัวที่สร้างขึ้นโดยใช้หลักการของเรโซเนเตอร์แบบขั้น

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอรูปแบบของวงจรกรองความถี่ผ่านแถบแบบสองความถี่ สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สาย ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11b/g และ 802.11a โดยมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานคือช่วงความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz โดยการปรับปรุงคุณลักษณะของวงจรกรองความถี่เดียวเพื่อให้รองรับกับการเกิดแถบความถี่คู่ในบริเวณแถบความถี่ที่ต้องการ โดยเป็นการเพิ่มเรโซเนเตอร์เข้าไปในวงจรกรองความถี่เดียว ซึ่งการปรับปรุงคุณลักษณะดังกล่าวจะทำให้วงจรที่พัฒนามีขนาดเล็กกว่าการต่อเรียงกันของเรโซเนเตอร์หลายตัวซึ่งจะทำให้เพิ่มขนาดของวงจรกรองความถี่ผ่าน

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์นำเสนอการศึกษาและออกแบบตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอสสำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สาย ที่มีความถี่ปฏิบัติการกลางที่ 2.445 GHz และ 5.25 GHz โดยตัวกรองผ่านแถบเป็นการออกแบบและศึกษาจากเรโซเนเตอร์ที่มีโครงสร้างบนสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป การปรับปรุงคุณลักษณะของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวเพื่อให้รองรับกับการเกิดของแถบความถี่คู่ ในบริเวณแถบความถี่ที่ต้องการ โดยใช้สมมุติฐานของการใช้สองเรโซเนเตอร์ในโครงสร้างเดียว จากนั้นทำการจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ โดยการใช้โปรแกรม CST Microwave Studio 2014 ไม่่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MICROWAVE STUDIO® เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของสมมติฐานของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ โดยพิจารณาผลของค่า $|S_{21}|$ และ $|S_{11}|$ เป็นหลักในการออกแบบตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่เน้นให้มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และมีขนาดเล็ก ซึ่งเมื่อผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับแนวคิดตามสมมติฐานข้างต้นแล้ว จากนั้นจึงเป็นการสร้างและทำการทดสอบตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบต่อไป เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาและออกแบบของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ เพื่อลดขนาดโครงสร้างของเรโซเนเตอร์ในการรองรับการเกิดของแถบความถี่คู่ โดยเน้นให้โครงสร้างมีขนาดเล็ก และไม่ซับซ้อน แต่มีประสิทธิภาพเพื่อเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สาย

1.3 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย ตลอดจนแนวคิดและวิธีการในการพิจารณาวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริป

บทที่ 3 กล่าวถึงรูปแบบโครงสร้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชและทำการจำลองวงจรสมมูลตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชเพื่อศึกษาผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริป โดยพิจารณาจากคุณสมบัติของตัวแปรที่ตอบสนองทางความถี่ $|S_{21}|$ และ $|S_{11}|$ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการวิเคราะห์ และ ออกแบบตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ให้ได้ตามต้องการ

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดสอบของวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้จากการวิเคราะห์

บทที่ 6 วิจัยและสรุป โดยกล่าวถึงภาพรวมของงานวิทยานิพนธ์นี้ทั้งในเชิงทฤษฎีและทางปฏิบัติ ตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อประกอบเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาระบบให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการของตัวกรองผ่านแถบความถี่

2.1 บทนำ

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟเป็นชื่อที่ใช้เรียกช่วงความถี่ระหว่าง 300 MHz ถึง 30 GHz มีช่วงความยาวคลื่น 1 เมตร ถึง 1 มิลลิเมตร ส่วนความถี่วิทยุ (Radio Frequency) เป็นความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ไมโครเวฟ ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านไมโครเวฟและความถี่วิทยุได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้น โดยเฉพาะในระบบการสื่อสาร โทรคมนาคม การสื่อสารไร้สาย ระบบนำร่องและการบิน เป็นต้น

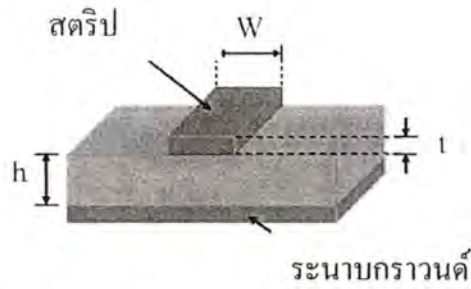
วงจรกรองความถี่จัดว่าเป็นวงจรพื้นฐานที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในย่านความถี่ต่ำและความถี่ไมโครเวฟซึ่งวงจรกรองความถี่คือ วงจรสองพอร์ตที่ใช้ในการควบคุมผลการตอบสนองทางด้านความถี่ที่สนใจ โดยวงจรกรองจะยอมให้สัญญาณเฉพาะบางย่านความถี่ผ่านไปได้นั้น ซึ่งจะเรียกย่านความถี่ที่วงจรกรองยอมให้ผ่านว่า ย่านแถบผ่าน (Passband) และย่านความถี่ที่วงจรกรองจะกั้นไว้ไม่ให้ผ่านเรียกว่า ย่านแถบหยุด (Stopband) ปกติแล้วอาจแบ่งประเภทของวงจรกรองความถี่ออกเป็น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass) วงจรกรองความถี่ผ่านสูง (Highpass) วงจรกรองความถี่แถบผ่าน (Bandpass) และวงจรกรองกั้นแถบความถี่ (Band-reject)

ในส่วนของบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปร้าวเอช อีกทั้งลักษณะสมบัติของสายนำสัญญาณบนไมโครสตริปและพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อเป็นพื้นฐานในการออกแบบวงจรกรองความถี่ในการประยุกต์ต่อไปในอนาคต

2.2 โครงสร้างสายนำสัญญาณบนไมโครสตริป

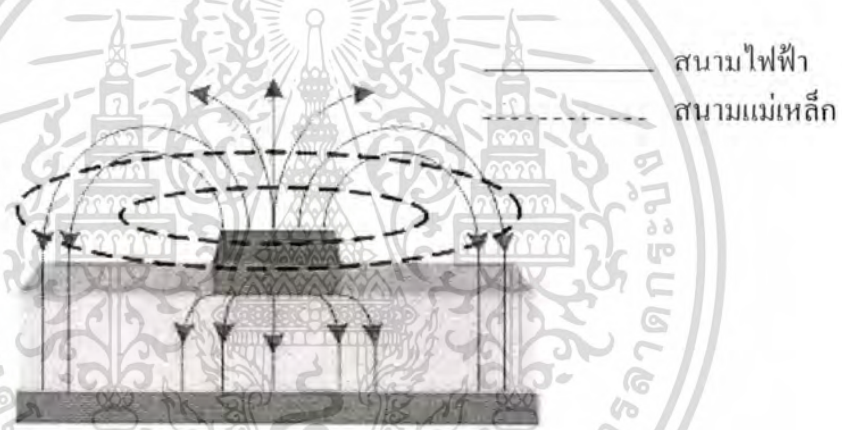
ลักษณะโครงสร้างของสายนำสัญญาณบนโครงสร้างไมโครสตริป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยแถบบางหรือสตริป (Strip) ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นสายนำสัญญาณ มีความกว้างเป็น w และมีความหนาเป็น t ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะที่มีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการออกแบบ โดยสตริปจะอยู่บนชั้นของวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ϵ_r และมีความหนาเป็น h สำหรับแผ่นโลหะที่อยู่ด้านล่างจะทำหน้าที่เป็นระนาบกราวนด์ (Ground plane) ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของไมโครสตริป

ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านวัสดุฐานรองรับบริเวณที่อยู่ระหว่างสตริปกับระนาบกราวด์ โดยลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนสายนำสัญญาณไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะเป็นการแพร่กระจายของคลื่นที่ใกล้เคียงโหมด TEM เพราะมีสนามในแนวแกนอยู่ด้วยจึงเรียกการกระจายสนามแบบนี้ว่าเป็นแบบ Quasi TEM



รูปที่ 2.2 รูปแบบการกระจายสนามของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

2.2.1 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

การวิเคราะห์เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristics impedance: Z_c) สามารถหาได้จาก [13]

$$Z_c = \frac{1}{c\sqrt{C_a C_d}} \quad (2.1 ก)$$

$$\epsilon_{rc} = \frac{C_d}{C_a} \quad (2.1 ข)$$

โดยที่ค่า C_d เป็นค่าความจุไฟฟ้าต่อความยาวของสตริปหนึ่งหน่วย ซึ่งมีชั้นไดอิเล็กตริกอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง สำหรับค่า C_a เป็นค่าความจุไฟฟ้าต่อความยาวของสตริปหนึ่งหน่วยซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญเตเห็นใบใช้ประโยชน์การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีอากาศอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำสตริป นั่นคือ เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างสตริปที่ด้านบนของชั้นไดอิเล็กตริกนั่นเอง และค่า c เป็นค่าความเร็วของคลื่นในอากาศ (มีค่าประมาณ 3×10^8 เมตร/วินาที)

ในที่นี้จะพิจารณาว่าความหนาของสตริปมีค่าใกล้เคียงศูนย์ (t เข้าใกล้ 0) ดังนั้นจะได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า 1 % ดังสมการที่ 2.2 สำหรับอัตราส่วน $w/h \leq 1$ ว่า

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{rc}}} \ln \left[\frac{8h}{w} + 0.25 \frac{w}{h} \right] \quad (2.2 ก)$$

$$\epsilon_{rc} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left\{ \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-0.5} + 0.04 \left[1 - \frac{w}{h} \right]^2 \right\} \quad (2.2 ข)$$

สำหรับค่าอัตราส่วน $w/h \geq 1$ จะได้ว่า

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{rc}}} \left\{ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left[\frac{w}{h} + 1.444 \right] \right\}^{-1} \quad (2.3 ก)$$

$$\epsilon_{rc} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-0.5} \quad (2.3 ข)$$

วิธีการที่มีความเที่ยงตรงในการคำนวณที่สูงกว่า [13] แสดงดังสมการที่ (2.4)

$$\epsilon_{rc} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{10}{u} \right]^{-ab} \quad (2.4 ก)$$

โดยที่ u คืออัตราส่วนของ w/h และค่า a กับ b มีค่าเป็น

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left[\frac{u^4 + (u/52)^2}{u^4 + 0.432} \right] + \frac{1}{18.7} \ln \left[1 + (u/18.1)^3 \right]$$

และ

$$b = 0.564 \left[\frac{\epsilon_r - 0.9}{\epsilon_r + 3} \right]^{0.053}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสามารถหาได้จาก

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left[\frac{F}{u} + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{u} \right)^2} \right] \quad (2.4 ข)$$

โดยค่า F มีค่าเป็น

$$F = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[- \left(\frac{30.666}{u} \right)^{0.7528} \right]$$

จากสมการที่ (2.4) นี้ค่า $\epsilon_r \leq 128$ และค่า u มีค่าระหว่าง 0.01 ถึง 100 ($\epsilon_r \leq 128$ และ $0.01 \leq u \leq 100$) จะทำให้ผลของการคำนวณของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.2%

สำหรับค่า $Z_c = \sqrt{\epsilon_{re}}$ 0.0% มีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01% ถ้าค่า $u \leq 1$ และจะมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.03% ถ้าค่า $u \leq 1000$

2.2.2 ค่าความยาวคลื่นบนสตริป ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นและค่าความเร็วเฟส

เมื่อทราบค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์จะทำให้สามารถคำนวณหาความยาวคลื่นบนสตริป (λ_g) และค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นอื่นได้แก่ ค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น (Propagation constant, β) และค่าความเร็วเฟส (Phase velocity, v_p) ดังนี้ [13]

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.5 ก)$$

เมื่อ λ_0 เป็นค่าความยาวคลื่นในอากาศซึ่งเป็นสัดส่วนกลับของความถี่ (f) และหากต้องการทราบค่าความยาวคลื่นบนสตริปในหน่วยของมิลลิเมตร จะได้ว่า

$$\lambda_g = \frac{300}{f(\text{GHz})\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.5 ข)$$

สำหรับค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น และค่าความเร็วเฟสสามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_p = \frac{w}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{rc}}} \quad (2.5 \text{ ง})$$

เมื่อ c คือ ค่าความเร็วของคลื่นในอากาศ (3×10^8 เมตร/วินาที)

2.2.3 การสังเคราะห์หาความกว้างต่อความหนา w/h

ในการคำนวณหาความกว้างต่อความหนา w/h ของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเมื่อทราบค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_c และค่าไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ϵ_{rc} สามารถแสดงได้ดังนี้

สำหรับที่ $w/h \leq 2$ พิจารณาได้เป็น

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (2.6)$$

และสำหรับที่ $w/h \geq 2$ พิจารณาได้เป็น

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ (B-1) - \ln(2B-1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$A = \frac{Z_c}{60} \left\{ \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right\}^{0.5} = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left\{ 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right\} \quad (2.8)$$

และ

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.9)$$

2.2.4 ผลกระทบจากความหนาของสตริป

ความหนาของสตริป (t) โดยปกติจะมีค่าน้อยมากๆ จนอาจพิจารณาว่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติค่าความหนาดังกล่าวมิใช่ศูนย์ตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ ซึ่งค่าความหนาดังกล่าวจะมีผลต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก โดยจะเริ่มพิจารณาจากสมการที่ 2.2 และ 2.3 ได้ว่า [13]

สำหรับที่ $w/h \leq 1$ พิจารณาได้เป็น

$$Z_c(t) = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\epsilon_{rc}}} \ln \left\{ \frac{8}{w(t)/h} + 0.25 \frac{w(t)}{h} \right\} \quad (2.10 ก)$$

สำหรับที่ $w/h \geq 1$ พิจารณาได้เป็น

$$Z_c(t) = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\epsilon_{rc}}} \left\{ \frac{w(t)}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w(t)}{h} + 1.444 \right) \right\}^{-1} \quad (2.10 ข)$$

โดยที่จะพิจารณาค่าอัตราส่วน w/h ที่มีผลกระทบจากความหนาของสตริป (t) ได้ว่า

$$\frac{w(t)}{h} = \begin{cases} \frac{w}{h} + \frac{1.25t}{\pi h} \left[1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right] & ; (w/h \leq 0.5\pi w) \\ \frac{w}{h} + \frac{1.25t}{\pi h} \left[1 + \ln \frac{2ht}{t} \right] & ; (w/h \geq 0.5\pi w) \end{cases} \quad (2.10 ค)$$

และสำหรับค่าไดอิเล็กตริกได้รับผลกระทบจากความหนาของสตริป จะพิจารณาได้ว่า

$$\epsilon_{rc}(t) = \epsilon_{rc} - \frac{\epsilon_{rc} - 1}{4.6} \frac{t/h}{\sqrt{w/h}} \quad (2.10 ง)$$

โดยที่ค่า ϵ_{rc} เป็นค่าไดอิเล็กตริกที่พิจารณาให้ความหนาของสตริปเป็นศูนย์ และจากการพิจารณาสมการที่ผ่านมา พบว่า ผลกระทบของความหนาของสตริปต่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีผลน้อยมาก หากว่าอัตราส่วนของความหนาของสตริปต่อความหนาของชั้น ไดอิเล็กตริกน้อย (โดยปกติ $t \ll h$) อย่างไรก็ตามความหนาของสตริปจะมีผลอย่างยิ่งต่อการสูญเสียของคลื่นบนแผ่นตัวนำ (Conductor Loss) ของสายนำสัญญาณบนไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่น

การสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่น จะมีค่าคงที่หรือได้ที่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ที่เดินทางบนสตริป ซึ่งจะกำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่แปรผันตามความถี่เป็น $\epsilon_{re}(f)$ ดังนั้นจึงได้ผลของการพิจารณาเป็น [13]

$$\epsilon_{re}(f) = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{re}}{1 + (f/f_{50})^m} \quad (2.11 ก)$$

โดยที่ค่า f_{50} สามารถหาได้จาก

$$f_{50} = \frac{f_{TM0}}{0.75 + (0.75 - 0.332\epsilon_r^{-1.73})(w/h)} \quad (2.11 ข)$$

และค่า f_{TM0} หาได้โดย

$$f_{TM0} = \frac{c}{2\pi h \sqrt{\epsilon_r - \epsilon_{re}}} \tan^{-1} \left[\epsilon_{re} \sqrt{\frac{\epsilon_{re} - 1}{\epsilon_r - \epsilon_{re}}} \right] \quad (2.11 ค)$$

ซึ่งค่าของ $m = m_0 m_c \leq 2.32$ และสามารถหาค่า m_0 กับ m_c ได้จาก

$$m_0 = 1 + \frac{1}{1 + \sqrt{w/h}} + 0.32 \left[\frac{1}{1 + \sqrt{w/h}} \right]^3 \quad (2.11 ง)$$

$$\left\{ 1 + \frac{1.4}{1 + w/h} \left\{ 0.15 - 0.235 \exp\left(\frac{-0.45f}{f_{50}}\right) \right\} \right\} \text{ สำหรับ } w/h \geq 0.7 \quad (2.11 จ)$$

ในขณะที่ c คือ ความเร็วของคลื่นที่เดินทางในอากาศ และหากว่าผลคูณของ m_0 และ m_c มีค่ามากกว่า 2.32 จะประมาณให้ว่าเป็น 2.32 จึงอาจกล่าวได้ว่าค่า m นี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 2.32 เท่านั้น ซึ่งจากสมการที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าหากค่าความถี่ยิ่งสูงมากขึ้นเท่าใด ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีผลต่อความถี่ หรือ $\epsilon_{re}(f)$ จะเข้าใกล้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นไดอิเล็กตริกบนโครงสร้างไมโครสตริปนั่นเอง อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากสมการที่กล่าวมาจะมีความผิดพลาดเพียง 0.6% หากว่าค่าอัตราส่วน w/h มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผลกระทบที่มีต่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ สามารถประมาณได้จาก

$$Z_c(f) = Z_c \frac{\epsilon_{rc}(f) - 1}{\epsilon_{rc} - 1} \sqrt{\frac{\epsilon_{rc}}{\epsilon_{rc}(f)}} \quad (2.12)$$

โดยที่ Z_c เป็นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

2.2.5.1 การลดทอน หรือ การสูญเสียบนโครงสร้างไมโครสตริป

สามารถพิจารณาตามส่วนประกอบของโครงสร้างได้ 3 ส่วน คือ การสูญเสียของแผ่นตัวนำ (Conductor Loss) การสูญเสียของชั้นไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) และการสูญเสียจากการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Loss) จากที่ได้ทราบค่าคงที่

2.2.5.1.1 ค่าการสูญเสียของแผ่นตัวนำ

ค่าการสูญเสียในตัวนำเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของไมโครสตริป ในการคำนวณนั้นจะต้องทราบการกระจายของกระแสที่ไหลบนไมโครสตริป และเนื่องจากการไหลของกระแสไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้การคำนวณมีความยุ่งยาก อย่างไรก็ตาม ถ้าทราบการกระจายตัวของกระแสเราอาจจะคำนวณค่าการสูญเสียในตัวนำของไมโครสตริปได้ดังนี้ [14]

$$\alpha_c = \frac{R_{s1}}{2Z_0} \int_c \frac{|J_1|^2}{|I|^2} dl + \frac{R_{s2}}{2Z_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|J_1|^2}{|I|^2} dl \quad (2.13)$$

เมื่อ R_{s1} และ R_{s2} เป็นค่าความต้านทานที่ผิวของตัวนำด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ $J_1(x)$ และ $J_2(x)$ เป็นค่าความหนาแน่นกระแสที่สัมพันธ์กับค่าความต้านทาน Z_0 เป็นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และ $|I|$ เป็นขนาดของผลรวมกระแสในตัวนำใดตัวนำหนึ่ง โดยเทอมแรกในสมการจะเป็นค่าการสูญเสียในสตริปที่อยู่ด้านบน และเทอมที่สองเป็นค่าการสูญเสียในกราวนด์ด้านล่างของไมโครสตริป

เนื่องจากที่ความถี่สูงนั้นกระแสจะไหลเฉพาะที่ผิวของตัวนำเท่านั้น โดยความลึกของกระแสจากผิวตัวนำมีค่าเท่ากับความลึกที่ผิว (δ_n) ซึ่งแสดงได้ดังในรูปที่ 2.13 ดังนั้นการอินทิเกรตในสมการ (1) ของเทอมแรกจึงเป็นการอินทิเกรตรอบผิวตัวนำ ขณะที่เทอมที่สองเป็นการอินทิเกรตเฉพาะที่ผิวด้านบนเท่านั้น และวิธีการของวีลเลอร์ (Wheeler's method) จะสามารถประมาณค่าการสูญเสียในตัวนำของไมโครสตริปได้ดังนี้ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_c = 8.68 \frac{R_s}{Z_c h} \alpha_c' \quad \text{dB/m} \quad (2.14)$$

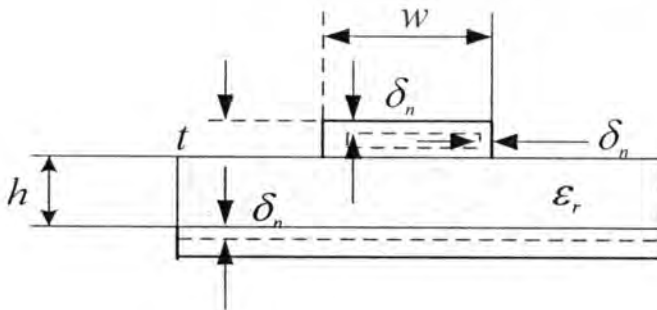
เมื่อ

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad (2.15)$$

$$\alpha_c' = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \left\{ 1 - \left(\frac{w_{eq}}{4h} \right)^2 \right\} \left[1 + \frac{h}{w_{eq}} + \left\{ \frac{t}{w} + \ln \left(\frac{4\pi w}{t} \right) \right\} \right], & w/h \leq 1/2\pi \\ \frac{1}{2\pi} \left\{ 1 - \left(\frac{w_{eq}}{4h} \right)^2 \right\} \left[1 + \frac{h}{w_{eq}} + \left\{ \ln \left(\frac{2h}{t} \right) - \frac{t}{h} \right\} \right], & 1/2\pi \leq w/h \leq 2 \\ \left[\frac{w_{eq}}{h} + \frac{w_{eq}/\pi h}{w_{eq}/2h + 0.94} \right] \left[1 + \frac{h}{w_{eq}} + \frac{h}{\pi w_{eq}} \left\{ \ln \left(\frac{2h}{t} \right) - \frac{t}{h} \right\} \right], & 2 \leq w/h \\ \left[\frac{w_{eq}}{h} + \frac{2}{\pi} \ln \left\{ 5.44 \left(\frac{w_{eq}}{2h} + 0.94 \right) \right\} \right]^2, & 2 \leq w/h \end{cases} \quad (2.16)$$

และ

$$w_{eq} = \begin{cases} w + \frac{t}{\pi} \left(\ln \frac{4\pi w}{t} + 1 \right), & w/h \leq 1/2\pi \\ w + \frac{t}{\pi} \left(\ln \frac{2h}{t} + 1 \right), & w/h \leq 1/2\pi \end{cases} \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.3 ไมโครสตริปที่ใช้ในการประมาณค่าการสูญเสียในตัวนำของวิลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5.1.2 ค่าการสูญเสียในไดอิเล็กตริก

ค่าการสูญเสียในไดอิเล็กตริกของไมโครสตริปสามารถคำนวณได้จาก [14]

$$\alpha_d = 27.3 \frac{\epsilon_r (\epsilon_{eff} - 1) \tan \delta}{\sqrt{\epsilon_{eff}} (\epsilon_r - 1) \lambda_0} \quad \text{dB/m} \quad (2.18)$$

เมื่อ $\tan \delta$ และ ϵ_{eff} เป็นค่าแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ประสิทธิภาพตามลำดับ ตัวอย่างเช่น ไมโครสตริป 50Ω สร้างบนวัสดุฐานรองที่มี $h = 5 \text{ mil}$, $\epsilon_r = 2.2$ และ $\tan \delta = 0.001$ จะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกเท่ากับ 0.0106 dB ต่อเซนติเมตร ณ ความถี่ 10 GHz ซึ่งยังนับได้ว่ามีค่าต่ำกว่าการสูญเสียในตัวนำของไมโครสตริปที่มีโครงสร้างเหมือนกัน ดังนั้นในการใช้งานบางครั้งอาจพิจารณาเฉพาะการสูญเสียในตัวนำก็เพียงพอ

2.2.5.1.3 ค่าการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น

ค่าการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นนับว่าเป็นค่าการสูญเสียที่สำคัญ ซึ่งมักเกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity) ในไมโครสตริป อันได้แก่ การเกิดช่องว่าง การหักมุม การเปิดและลัดวงจร และอิมพีแดนซ์แบบขั้น เป็นต้น โดยการแผ่สัญญาณจากไมโครสตริปอาจเป็นสาเหตุของการรบกวนข้าม (Cross-talk) ไปยังอุปกรณ์หรือวงจรข้างเคียงได้ โดยที่ค่ากำลังงานเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นจากการไม่ต่อเนื่องของไมโครสตริปมีค่าดังนี้ [14]

$$P_r = 60 (k_0 h)^2 F(\epsilon_{eff}) \quad (2.19)$$

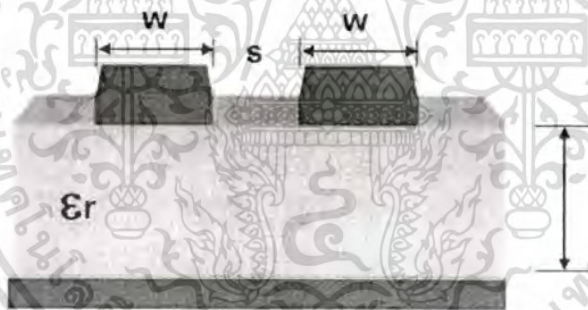
เมื่อ h เป็นค่าความสูงของวัสดุฐานรอง และ $F(\epsilon_{eff})$ เป็นค่าตัวประกอบรูปแบบ (Form factor) ของการไม่ต่อเนื่องบนโครงสร้างไมโครสตริป ซึ่งคำนวณได้จากตารางที่ 2.2 โดยจะมีความถูกต้องมากเมื่อค่า $\epsilon_{eff} \gg 1$ อย่างไรก็ตาม สังเกตได้ว่ากำลังงานจากการแพร่กระจายคลื่นออกจากไมโครสตริปแปรผันตรงกับกำลังสองของค่าความถี่ใช้งานและความสูงของวัสดุฐานรอง และจะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวประกอบรูปแบบของการไม่ต่อเนื่องบนไมโครสตริป [14]

Discontinuity	Form factor
Open circuit	$8/3\epsilon_{eff}$
Short circuit	$16/15\epsilon_{eff}^2$
90° corner	$4/3\epsilon_{eff}$
T-junction	$2/3\epsilon_{eff}$
Impedance step	$\frac{8}{3\epsilon_{eff}} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$

2.3 โหมดในการเชื่อมต่อสายนำสัญญาณบนโครงสร้างไมโครสตริป

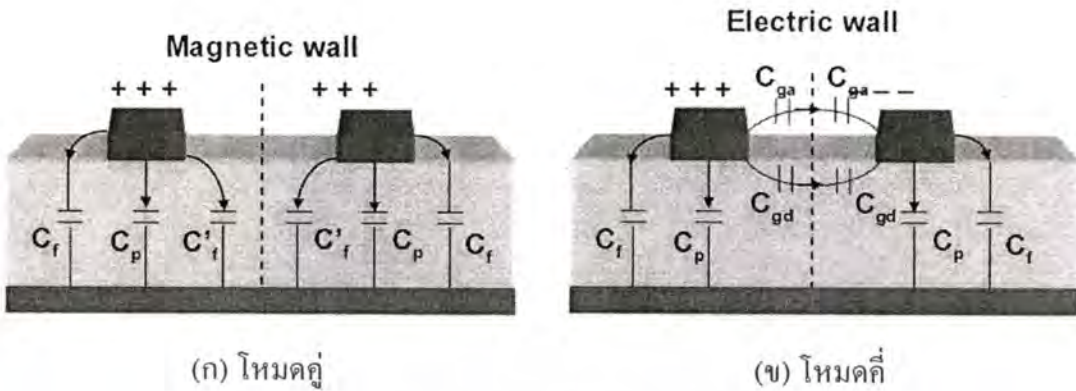
การเชื่อมต่อสายนำสัญญาณบนโครงสร้างไมโครสตริปได้ถูกนำมาใช้ในการประยุกต์ในการออกแบบเรโซเนเตอร์อย่างกว้างขวาง โดยลักษณะของการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณบนโครงสร้างไมโครสตริป

จากลักษณะการเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณบนโครงสร้างไมโครสตริปที่มีความกว้างของสตริปเป็น w และมีระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณเป็น s สามารถทำได้สองลักษณะด้วยกันคือการเชื่อมต่อในทางขนานของสายนำสัญญาณ (Parallel-coupled) และการเชื่อมต่อทางด้านปลายของสายนำสัญญาณ (Edge-coupled) ซึ่งจะทำให้เกิดโหมดในการเชื่อมต่อของสัญญาณเป็นสองโหมด คือ โหมดคู่ (Even Mode) และ โหมดคี่ (Odd Mode) แสดงดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 โหมดในการเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณบน โครงสร้างไมโครสตริป

สำหรับโหมดคู่ ขั้วของแรงดันไฟฟ้าของสตริปทั้งสองด้านจะเป็นขั้วเดียวกัน คือ ขั้วบวก ซึ่งเส้นแบ่งขอบเขตระหว่างสตริปทั้งสองใน โหมดนี้เรียกว่า “ผนังสนามแม่เหล็ก” (Magnetic wall) และสำหรับโหมดคี่ ขั้วของแรงดันไฟฟ้าของสตริปจะมีขั้วที่ตรงกันข้ามกันและเส้นแบ่งขอบเขตระหว่างสตริปทั้งสองในการเชื่อมต่อของคลื่นที่เรียกว่า “ผนังสนามไฟฟ้า” (Electric wall) ซึ่งเส้นแบ่งขอบเขตทั้งสองโหมดจะพิจารณาเป็นลักษณะสมมาตรทั้งสองด้านของเส้นขอบเขต

โดยทั่วไปทั้งสองจะเกิดขึ้นพร้อมกัน ในเวลาเดียวกัน แต่แตกต่างกันทางด้านของความเร็วเฟส เนื่องจากโครงสร้างของไมโครสตริปที่ทำให้ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นเป็นแบบ Quasi TEM นั่นเอง

2.3.1 ค่าความจุไฟฟ้าของโหมดคู่และคี่

หากพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งใน โหมดคู่ และคี่ ในภาพที่ 2.5 จะได้สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า [15]

$$C_e = C_p + C_f + C'_f \quad (2.10 \text{ ก})$$

$$C_o = C_p + C_f + C_{ga} + C_{gd} \quad (2.10 \text{ ข})$$

โดยที่ค่า C_p เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแผ่นตัวนำระหว่างสตริป และระนาบกราวด์ แพลน ดังนั้นจึงได้ว่า

$$C_p = \epsilon_u \epsilon_r w / h \quad (2.11 \text{ ก})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่า C_f และ C'_f เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากเส้นแรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่พยายามวิ่งเข้าหาซึ่งตรงข้ามในบริเวณที่ไม่เกิดการเชื่อมต่ออย่างสมบูรณ์ ซึ่งมีค่าเป็น

$$2C_f = \frac{\sqrt{\epsilon_{re}}}{cZ_c - C_p} \quad (2.11 \text{ ข})$$

$$C'_f = \frac{C_f}{1 + A(h/s) \tanh(8s/h)} \quad (2.11 \text{ ค})$$

โดยที่ $A = \exp[-0.1 \exp(2.33 - 2.53w/h)]$

ในส่วนของโหมดดี จะมีค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมานอกเหนือจากที่ได้กล่าวมานี้ คือค่าความจุไฟฟ้าระหว่างสตริปที่เกิดขึ้นสภาวะที่ชั้นวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกเป็นไดอิเล็กตริก (C_{gd}) และในสภาวะที่มีอากาศเป็นไดอิเล็กตริก (C_{ga}) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$C_{gd} = \frac{\epsilon_o \epsilon_r}{\pi} \ln \left[\coth \left(\frac{\pi s}{4h} \right) \right] + 0.65 C_f \left[\frac{0.02 \sqrt{\epsilon_r}}{s/h} + 1 - \frac{1}{\epsilon_r^2} \right] \quad (2.12 \text{ ก})$$

ซึ่งในส่วนของค่า C_{ga} จะสามารถพิจารณาได้จากลักษณะ โครงสร้างสตริประนาบร่วม (Coplanar Strip) ได้ว่า

$$C_{ga} = \epsilon_o \frac{K(k')}{K(k)} \quad (2.12 \text{ ข})$$

โดยที่ค่าอัตราส่วนของ $\frac{K(k')}{K(k)}$ มีค่าเท่ากับ

$$\frac{K(k')}{K(k)} = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \ln \left[2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right] \dots 0 \leq k^2 \leq 0.5 \\ \pi / \ln \left[2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right] \dots 0.5 \leq k^2 \leq 1 \end{cases} \quad (2.12 \text{ ค})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $k = \frac{s/h}{s/h + 2w/h}$ และ $k' = \sqrt{1 - k^2}$ โดยค่าความจุไฟฟ้าที่หาได้จะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 3% หากอัตราส่วนของ w/h มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 2 ($0.2 \leq w/h \leq 2$), ค่าอัตราส่วนของ s/h มีค่าอยู่ระหว่าง 0.05 ถึง 2 ($0.05 \leq s/h \leq 2$) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต้องมากกว่า 1 ($\epsilon_r \geq 1$)

2.3.2 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสำหรับโหมคคู่และโหมคคี่
จะได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสำหรับโหมคคู่ (Z_{ce}) และสำหรับโหมคคี่ (Z_{co}) ดังสมการ

$$Z_{ce} = \left(c \sqrt{C_o^a C_e^a} \right)^{-1} \quad (2.13 \text{ ก})$$

$$Z_{co} = \left(c \sqrt{C_o^a C_o^a} \right)^{-1} \quad (2.13 \text{ ข})$$

โดยที่ค่า C_o^a และ C_e^a เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมต่อของสตริปในโหมคคู่และโหมคคี่ ตามลำดับ ซึ่งมีอากาศเป็นชั้นไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง

ในส่วนของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในโหมคคู่ (ϵ_{rc}^c) และ โหมคคี่ (ϵ_{rc}^o) สามารถพิจารณาได้จากค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโหมคนั้นๆ ดังสมการ

$$\epsilon_{rc}^c = C_e^a / C_o^a \quad (2.14 \text{ ก})$$

$$\epsilon_{rc}^o = C_o^a / C_o^a \quad (2.14 \text{ ข})$$

ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทั้งในโหมคคู่ และ โหมคคี่จะพิจารณาคำด้วยการประมาณในกรณีที่ไม่มีการแพร่กระจายของคลื่น โดยรายละเอียดดังสมการ [15]

$$\epsilon_{rc}^c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{10}{v} \right]^{-a_e} \quad (2.15 \text{ ก})$$

$$\text{เมื่อ } v = \frac{u(20 + g^2)}{10 + g^2} + g \exp(-g)$$

$$a_e = 1 + \frac{1}{49} \ln \left[\frac{v^4 + (v/52)^2}{v^4 + 0.432} \right] + \frac{1}{18.7} \ln \left[1 + \left(\frac{v}{18.1} \right)^3 \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b = 0.564 \left[\frac{\varepsilon_r - 0.9}{\varepsilon_r + 3} \right]^{0.053}$$

$$u = w/h \text{ และ } g = s/h$$

ค่าที่ได้นี้จะมีความผิดพลาดไม่เกิน 0.7% หากว่าค่า u มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 ($0.1 \leq u \leq 10$), ค่า g มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 ($0.1 \leq g \leq 10$) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 18 ($1 \leq \varepsilon_r \leq 18$)

$$\varepsilon_{re}^o = \varepsilon_r + [0.5(\varepsilon_r + 1) - \varepsilon_{re} + a] \exp[-c_o g^{d_o}] \quad (2.15 \text{ ข})$$

$$\text{เมื่อ } a = 0.7287 [\varepsilon_{re} - 0.5(\varepsilon_r + 1)] [1 - \exp(-0.179u)]$$

$$b = \frac{0.747\varepsilon_r}{0.15 + \varepsilon_r}$$

$$c_o = b_o - (b_o - 0.207) \exp(-0.414u)$$

และ

$$d_o = 0.593 + 0.694 \exp(-0.526u)$$

ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε_{re}) เป็นที่พิจารณาจากสายนำสัญญาณเดี่ยวบนไมโครสตริปที่มีความกว้างเป็น w โดยค่าความผิดพลาดจากการคำนวณสำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในโหมดคลื่น จะมีค่าไม่เกิน 0.5%

สำหรับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะในโหมดคู่ (Z_{ce}) และโหมดคี่ (Z_{co}) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.20) ซึ่งจะมีค่าผิดพลาดในการคำนวณไม่เกิน 0.6% สำหรับค่า u ที่อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 ($0.1 \leq u \leq 10$), และค่า g อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 ($0.1 \leq g \leq 10$) และค่าของชั้นไดอิเล็กตริกมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 18 ($1 \leq \varepsilon_r \leq 18$)

$$Z_{ce} = \frac{Z_c \sqrt{\varepsilon_{re}} / \varepsilon_{re}^c}{1 - (Z_c Q_4 \sqrt{\varepsilon_{re}}) / 377} \quad (2.16 \text{ ก})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า ε , เป็นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณเดี่ยวบน โครงสร้างไมโครสตริปที่มีความกว้างของสตริปเป็น w และ

$$Q_1 = 0.8685u^{0.194}$$

$$Q_2 = 1 + 0.7519g + 0.189g^{2.31}$$

$$Q_3 = 0.1975 + [16.6 + (8.4/g)^6]^{-0.387} + \frac{1}{241} \ln \left[\frac{g^{10}}{1 + (g/3.4)^{10}} \right]$$

และ

$$Q_4 = \frac{2Q_1}{Q_2} \cdot \frac{1}{u^{Q_1} \exp(-g) + [2 - \exp(-g)]u^{-Q_1}}$$

$$Z_{co} = \frac{Z_c \sqrt{\varepsilon_{re}} / \varepsilon_{re}^a}{1 - (Z_c Q_{10} \sqrt{\varepsilon_{re}}) / 377} \quad (2.16 \text{ ข})$$

$$\text{เมื่อ } Q_5 = 1.794 + 1.14 \ln \left[1 + \frac{0.638}{g + 0.517g^{243}} \right]$$

$$Q_6 = 0.2305 + \frac{1}{281.3} \ln \left[\frac{g^{10}}{1 + (g/5.8)^{10}} \right] + \frac{1}{5.1} \ln [1 + 0.598g^{1.154}]$$

$$Q_7 = \frac{10 + 190g^2}{1 + 82.3g^3}$$

$$Q_8 = \exp[-6.5 - 0.95 \ln(g) - (g/0.15)^5]$$

$$Q_9 = \ln(Q_7) \cdot (Q_8 + 1/1.65)$$

2.4 พารามิเตอร์เอส

เนื่องจากพารามิเตอร์ Z, Y, H และ ABCD นั้นเราไม่สามารถทำการวัดเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง โดยเฉพาะที่ความถี่สูงมากๆ ในย่านไมโครเวฟ ดังนั้นพารามิเตอร์เอส (Scattering parameter) จึงได้ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของวงจรสองพอร์ต โดยใช้คุณสมบัติของไมวารณมิติทุกทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกี่ยวข้องกับคลื่นตกกระทบ (Incident wave) และคลื่นสะท้อน (Reflected wave) การวัดค่าพารามิเตอร์เอสจะทำได้ง่ายและได้ค่าที่ถูกต้องด้วย โดยจะไม่ก่อให้เกิดการออสซิลเลตระหว่างการวัดแม้จะมีการลัดวงจรหรือเปิดวงจรพอร์ตก็ตาม นอกจากนี้อุปกรณ์หรือวงจรที่จะนำมาทำการวัดค่าพารามิเตอร์เอสยังอาจอยู่ห่างจากเครื่องมือวัดในระยะที่เหมาะสม ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้สายนำสัญญาณเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเครื่องมือวัดกับอุปกรณ์หรือวงจรมุ่งพิจารณาวงจรสองพอร์ตในรูปที่ 2.6 เมื่อคลื่น a_1 จากแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูงถูกป้อนให้กับวงจรสองพอร์ต คลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับคืนมาที่แหล่งกำเนิดสัญญาณ (b_1) และอีกส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านวงจรสองพอร์ตไปที่เอาต์พุต เช่นเดียวกับกรณีของคลื่น a_2 คลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับคืนมาที่เอาต์พุต (b_2) และอีกส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านวงจรสองพอร์ตไปที่อินพุต โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นทั้งหมดสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (เมื่อ a และ b เป็นคลื่นกำลังงานออร์เมทไลซ์ (Normalized power wave))

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{aligned} \quad (2.17)$$

หรือเขียนในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

หรือ

$$[b] = [S][a] \quad (2.19)$$

โดยที่

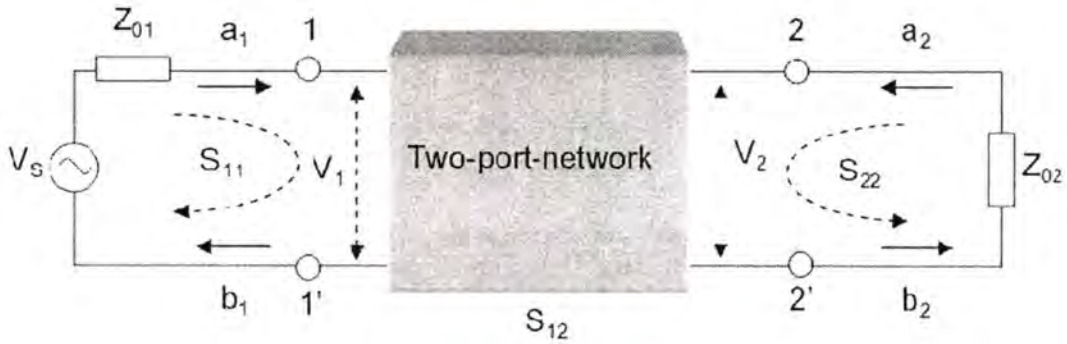
$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} = \text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ต 1} \quad (2.20)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} = \text{สัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2} \quad (2.21)$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} = \text{สัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 1} \quad (2.22)$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} = \text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พอร์ต 2} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วงจรสองพอร์ต

เมตริกซ์ $[S]$ หรือพารามิเตอร์เอสเป็นคุณสมบัติประจำของวงจรสองพอร์ต ในการวัดค่าพารามิเตอร์เอสนั้น การทำให้ค่า $a_1 = 0$ และ $a_2 = 0$ ทำได้โดยการต่อเมตซ์โหลดที่พอร์ต 1 และ 2 ตามลำดับ

คลื่นกำลังงานนอร์แมลไลซ์ a_n และ b_n (เมื่อ n เป็นพอร์ต 1 หรือ 2) จะมีความสัมพันธ์กับค่าแรงดันและกระแสดังนี้

$$a_n = \frac{V_n + Z_{gn} I_n}{2\sqrt{R_c(Z_{gn})}} \quad (2.24)$$

$$b_n = \frac{V_n - Z_o I_n}{2\sqrt{(Z_o)}} \quad (2.25)$$

ถ้า $Z_{gn} = Z_o$ จะพบว่าค่าแรงดัน V_n และกระแส I_n จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_n = \sqrt{Z_o} (a_n + b_n) \quad (2.26)$$

$$I_n = \frac{1}{\sqrt{Z_o}} (a_n - b_n) \quad (2.27)$$

คลื่นกำลังงานนอร์แมลไลซ์ a_n และ b_n ยังสามารถเขียนในเทอมของแรงดันและกระแสดังนี้

$$a_n = \frac{V_n^+}{\sqrt{Z_o}} = \sqrt{Z_o} I_n^+ \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_n = \frac{V_n^-}{\sqrt{Z_o}} = \sqrt{Z_o} I_n^- \quad (2.29)$$

โดยที่

$$V_n = V_n^+ + V_n^- = Z_o I_n^+ - Z_o I_n^- \quad (2.30)$$

เมื่อ V_n^+, V_n^- เป็นค่าแรงดันตกกระทบและสะท้อนตามลำดับ และ I_n^+, I_n^- เป็นค่ากระแสตกกระทบและสะท้อนตามลำดับ

ค่ากำลังงานที่พอร์ต์ n จะมีค่าเป็น

$$P_n = \frac{1}{2} R_e \{ V_n I_n^* \} = \frac{1}{2} (|a_n|^2 - |b_n|^2) \quad (2.31)$$

ดังนั้นพบว่า

$$P_1 = P_{inc} + P_{ref} = \frac{1}{2} (|a_n|^2 - |b_n|^2) = \frac{|a_1|^2}{2} (1 - |\Gamma_{in}|^2) \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$\Gamma_{in} = \frac{V_1^-}{V_1^+} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} = \frac{Z_m - Z_o}{Z_m + Z_o} = S_{11} \quad (2.33)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$P_2 = \frac{1}{2} (|a_n|^2 - |b_n|^2) = \frac{|a_2|^2}{2} (1 - |\Gamma_{out}|^2) \quad (2.34)$$

เมื่อ

$$\Gamma_{out} = \frac{V_2^-}{V_2^+} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0} = \frac{Z_{out} - Z_o}{Z_{out} + Z_o} = S_{22} \quad (2.35)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} = \frac{V_2^- \sqrt{Z_o}}{(V_1 + Z_o I_1)(2\sqrt{Z_o})} \Big|_{I_2^+ = V_2^+ = 0} = \frac{2V_2^-}{V_{g1}} = \frac{2V_2}{V_{g1}} \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} = \frac{V_1^- \sqrt{Z_0}}{(V_2 + Z_0 I_2) (2\sqrt{Z_0})} \Big|_{I_2^+ = V_1^+ = 0} \quad (2.37)$$

$$= \frac{2V_1^-}{V_{g2}} = \frac{2V_1}{V_{g2}}$$

2.5 คุณลักษณะของวงจรกรองความถี่วิทยุและไมโครเวฟ

ในปัจจุบันงานทางด้านความถี่วิทยุและไมโครเวฟ มีความต้องการวงจรกรองที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่าและแตกต่างไปจากวงจรกรองความถี่แบบเชบิเชฟ (Chebychev) เพิ่มมากขึ้น เพื่อรองรับกับความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นของระบบความถี่วิทยุและไมโครเวฟ โดยเฉพาะจากระบบสื่อสารไร้สาย ดังนั้นการออกแบบวงจรจึงต้องมีวิธีการออกแบบที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในเบื้องต้น โดยใช้เทคนิคต่างๆ เข้ามาช่วยในการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรกรองความถี่ รวมถึงเป็นการออกแบบโดยใช้คู่ของการส่งผ่านที่เป็นศูนย์ (Single Pair of Transmission Zero), การต่อเรียงกันแบบลำดับ

2.5.1 การออกแบบวงจรกรองโดยใช้หนึ่งคู่ของการส่งผ่านที่เป็นศูนย์

2.5.1.1 คุณลักษณะวงจรกรองความถี่ วงจรกรองแบบนี้มีคู่ของการส่งผ่านที่เป็นศูนย์ หรือ โพลการลดทอน (Attenuation Poles) ที่ความถี่ที่จำกัดอยู่ค่าหนึ่งเพื่อปรับปรุงความชันของวงจรกรองความถี่ให้ดีขึ้น ซึ่งสามารถใช้ฟังก์ชันของเชบิเชฟหรือเอลิปติก (Elliptic) ก็ได้ ดังนี้

$$|S_{21}(\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 F_n^2(\Omega)} \quad (2.38)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{10^{\frac{L_R}{10}} - 1}}$$

$$F_n(\Omega) = \cosh \left\{ (n-2) \cosh^{-1}(\Omega) + \cosh^{-1} \left(\frac{\Omega_a \Omega - 1}{\Omega_a - \Omega} \right) + \cosh^{-1} \left(\frac{\Omega_a \Omega + 1}{\Omega_a + \Omega} \right) \right\}$$

เมื่อ Ω คือ ตัวแปรความถี่ที่ถูกลออาร์เมตไลซ์เป็นแถบผ่านความถี่ตัดของวงจรกรอง ดันแบบต่ำผ่าน ε คือ ค่าคงที่ความพลัวโดยมีความสัมพันธ์กับ $L_R = 20 \log |S_{11}|$ ในหน่วย dB และ n คือ อันดับของวงจรกรองความถี่ จะพบว่าในฟังก์ชัน F_n จะมี $\Omega = \pm \Omega_a$ ($\Omega_a > 1$) คือ ตำแหน่งของความถี่ที่เกิดจากคู่ลดทอนซึ่งถ้า $\Omega_a \rightarrow \infty$ ฟังก์ชัน $F_n(\Omega)$ ก็จะเป็นฟังก์ชันเชบิเชฟ โดยการแปลงความถี่ให้เป็นวงจรกรองผ่านแถบคือ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Omega = \frac{1}{FBW} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (2.39)$$

เมื่อ ω คือ ตัวแปรความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านแถบ ω_0 คือ ความถี่กลางและ FBW คือ อัตราส่วนของแบนด์วิดท์ซึ่งตำแหน่งของความถี่ที่เกิดคู่โพลการลดทอน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.40)

$$\omega_{a1} = \omega_0 \frac{-\Omega_a FBW + \sqrt{(\Omega_a FBW)^2 + 4}}{2}$$

$$\omega_{a2} = \omega_0 \frac{-\Omega_a FBW - \sqrt{(\Omega_a FBW)^2 + 4}}{2} \quad (2.40)$$

2.5.1.2 การสังเคราะห์วงจรกรองความถี่ การส่งผ่านที่เป็นศูนย์ของวงจรกรองชนิดนี้ เกิดจากการเชื่อมต่อแบบไขว้ของคู่เรโซเนเตอร์ที่ไม่ได้อยู่ประชิดกัน ของวงจรเซฟปีเซฟแบบมาตรฐาน ได้พัฒนาวิธีการสังเคราะห์โดยการประมาณจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 2.7 ที่กล่องสี่เหลี่ยมแทนแอดมิตแตนซ์อุดมคติด้วยแอดมิตแตนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Admittance) J การสังเคราะห์การประมาณจะเริ่มต้นจากการหาองค์ประกอบของฟังก์ชันเซฟปีเซฟ

$$g_1 = \frac{2}{\gamma} \sin(\pi/2n)$$

$$g_1 g_2 = \frac{4 \sin[\pi(2i-1)/2n] \sin[\pi(2i-3)/2n]}{\gamma^2 + \sin^2[\pi(i-1)/n]} \quad \text{เมื่อ } i = m = n/2$$

$$y = \sinh \left[\frac{1}{n} \sinh^{-1} \frac{1}{\varepsilon} \right] \quad (2.41)$$

$$S = \left[\sqrt{1 + \varepsilon^2} + \varepsilon \right]^2$$

$$J_m = 1/\sqrt{S} \quad \text{สำหรับ } m \text{ เป็นเลขคู่}$$

$$J_m = \sqrt{S} \quad \text{สำหรับ } m \text{ เป็นเลขคู่}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$J_{m-1} = 0$ สำหรับวงจรกรองความถี่เซฟบีเชฟ

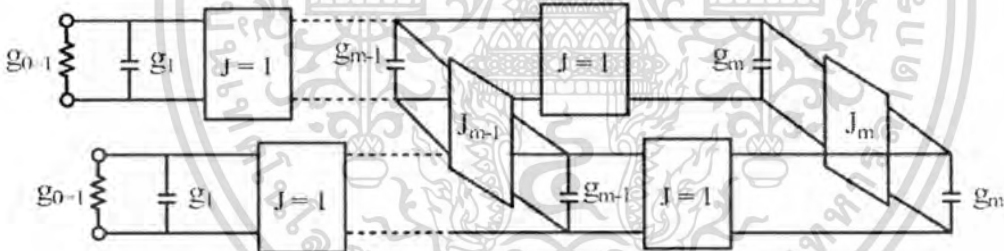
ในขั้นต้นจะกำหนดค่าตำแหน่งของการส่งผ่านที่เป็นศูนย์ที่ $\Omega = \pm\Omega_o$ เพื่อคำนวณหาค่า J_{m-1} โดยหาได้จาก

$$J_{m-1} = \frac{-J'_m}{(\Omega_o g_m)^2 J'_m} \tag{2.42}$$

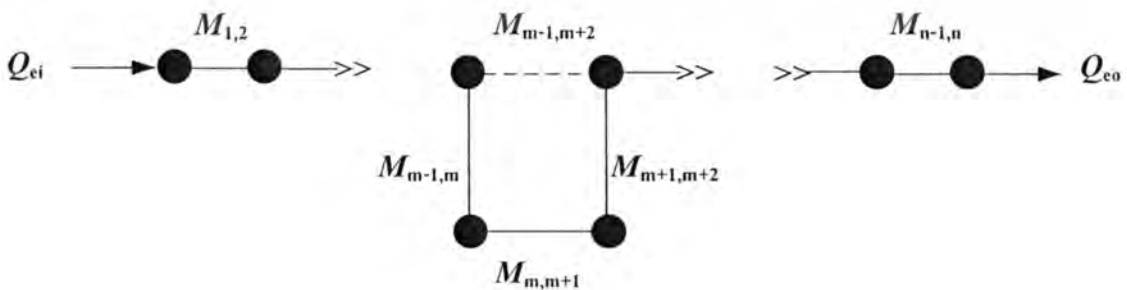
ค่าของ J_{m-1} ในตอนแรกนั้นจะไม่แมตช์กับวงจรกรองความถี่และต้องยังคงค่าการสูญเสียย้อนกลับในช่วงกลางแบนด์ไว้โดยทำการค่อยๆเปลี่ยนค่าของ J_m ซึ่งสามารถเปลี่ยนได้จาก

$$J'_m = \frac{J_m}{1 + J_m J_{m-1}} \tag{2.43}$$

เมื่อ J'_m คือค่าที่ปรับปรุงจากค่า J_m สมการ (2.43) และ (2.42) ใช้ในการทำซ้ำโดยใช้ค่าเริ่มต้น J_m และ J_{m-1} จากสมการที่ (2.41)



รูปที่ 2.7 วงจรกรองต้นแบบผ่านต่ำสำหรับการสังเคราะห์วงจรกรอง



รูปที่ 2.8 โครงสร้างการเชื่อมต่อต่างๆไปของวงจรกรองผ่านแถบ

โดยใช้คู่ของการส่งผ่านที่เป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพารามิเตอร์ในการออกแบบวงจรความถี่ผ่านแถบ ไม่ว่าจะป็นสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ และตัวประกอบคุณภาพภายนอกที่แสดงดังรูปที่ 2.8 สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}
 Q_{ei} = Q_{eo} &= \frac{g_0 g_1}{FBW} \\
 K_{12} &= \frac{FBW}{\sqrt{g_0 g_1}} \\
 K_{m,m+1} &= \frac{FBW \cdot J_m}{g_m} \\
 K_{m-1,m+2} &= \frac{FBW \cdot J_{m-1}}{g_{m-1}}
 \end{aligned} \tag{2.44}$$

2.6 ตัวเชื่อมต่อในงานไมโครเวฟ

ตัวเชื่อมต่อเป็นอุปกรณ์ไมโครเวฟที่จำเป็นในการเชื่อมต่อวงจร โดยตัวเชื่อมต่อในงานไมโครเวฟมีด้วยกันหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ตัวเชื่อมต่อส่วนมากจะมีความแตกต่างกันที่ โครงสร้าง ขนาด และวัสดุที่ใช้เป็น โลหะและ ไดอิเล็กตริก โดยตัวเชื่อมต่อที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติทนต่อกำลังงานไมโครเวฟสูง มีการสูญเสียกำลังงานต่ำ ค่า $VSWR$ ต่ำ และมีแบนด์วิดท์กว้าง โดยทั่วไปตัวเชื่อมต่อที่ใช้กับสายนำสัญญาณแถบความถี่สูงจะเป็นที่นิยมในการใช้งานมาก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

APC-3.5 (Amphenol Precision Connector-3.5 mm) เป็นตัวเชื่อมต่อที่พัฒนาขึ้น โดยบริษัท Hewlett-Packard แต่ปัจจุบันผลิตโดยบริษัท Amphenol ด้านหนึ่งของตัวเชื่อมต่อจะเป็นแบบ BNC และ อีกด้านเป็นแบบ SMA ตัวเชื่อมต่อ APC-3.5 มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 Ω ค่า $VSWR$ ต่ำมาก และสามารถใช้งานได้ถึงความถี่ 34 GHz

APC-7 (Amphenol Precision Connector-7 mm) เป็นตัวเชื่อมต่อที่พัฒนาขึ้น โดยบริษัท Hewlett-Packard เช่นเดียวกัน และได้รับการพัฒนาต่อโดยบริษัท Amphenol ตัวเชื่อมต่อทั้งสองด้านจะเหมือนกันทุกประการ กล่าวคือ ไม่แยกขั้ว (Male หรือ Female) ตัวเชื่อมต่อ APC-7 มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 Ω ค่า $VSWR$ ต่ำมาก และสามารถใช้งานได้ถึงความถี่ 18 GHz เหมาะกับงานวัดที่ต้องการความแม่นยำสูง

BNC (Bayonet Navy Connector) ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในงานด้านการทหารในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 สามารถใช้งานได้ถึงความถี่ไม่สูงมากนัก ปกติไม่เกิน 4 GHz เพราะที่ความถี่สูงๆ จะมีการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากตัวเชื่อมแบบนี้ ตัวเชื่อมต่อ BNC จะมีค่าอิมพีแดนซ์จาก 50 Ω ถึง 70 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SMA (Sub-Miniature A) เป็นตัวเชื่อมต่อที่พัฒนาขึ้นโดย Bendix Scintilla Corporation เนื่องจากเป็นตัวเชื่อมต่อที่นิยมใช้งานมากที่สุด ในปัจจุบันจึงมีหลายบริษัทที่ทำการผลิตออกมาจำหน่ายตัวเชื่อมต่อ SMA นี้มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 Ω หรือ 75 Ω มีค่า VSWR ต่ำมาก และสามารถใช้งานได้ถึงความถี่ 24 GHz (ความถี่ใช้งานอาจสูงกว่านี้ ทั้งนี้ขึ้นกับวัสดุและคุณภาพการผลิต)

SMC (Sub-Miniature C) เป็นตัวเชื่อมต่อที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 Ω มีขนาดเล็กกว่าแบบ SMA ตัวเชื่อมต่อ SMC ถูกพัฒนาขึ้นโดย Sealectro Corporation ซึ่งสามารถใช้งานได้ถึงความถี่ 7 GHz

Type N ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในงานด้านทหารในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 เป็นตัวเชื่อมต่อที่นิยมใช้งานมากในงานทั่วไป โดยความถี่ใช้งานอยู่ในช่วง 1 ถึง 18 GHz ตัวเชื่อมต่อแบบนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์ 50 Ω หรือ 75 Ω และมีค่า VSWR ต่ำ

2.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ ซึ่งประกอบด้วยลักษณะสมบัติของสายนำสัญญาณบนโครงสร้างไมโครสตริปและพารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆ ที่มีสำคัญต่อการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ในขั้นประยุกต์ต่อไปในอนาคต

บทที่ 3

รูปแบบเรโซเนเตอร์ชนิดไมโครสตริป

3.1 บทนำ

รูปแบบของวงจรกรองผ่านแถบโดยใช้เรโซเนเตอร์บนโครงสร้างไมโครสตริป ได้มีการพัฒนามากมายหลายรูปแบบและหลายระบบของการสื่อสาร โดยจะมุ่งเน้นพัฒนาในด้านการสูญเสียที่ต่ำ วงจรมีขนาดเล็กกะทัดรัดและมีคุณสมบัติในการตอบสนองทางความถี่ที่ดี ระบบการสื่อสารไร้สายในปัจจุบันก็เช่นเดียวกัน การออกแบบวงจรเรโซเนเตอร์บนโครงสร้างไมโครสตริป กลายเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจและเป็นที่แพร่หลายมากในปัจจุบัน การพัฒนารูปแบบของเรโซเนเตอร์สำหรับการสื่อสารไร้สาย เป็นการออกแบบให้มีขนาดเล็กกะทัดรัด และคำนึงถึงประสิทธิภาพในการใช้งาน หากเราสามารถที่จะออกแบบโครงสร้างให้มีขนาดเล็กกะทัดรัด และมีประสิทธิภาพครอบคลุมการใช้งานได้ในสองระบบหรือมากกว่าก็จะเป็นผลดีอย่างมากต่อการออกแบบและการใช้งาน

ในบทนี้จะนำเสนอรูปแบบของเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปรูปตัวเอช ซึ่งเรโซเนเตอร์ที่นำเสนอมีความยาวเป็นแบบครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น การพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงนั้นทำได้ด้วยการพับ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะมีพื้นฐานมาจากเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น สำหรับการปรับปรุงคุณลักษณะของเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปรูปตัวเอช เพื่อให้รองรับกับการเกิดของแถบความถี่คู่ โดยการเพิ่มไมโครสตริปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเข้าไปในไมโครสตริปรูปตัวเอช พร้อมทั้งทำการจำลองเพื่อทำการศึกษาผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปรูปเอช โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาแนวโน้มความสอดคล้องระหว่างเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปรูปตัวเอชและวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์รูปตัวเอช เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

3.2 รูปแบบของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอโครงสร้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชที่มีการตอบสนอง ณ แถบความถี่ที่ 2.4 GHz ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11b/g โดยความยาวของเรโซเนเตอร์เดี่ยวจะมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นของความถี่ตอบสนองหรือ $\lambda_g / 2$ (Half-Wave Length) การพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงของโครงสร้างดังกล่าว นั้น ทำได้ด้วยการพับซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะมีพื้นฐานมาจากเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น

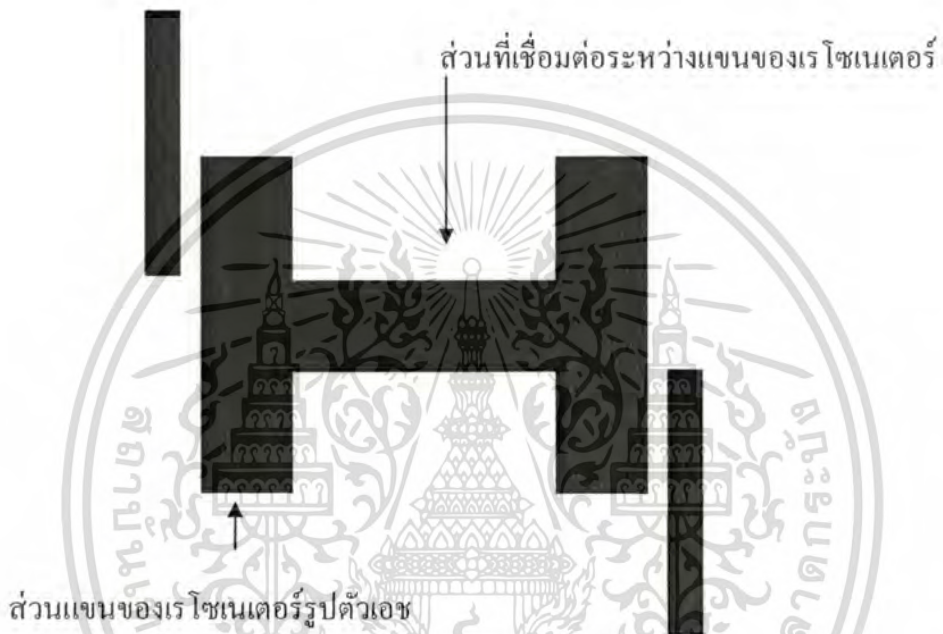
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 โครงสร้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดียว

ลักษณะโครงสร้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปรูปร่างตัวเอชจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ 2 ส่วน คือ

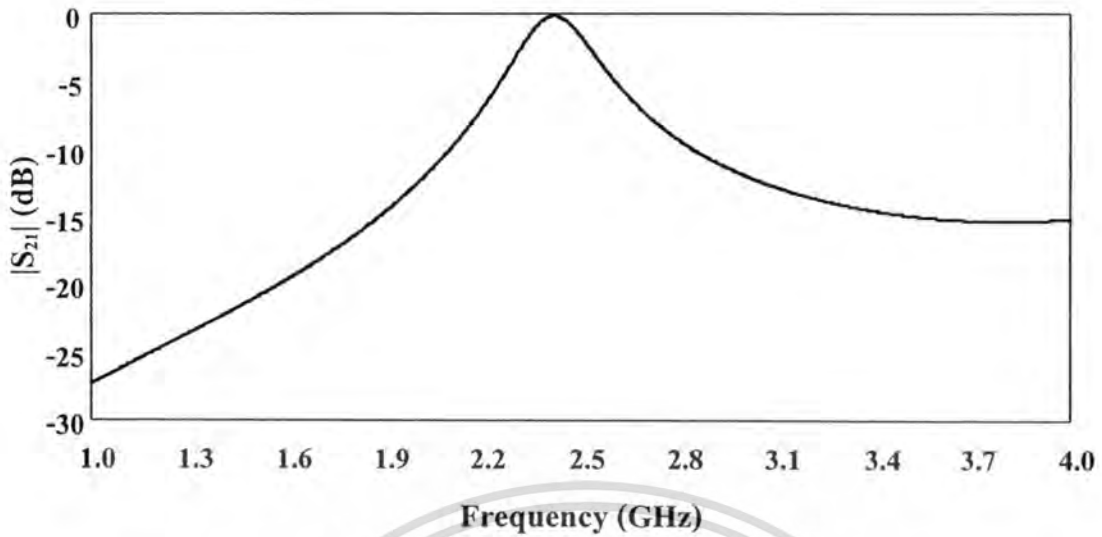
1. เรโซเนเตอร์ส่วนที่เป็นแขนของเรโซเนเตอร์รูปร่างตัวเอช
2. เรโซเนเตอร์ส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างแขนของเรโซเนเตอร์

ซึ่งโครงสร้างเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปรูปร่างตัวเอช สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปรูปร่างตัวเอช

จากรูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปรูปร่างตัวเอช ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วนด้วยกันคือ เรโซเนเตอร์ส่วนแขนของเรโซเนเตอร์รูปร่างตัวเอช และ เรโซเนเตอร์ส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างแขนของเรโซเนเตอร์รูปร่างตัวเอช ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่เดียว ที่มีการตอบสนองต่อแถบความถี่ 2.4 GHz โดย ผลตอบสนองทางความถี่ของเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปรูปร่างตัวเอชแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่ง พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้สำหรับการออกแบบจะมีการกล่าวไว้ในบทต่อไป



รูปที่ 3.2 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{21}|$ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยว

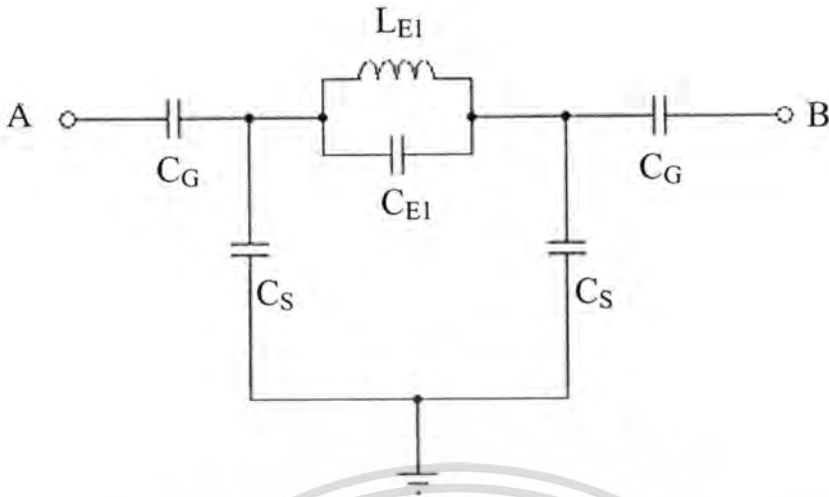
ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช

3.2.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยว

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาขั้นต้นของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช เพื่อทำการจำลองผลวงจรสมมูลของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวโดยทำการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าไม่ได้เป็นการวิเคราะห์ห้อย่างเต็มรูปแบบแต่จะเป็นการจำลองด้วยโปรแกรมดังกล่าวข้างต้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความสอดคล้องของการตอบสนองทางความถี่ระหว่างโครงสร้างของเรโซเนเตอร์ที่อยู่บนสายนำสัญญาณชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชกับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่ได้ทำการจำลองขึ้น

จากหัวข้อที่ 3.2.1 องค์ประกอบหลัก 2 ส่วนของเรโซเนเตอร์รูปตัวเอชนั้นจะประกอบด้วยเรโซเนเตอร์ส่วนที่เป็นแขนของเรโซเนเตอร์รูปตัวเอช และ ส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างแขนของเรโซเนเตอร์รูปตัวเอช วงจรสมมูลของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชจะประกอบไปด้วยค่าคือ คาปาซิเตอร์ (C_C) แทนระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนกับเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว อินดักเตอร์ (L_{E1}) คือ ส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างแขนของเรโซเนเตอร์รูปตัวเอช คาปาซิเตอร์ (C_{E1}) คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่คัปปลิงระหว่างแขนของเรโซเนเตอร์ และคาปาซิเตอร์ (C_S) เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแผ่นตัวนำระหว่างสตริป และระนาบกราวด์แพลน ซึ่งวงจรสมมูลดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช

3.3 การจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช เพื่อศึกษาแนวโน้มความสอดคล้องในการตอบสนองทางความถี่ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว

โดยพารามิเตอร์ที่ทำการจำลองคือ $|S_{21}|$ ที่ตอบสนอง ณ แถบความถี่ 2.4 GHz โดยมีความถี่ปฏิบัติการกลางที่ 2.442 GHz ค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวจะถูกกำหนดขึ้นมา และจะใช้โปรแกรมจำลอง CST Microwave Studio ช่วยในการปรับค่าที่เหมาะสมและแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความสอดคล้องระหว่างเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปตัวเอชกับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์รูปตัวเอช โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

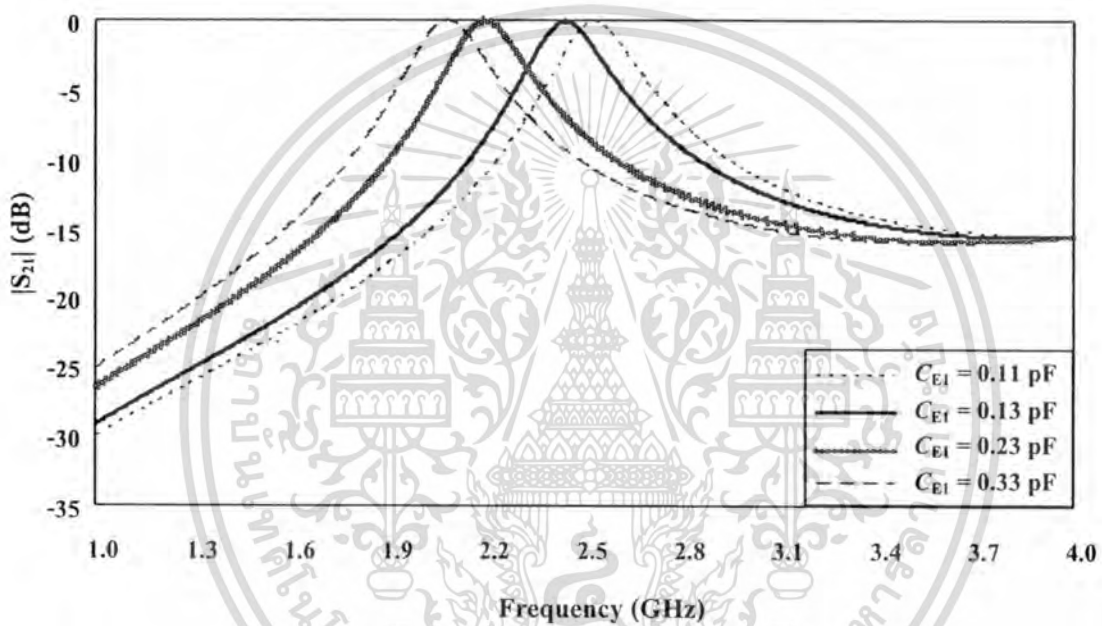
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยว

พารามิเตอร์	ค่าทางไฟฟ้า
C_{EI}	0.1 pF
L_{EI}	0.1 μ H
C_G	0.1 pF
C_S	0.01 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของ เรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช

ในขั้นแรกเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช เพื่อตอบสนองในย่านแถบความถี่ 2.4 GHz โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 pF ผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช เทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GHz – 4 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ C_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช

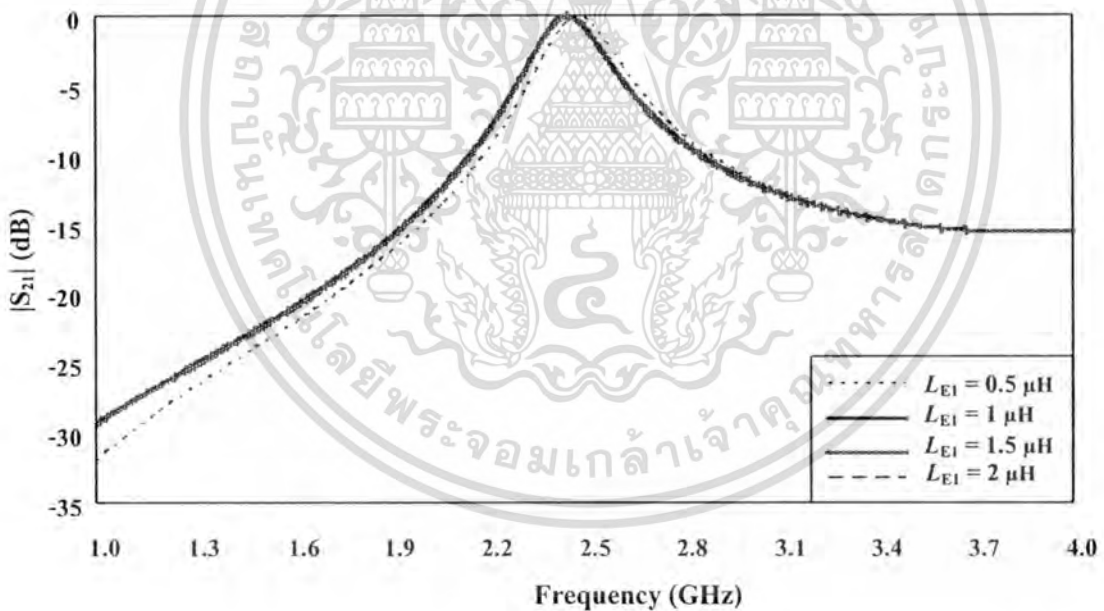
จากรูปที่ 3.4 พบว่าการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ C_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ C_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของค่าพารามิเตอร์ C_{E1} ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่ต่ำกว่า และจากผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชที่ได้จากการจำลองค่าพารามิเตอร์ค่าพารามิเตอร์ C_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชที่เหมาะสมกับการรองรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานในแถบความถี่เดียวจะมีค่าเท่ากับ 0.13 pF และจะใช้ค่าที่ได้นี้ในการจำลองต่อไปเพื่อศึกษาแนวโน้มความสอดคล้องในการตอบสนองทางความถี่ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช

3.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช เพื่อตอบสนองในย่านแถบความถี่ 2.4 GHz โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 μH และทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ C_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอชให้มีค่าเท่ากับ 0.13 pF ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.1 ผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอชเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GHz – 4 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



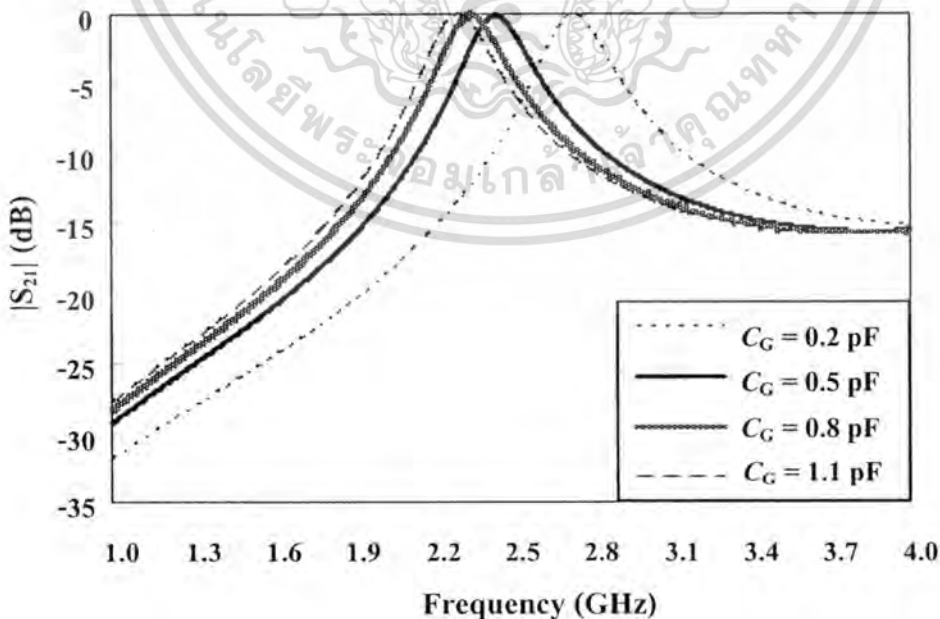
รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ L_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช

จากรูปที่ 3.5 พบว่าการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ L_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ เพียงเล็กน้อยยกเว้นคือเมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ L_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของค่าพารามิเตอร์ L_{E1} ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองจะแคบลงและแบนด์วิดท์จะแคบลง ซึ่งหมายความว่าถ้าต้องการให้มีการนำพาไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่ต่ำกว่า แต่มีความแตกต่างในการตอบสนองทางความถี่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อพารามิเตอร์ L_{E1} มีค่าเพิ่มมากขึ้นผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปตัวเอชที่ได้จากการจำลองค่าพารามิเตอร์ L_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปตัวเอชที่เหมาะสมกับการรองรับการใช้งานในแถบความถี่เดียวจะมีค่าเท่ากับ $1 \mu\text{H}$ และจะใช้ค่าที่ได้นี้ในการจำลองผลต่อไปเพื่อศึกษาแนวโน้มความสอดคล้องในการตอบสนองทางความถี่ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปตัวเอช

3.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_G ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปตัวเอช

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_G ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปตัวเอช เพื่อตอบสนองในย่านแถบความถี่ 2.4 GHz โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 pF และทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ L_{E1} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปตัวเอชให้มีค่าเท่ากับ $1 \mu\text{H}$ ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.2 ผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_G ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปตัวเอช เทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ $1 \text{ GHz} - 4 \text{ GHz}$ แสดงได้ดังรูปที่ 3.6

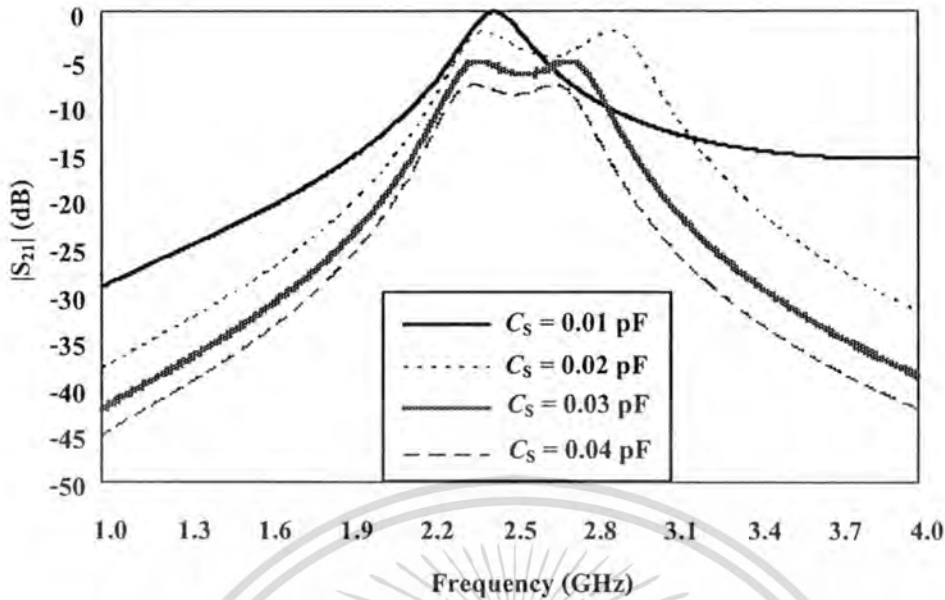


รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ C_G ของเอกสารนี้เป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปตัวเอช ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 พบว่าการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ C_0 ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ C_0 ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของค่าพารามิเตอร์ C_0 ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่ต่ำกว่า และจากผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_0 ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอชที่ได้จากการจำลองค่าพารามิเตอร์ค่าพารามิเตอร์ C_0 ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอชที่เหมาะสมกับการรองรับการใช้งานในแถบความถี่เดี่ยวจะมีค่าเท่ากับ 0.5 pF และจะใช้ค่าที่ได้นี้ในการจำลองต่อไปเพื่อศึกษาแนวโน้มความสอดคล้องในการตอบสนองทางความถี่ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช

3.3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_5 ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_5 ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช เพื่อตอบสนองในย่านแถบความถี่ 2.4 GHz โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.01 pF และทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ C_5 ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอชให้มีค่าเท่ากับ 0.5 pF ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.3 ผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_5 ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช เทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GHz – 4 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ C_s ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปด์วอเอช

จากรูปที่ 3.7 พบว่าการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ C_s ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปด์วอเอช จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ C_s ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปด์วอเอช โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของค่าพารามิเตอร์ C_s ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่ต่ำกว่า และจากผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_s ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปด์วอเอชที่ได้จากการจำลองค่าพารามิเตอร์ค่าพารามิเตอร์ C_s ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปด์วอเอชที่เหมาะสมกับการรองรับการใช้งานในแถบความถี่เดี่ยวจะมีค่าเท่ากับ 0.02 pF และจะใช้ค่าที่ได้นี้ในการจำลองต่อไปเพื่อศึกษาแนวโน้มความสอดคล้องในการตอบสนองทางความถี่ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปด์วอเอช

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองเพื่อศึกษาแนวโน้มความสอดคล้องในการตอบสนองทางความถี่ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช

พารามิเตอร์	ค่าจากการจำลอง
C_{E1}	0.13 pF
L_{E1}	1 μ H
C_G	0.5 pF
C_S	0.02 pF

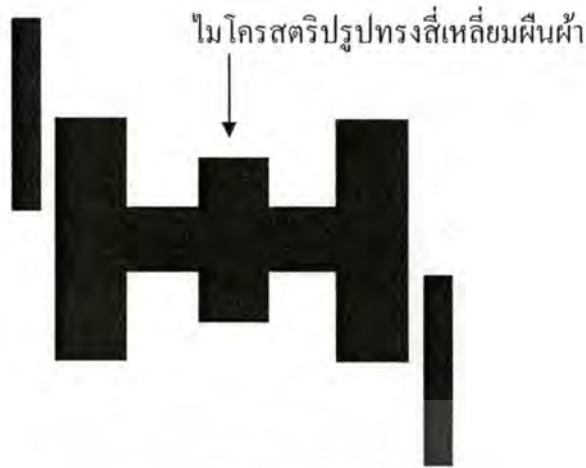
3.4 รูปแบบของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอโครงสร้างในการปรับปรุงคุณลักษณะของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชเพื่อให้รองรับกับการเกิดของแถบความถี่คู่เพื่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สาย

โดยพารามิเตอร์ที่ทำการจำลองผลคือ $|S_{21}|$ ที่ตอบสนอง ณ แถบความถี่ 5.2 GHz โดยมีความถี่ปฏิบัติการที่ 5.25 GHz ในการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่นั้นจะใช้โปรแกรมจำลองแบบ CST Microwave Studio ช่วยในการปรับค่าที่เหมาะสมและแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความสอดคล้องระหว่างเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปรูปตัวเอชกับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์รูปตัวเอช โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

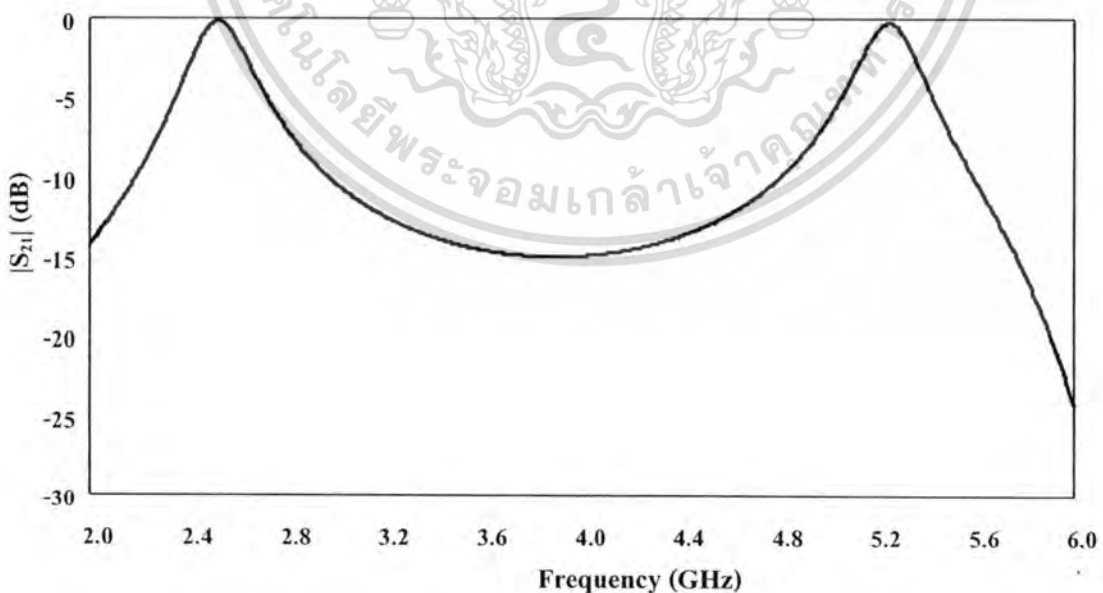
3.4.1 โครงสร้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

ลักษณะโครงสร้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช จะเป็นการปรับปรุงคุณลักษณะของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว โดยการเพิ่มไมโครสตริปรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเข้าไปในไมโครสตริปรูปตัวเอชเพื่อให้รองรับกับการเกิดของแถบความถี่คู่ ลักษณะโครงสร้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โครงสร้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช

จากรูปที่ 3.8 แสดง โครงสร้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณลักษณะของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวให้สามารถรองรับกับการเกิดของแถบความถี่คู่ โดยมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานคือ 2.4-2.4835 GHz และ 5.150-5.350 GHz ซึ่งผลการตอบสนองทางความถี่ของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอชสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยพิจารณาจากค่า $|S_{21}|$ เป็นสำคัญ ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้สำหรับการออกแบบจะมีการกล่าวไว้ในบทต่อไป

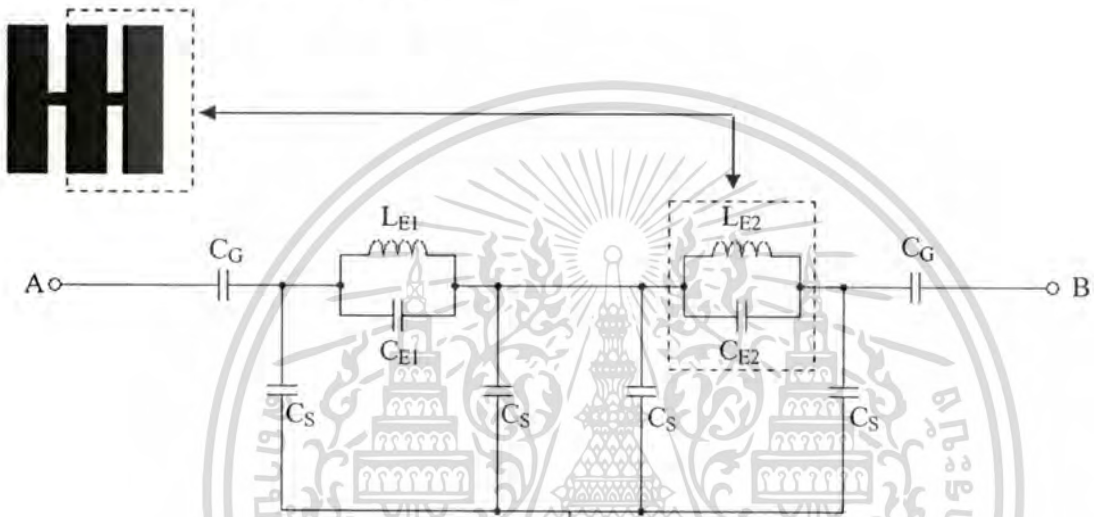


รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{21}|$ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

ในการศึกษาวงจรสมมูลของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ นั้น จากสมมุติฐานเมื่อเราทำการเพิ่มเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปรีสท์เหลี่ยมผืนผ้าเข้าไปในเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรีสท์ตัวเอชแล้ว ความน่าจะเป็นของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ คือ ส่วนประกอบทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่จะประกอบด้วย อินดักเตอร์ (L_{E2}) คือ ส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างแขนของเรโซเนเตอร์รูปตัวเอช คาปาซิเตอร์ (C_{E2}) คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่คัปปลิงระหว่างแขนของเรโซเนเตอร์อินดักเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

จากสมมุติฐานข้างต้น ในการได้มาของวงจรสมมูลของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ นั้น เราจะทำการพิสูจน์สมมุติฐานข้างต้น โดยการจำลองการตอบสนองทางความถี่ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ ด้วยโปรแกรมจำลอง CST Microwave Studio โดยจะพิจารณาจากค่า $|S_{21}|$ เป็นสำคัญ

3.5 การจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรีสท์ตัวเอช

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรีสท์ตัวเอช เพื่อศึกษาแนวโน้มความสอดคล้องในการตอบสนองทางความถี่ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ สำหรับการจำลองผลของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ นั้น เริ่มจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว ได้จากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3 ส่วนค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ จะคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไมวากรณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวเป็นหลัก ซึ่งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่แสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่

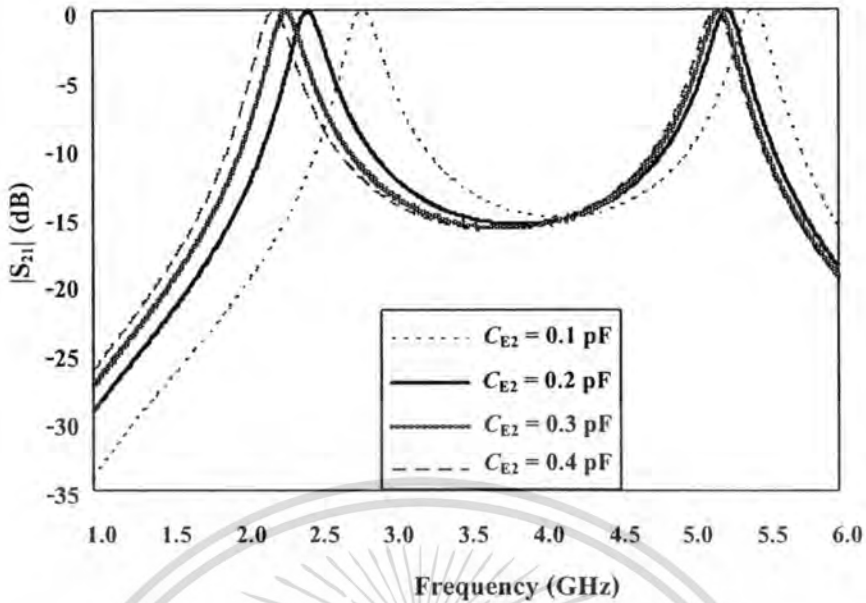
พารามิเตอร์	ค่าจากการจำลอง
C_{E1}	0.13 pF
L_{E1}	1 μ H
C_G	0.5 pF
C_S	0.02 pF
C_{E2}	0.13 pF
L_{E2}	0.1 μ H

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ เพื่อศึกษาแนวโน้มและความสอดคล้องในการตอบสนองทางความถี่ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่เพื่อให้ตอบสนอง ณ แถบความถี่ที่ต้องการคือ 5.2 GHz

3.5.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{E2} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของ

เรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{E2} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช เพื่อตอบสนองในย่านแถบความถี่ 5.2 GHz โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.13 pF ผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{E2} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอชเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GHz – 6 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 3.11



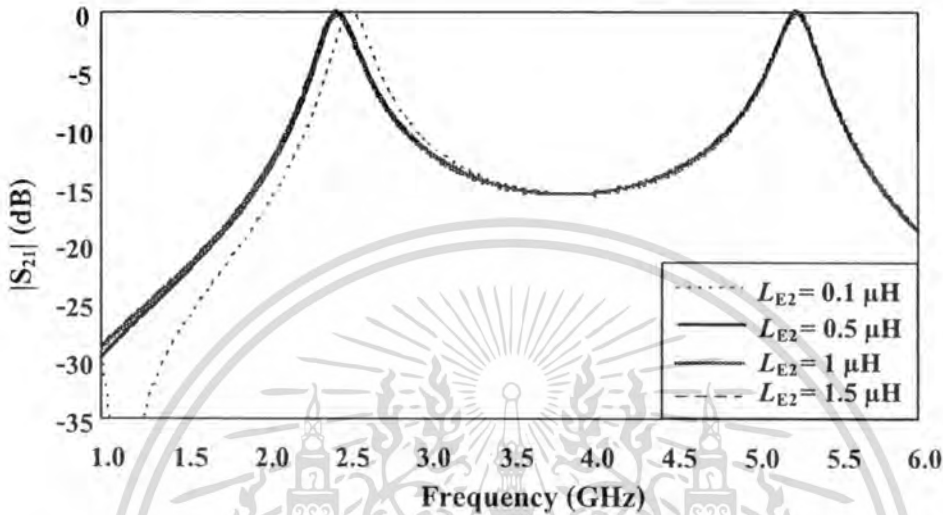
รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ C_{E2} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช

จากรูปที่ 3.11 พบว่าการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ C_{E2} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ C_{E2} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของค่าพารามิเตอร์ C_{E2} ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่ต่ำกว่า และจากผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{E2} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอชที่ได้จากการจำลอง ค่าพารามิเตอร์ C_{E2} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอชที่เหมาะสมกับการรองรับการใช้งานในแถบความถี่คู่ จะมีค่าเท่ากับ 0.2 pF และจะใช้ค่าที่ได้นี้ในการจำลองต่อไปเพื่อศึกษาแนวโน้มความสอดคล้องในการตอบสนองทางความถี่ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช

3.5.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{E2} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{E2} ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอช เพื่อตอบสนอง ณ แถบความถี่ 5.2 GHz โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 μH และทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ C_{E2} ของการคำนวณโดยอิงตามสมการ (3.1) และ (3.2) ให้เท่ากับ 0.2 pF และทำการจำลองเพื่อศึกษาแนวโน้มความสอดคล้องในการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชให้มีค่าเท่ากับ 0.2 pF ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.5.1 ผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{E2} ของวงจรมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ $1 \text{ GHz} - 6 \text{ GHz}$ แสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ L_{E2} ของวงจรมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช

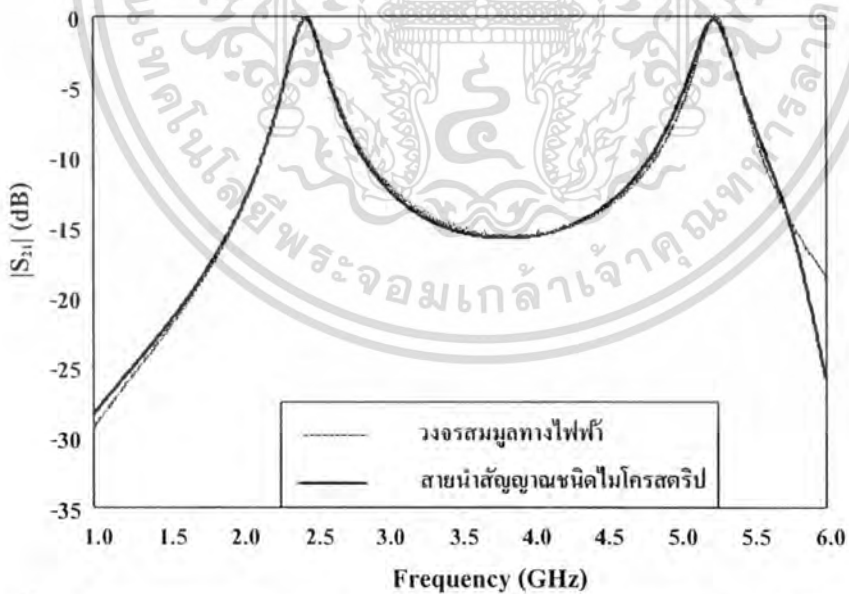
จากรูปที่ 3.12 พบว่าการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ L_{E2} ของวงจรมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ เพียงเล็กน้อยเท่านั้น กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ L_{E2} ของวงจรมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของค่าพารามิเตอร์ L_{E2} ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่ต่ำกว่า แต่มีความแตกต่างในการตอบสนองทางความถี่เพียงเล็กน้อยเท่านั้นและเมื่อพารามิเตอร์ L_{E2} มีค่าเพิ่มมากขึ้นผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{E2} ของวงจรมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชที่ได้จากการจำลองค่าพารามิเตอร์ L_{E2} ของวงจรมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชที่เหมาะสมกับการรองรับการใช้งานในแถบความถี่คู่จะมีค่าเท่ากับ $0.5 \text{ } \mu\text{H}$ และจะใช้ค่าที่ได้นี้ในการจำลองผลต่อไปเพื่อศึกษาแนวโน้มความสอดคล้องในการตอบสนองทางความถี่ของวงจรมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช

จากการจำลองเพื่อศึกษาวงจรมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรมูลทางไฟฟ้า ดังแสดงได้ในตารางที่ 3.4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงกว้างไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่

พารามิเตอร์	ค่าจากการจำลอง
C_{E1}	0.13 pF
L_{E1}	1 μ H
L_E	0.115 μ H
C_G	0.5 pF
C_S	0.02 pF
C_{E2}	0.2 pF
L_{E2}	0.5 μ H

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่ จะแสดงให้เห็นแนวโน้มความสอดคล้องของผลการตอบสนองทางความถี่ของการนำโครงสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่ที่มีโครงสร้างบนสายนำสัญญาณชนิดไมโครสตริปมาทำการจำลองเป็นรูปแบบของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.13 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต



รูปที่ 3.13 ผลการจำลองเปรียบเทียบผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{21}|$ ที่ได้จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวกรองผ่านแถบความถี่และตัวกรองผ่านแถบความถี่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 สรุป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอรูปแบบโครงสร้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ ชนิดไมโครสตริปตัวเอช ที่มีการตอบสนองในช่วงแถบความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz โดยความยาวของเรโซเนเตอร์จะมีความยาวเป็นครึ่งเท่าของความยาวคลื่นของความถี่ตอบสนองหรือ $\lambda_g / 2$ (Half-wave length)

โดยมีการจำลองของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่เพื่อศึกษาผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าว่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการตอบสนองทางความถี่ของเรโซเนเตอร์แถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอชมากเพียงใด เพื่อจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาและพัฒนางานวิจัยในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริป

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะแสดงการจำลองวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริป สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สาย ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11b/g และ 802.11a โดยมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานคือ 2.4-2.4835 GHz และ 5.150-5.350 GHz ตามลำดับและทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสม โดยการใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ช่วยในการปรับค่าที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการสร้างวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่

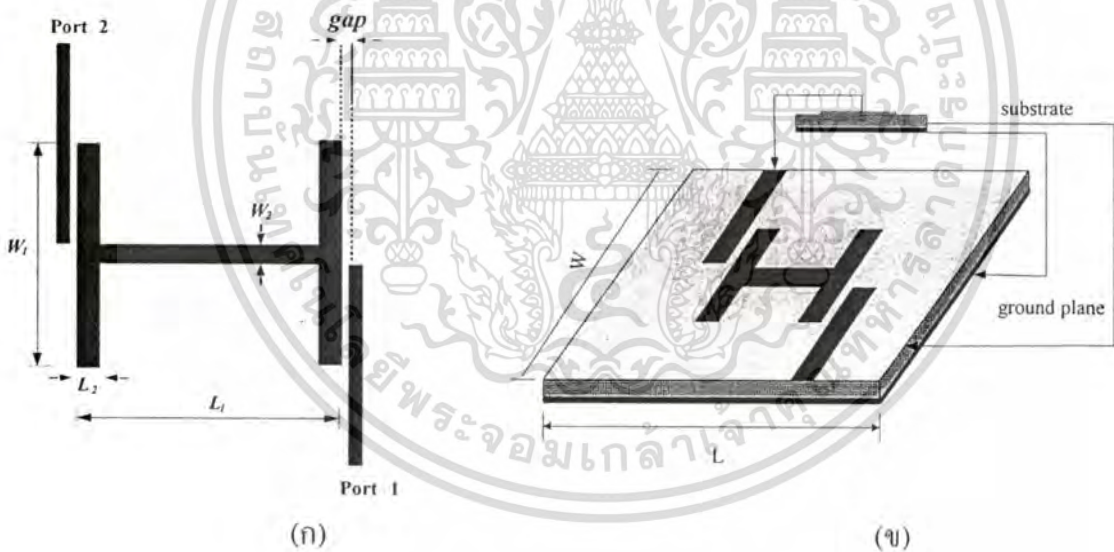
โดยพารามิเตอร์ที่ทำการจำลองนั้นมีอยู่ 2 พารามิเตอร์ คือ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก $|S_{21}|$ และ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับหรือ $|S_{11}|$ ที่ตอบสนองต่อแถบความถี่ที่ต้องการคือ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ซึ่งในการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่นั้นจะนำไปใช้ในการสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบต่อไป โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

ความถี่กลาง	2.442 GHz และ 5.250 GHz
แบนด์วิดท์ที่ -3 dB	100 MHz และ 200 MHz
ค่าการสูญเสียของช่วงความถี่ผ่าน	ไม่เกิน -3 dB
ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	50 โอห์ม
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11})	-15 dB

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้สร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบนั้น สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่เพื่อให้ตอบสนอง ณ แถบความถี่ที่ต้องการคือ 2.4 GHz และ 5.2 GHz ในขั้นแรกเป็นการจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยว เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ โดยเป็นการปรับปรุงคุณลักษณะของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวข้างต้น เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ สำหรับสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบต่อไป

4.2 การจำลองผลของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช เพื่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สาย โดยตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวที่ได้นำเสนอใช้งาน ณ คลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz ซึ่งเป็นความถี่ย่านไมโครเวฟ ลักษณะโครงสร้างและรูปเสมือนของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้สร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ เริ่มจากการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่จากบทความที่มีมาก่อน [17] มาเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการพิจารณา แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 รูปแบบของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวมีขนาดเท่ากับ 30 X 30 mm โดยวัสดุฐานรองใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด Duroid ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.2 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์เท่ากับ 0.001 และมีความหนาเท่ากับ 3 mm ขนาดความกว้างของเรโซเนเตอร์รูปตัวเอช จะอธิบายด้วยพารามิเตอร์ W_1 และขนาดความยาวของเรโซเนเตอร์รูปตัวเอชจะอธิบายด้วยพารามิเตอร์ L_1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยว

(ก) ขนาดของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยว (ข) ตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวบน
โครงสร้างไมโครสตริป

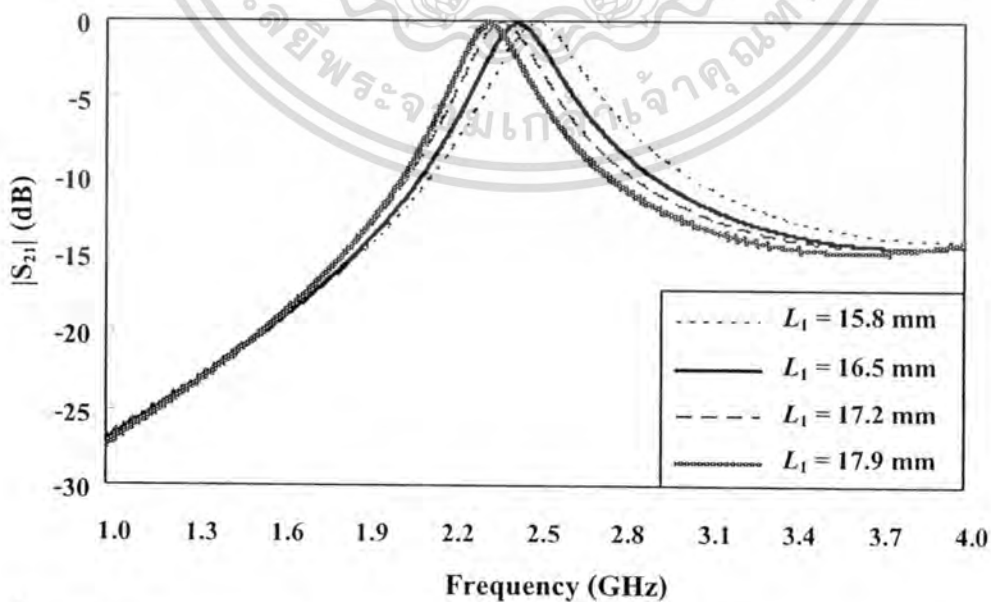
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยว

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (mm)
L_1	40
W_1	30
L_2	10
W_2	10

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้สร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่ต้นแบบสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวกรองผ่าน โดยพิจารณาค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก $|S_{21}|$ และ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับหรือ $|S_{11}|$ ที่ตอบสนองต่อแถบความถี่ที่ต้องการคือ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

4.2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (L_1)

ในขั้นตอนแรกเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (L_1) เพื่อตอบสนอง ณ แถบความถี่ 2.4 GHz โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 40 mm ผลของค่า $|S_{21}|$ และผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (L_1) เทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GHz – 4 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของเรโซเนเตอร์

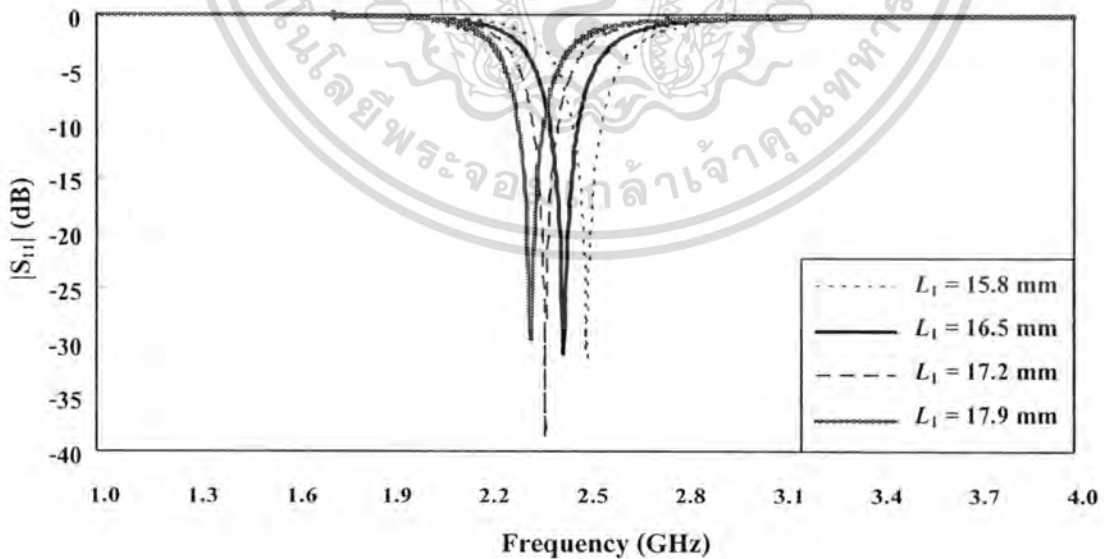
แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (L_1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เฉพาะการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (L_1) กับแบนด์วิดท์ของค่า $|S_{21}|$

ความยาว (mm)	15.8	16.5	17.2	17.9
แบนด์วิดท์ (MHz)	277	254	240	225

จากรูปที่ 4.2 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (L_1) จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเมื่อทำการลดค่าความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (L_1) โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของค่าความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (L_1) ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่สูงกว่า และจากผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (L_1) ที่ได้จากการจำลองค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (L_1) ที่เหมาะสมกับการรองรับการใช้งานในแถบความถี่เดี่ยวจะมีขนาดเท่ากับ 16.5 mm และจะใช้ค่าพารามิเตอร์ความยาว (L_1) ที่ได้นี้ในการจำลองต่อไป เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ความยาว (L_1) มีขนาดที่ไม่น้อยจนเกินไปจนไม่สามารถนำมาสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ได้ สำหรับแบนด์วิดท์ของค่า $|S_{21}|$ มีค่าประมาณ 254 MHz แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 และค่า $|S_{11}|$ ของค่าพารามิเตอร์ความยาว (L_1) ที่มีขนาดเท่ากับ 16.5 mm จะมีค่าสูงกว่า 15 dB สำหรับความถี่ย่าน 2.4 GHz ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ตามลำดับ

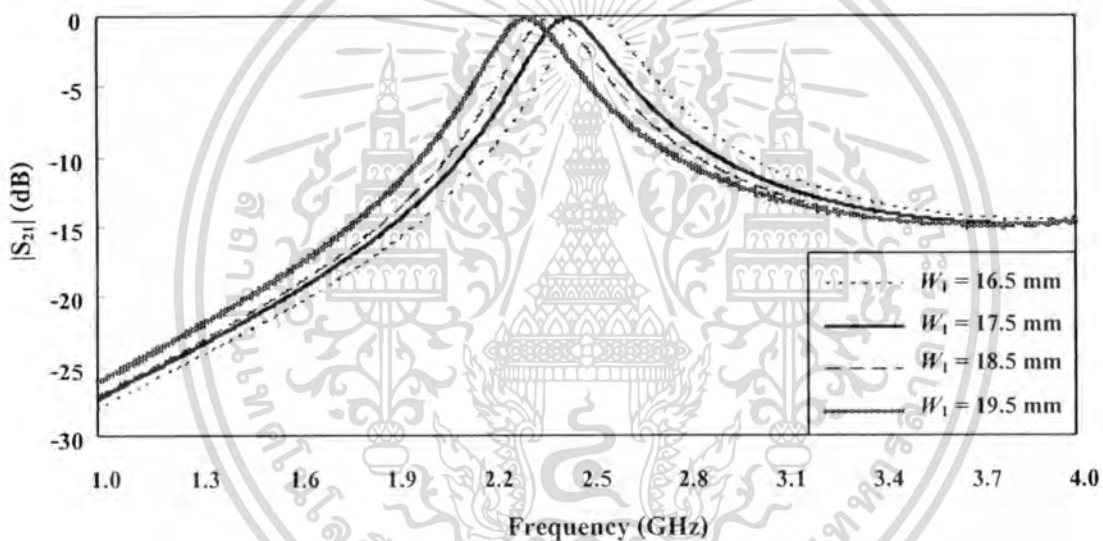


รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปร่างตัวเอช (L_1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่ เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (W_1)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (W_1) เพื่อตอบสนอง ณ แถบความถี่ 2.4 GHz โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 mm และทำการกำหนดความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (L_1) ให้มีค่าเท่ากับ 16.5 mm ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 4.2.1 ผลของค่า $|S_{21}|$ และผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GHz – 4 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



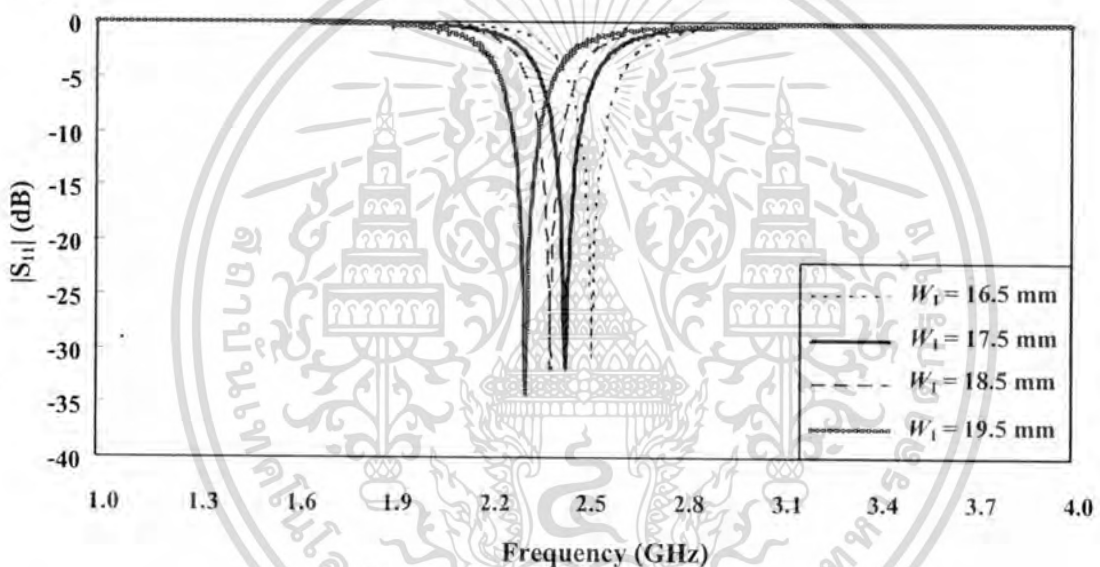
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (W_1)

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความกว้าง (W_1) ของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวกับแบนด์วิธของค่า $|S_{21}|$

ความยาว (mm)	16.5	17.5	18.5	19.5
แบนด์วิธ (MHz)	245	245	245	245

จากรูปที่ 4.4 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_1) จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเมื่อทำการลดค่าความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_1) โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของค่าความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_1) ไม่วากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่สูงกว่า และจากผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_1) ที่ได้จากการจำลอง ค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_1) ที่เหมาะสมกับการรองรับการใช้งานในแถบความถี่เดี่ยวจะมีขนาดเท่ากับ 17.5 mm และจะใช้ค่าพารามิเตอร์ความกว้าง (W_1) ที่ได้ในการจำลองต่อไป เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ความกว้าง (W_1) มีขนาดที่ไม่น้อยจนเกินไปจนไม่สามารถนำมาสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่ได้ สำหรับแบนด์วิดท์ของค่า $|S_{21}|$ มีค่าประมาณ 245 MHz แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และค่า $|S_{11}|$ ของค่าพารามิเตอร์ความกว้าง (W_1) ที่มีขนาดเท่ากับ 17.5 mm จะมีค่าสูงกว่า 15 dB สำหรับคลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5

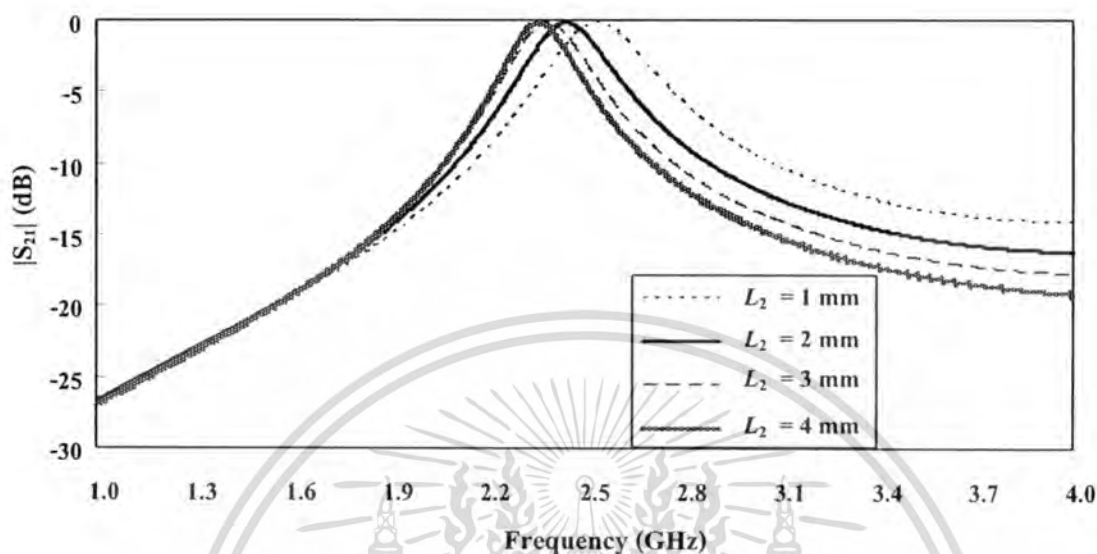


รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้าง (W_1) ของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช

4.2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (L_2)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช (L_2) เพื่อตอบสนอง ณ แถบความถี่ 2.4 GHz โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 10 mm และทำการกำหนดความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_1) ให้มีค่าเท่ากับ 17.5 mm ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 4.2.2 ผลของค่า $|S_{21}|$ และผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดเอกซาคอนนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครสตริปรีพัวเอช (L_2) เทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GHz – 4 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิดไมโครสตริปรีพัวเอช (L_2)

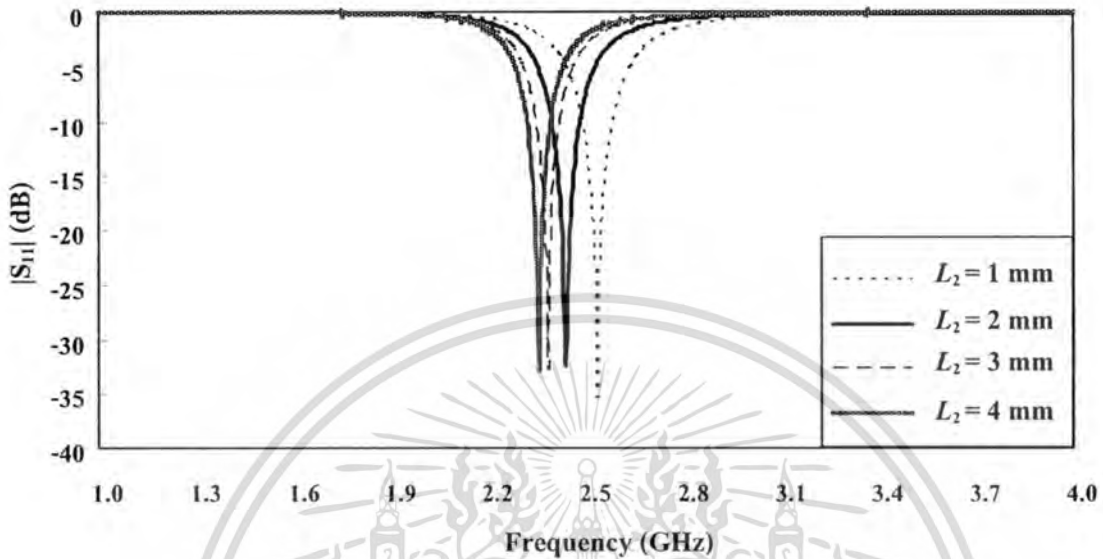
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียว (L_2) กับแบนด์วิดท์ของค่า $|S_{21}|$

ความยาว (mm)	1	2	3	4
แบนด์วิดท์ (MHz)	280	245	220	200

จากรูปที่ 4.6 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียว (L_2) จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเมื่อทำการลดค่าความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียว (L_2) โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของค่าความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียว (L_2) ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่สูงกว่า และจากผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียว (L_2) ที่ได้จากการจำลอง ค่าพารามิเตอร์ความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียว (L_2) ที่เหมาะสมกับการรองรับการใช้งานในแถบความถี่เดียวจะมีขนาดเท่ากับ 2 mm และจะใช้ค่าพารามิเตอร์ความยาว (L_2) ที่ได้นี้ในการจำลองผลต่อไป เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ความยาว (L_2) มีขนาดที่ไม่น้อยจนเกินไปจนไม่สามารถนำมาสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ได้ สำหรับแบนด์วิดท์ของค่า $|S_{21}|$ มีค่าประมาณ 245

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

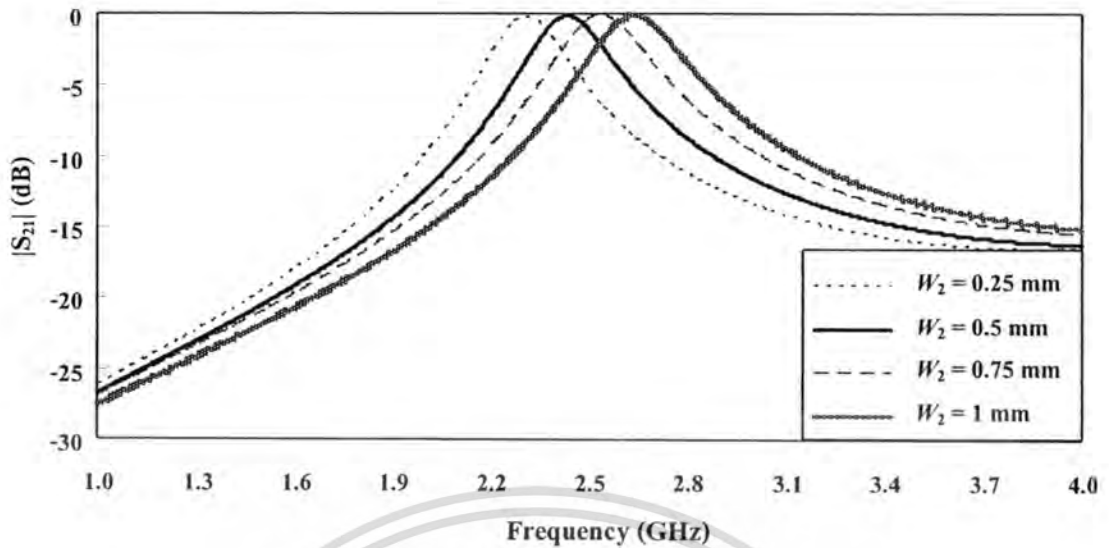
MHz แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 และค่า $|S_{11}|$ ของค่าพารามิเตอร์ความยาว (L_2) ที่มีขนาดเท่ากับ 2 mm จะมีค่าสูงกว่า 15 dB สำหรับคลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (L_2)

4.2.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (W_2)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (W_2) เพื่อตอบสนองในย่านแถบความถี่ 2.4 GHz โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 10 mm และทำการกำหนดความยาวของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (L_2) ให้มีค่าเท่ากับ 2 mm ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 4.2.3 ผลของค่า $|S_{21}|$ และผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (W_2) เทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GHz – 4 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



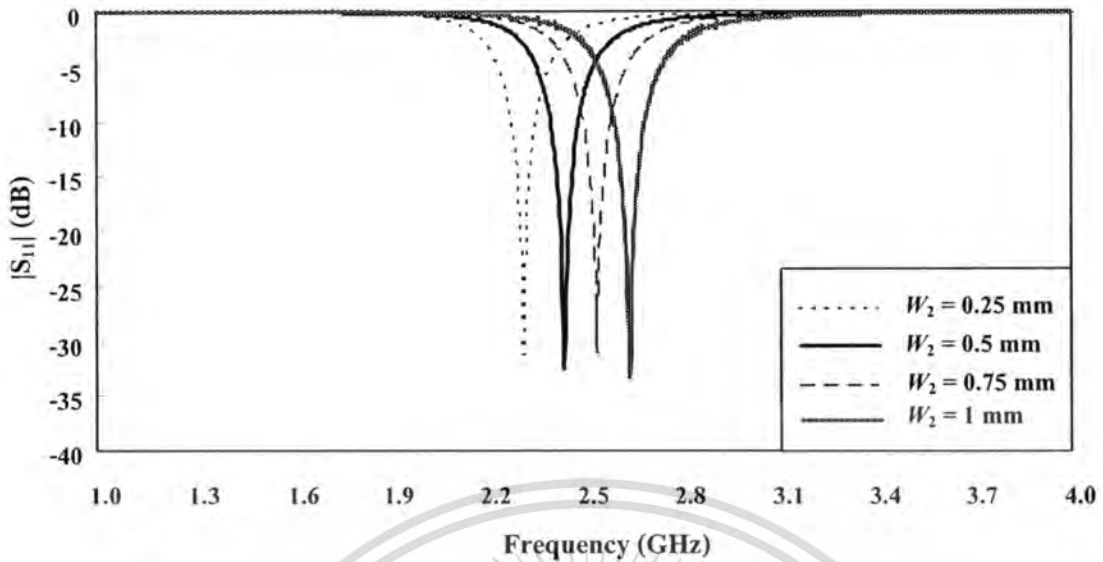
รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรีปตัวเอช

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_2) กับแบนด์วิดธ์ของค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก

ความยาว (mm)	0.25	0.5	0.75	1
แบนด์วิดธ์ (MHz)	229	250	265	275

จากรูปที่ 4.8 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_2) จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเมื่อทำการลดค่าความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_2) โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของค่าความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_2) ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่สูงกว่า และจากผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_2) ที่ได้จากการจำลอง ค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_2) ที่เหมาะสมกับการรองรับการใช้งานในแถบความถี่เดี่ยวจะมีขนาดเท่ากับ 0.5 mm และจะใช้ค่าพารามิเตอร์ความกว้าง (W_2) ที่ได้นี้ในการจำลองต่อไป เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ความกว้าง (W_2) มีขนาดที่ไม่น้อยจนเกินไป จนไม่สามารถนำมาสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ได้ สำหรับแบนด์วิดธ์ของค่า $|S_{21}|$ มีค่าประมาณ 250 MHz แสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และค่า $|S_{21}|$ ของค่าพารามิเตอร์ความยาว (W_2) ที่มีขนาดเท่ากับ 0.5 mm จะมีค่าสูงกว่า 15 dB สำหรับคลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9

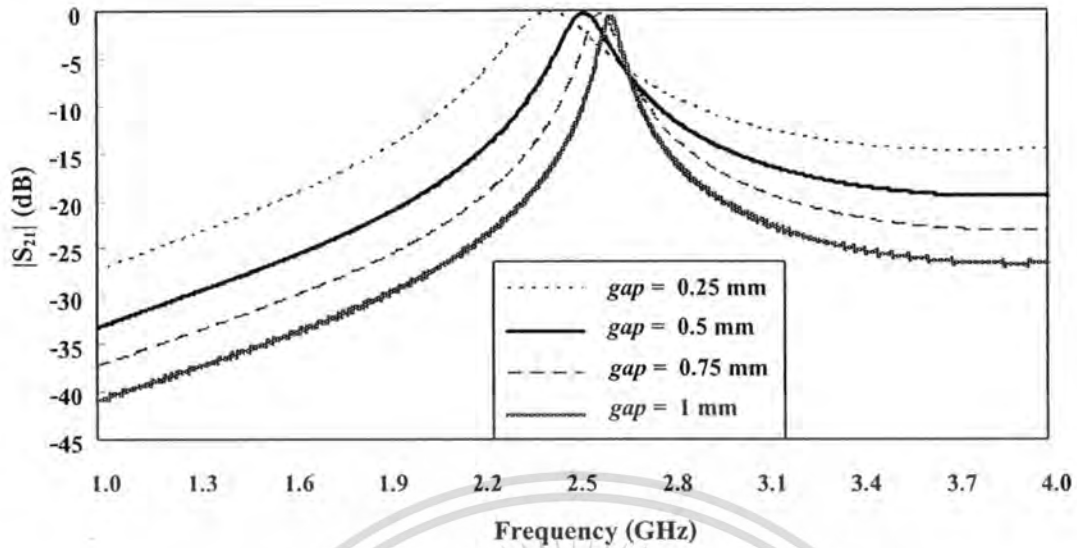
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช

4.2.5 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนกับเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช (*gap*)

ในขั้นตอนสุดท้ายของการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอช คือทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนกับเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว เพื่อตอบสนองในย่านแถบความถี่ 2.4 GHz โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.25 mm และทำการกำหนดขนาดความกว้างของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว (W_2) ให้มีค่าเท่ากับ 0.25 mm ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 4.2.4 ผลของค่า $|S_{21}|$ และผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนกับเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปตัวเอชเทียบกับช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GHz – 4 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณ ป้อนกับตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวชนิด ไมโครสตริปตัวเอช

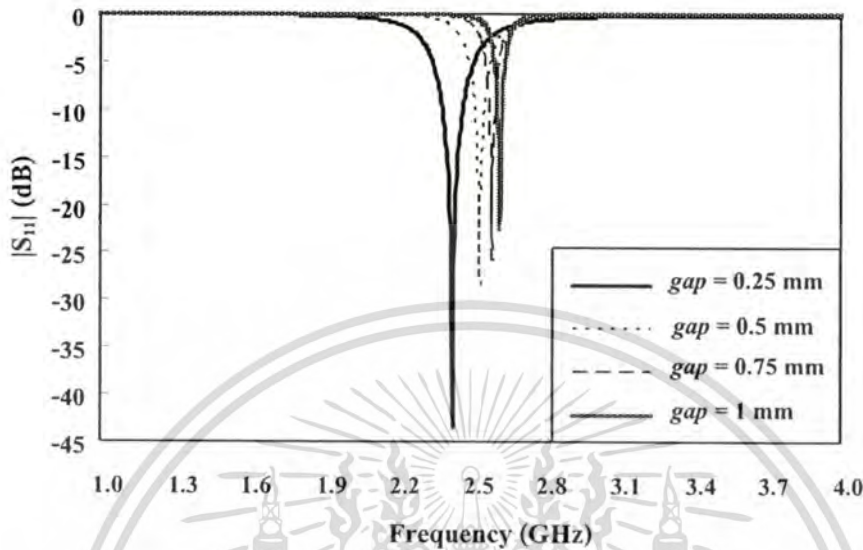
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนของเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวกับแบนด์วิดท์ของค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก

gap (mm)	0.25	0.5	0.75	1
แบนด์วิดท์ (MHz)	240	140	95	65

จากรูปที่ 4.10 พบว่าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนกับเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวชนิด ไมโครสตริปตัวเอช จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเมื่อทำการเพิ่มค่าระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนกับของเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยว โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนกับเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวชนิด ไมโครสตริปตัวเอช ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่สูงกว่า และจากผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนกับเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวที่ได้จากการจำลอง ค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนกับเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวที่เหมาะสมกับการรองรับการใช้งานในแถบความถี่เดี่ยวจะมีขนาดเท่ากับ 0.25 mm และจะใช้ค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนกับเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวที่ได้นี้ในการจำลองต่อไป เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนกับเรโซเนเตอร์ แถบความถี่เดี่ยวมีขนาดที่ไม่น้อยจนเกินไปจนไม่สามารถนำมาสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่เดี่ยวได้ สำหรับแบนด์วิดท์ของค่า $|S_{21}|$ มีค่าประมาณ 240 MHz แสดงได้ดังตารางที่ 4.6 และค่า $|S_{11}|$ ของค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณ

เอเอสอาร์เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในเชิงพาณิชย์ การนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวที่มีขนาดเท่ากับ 0.25 mm จะมีค่าสูงกว่า 15 dB สำหรับคลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณป้อนกับ เรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียวชนิด ไมโครสตริปรูปตัวเอช

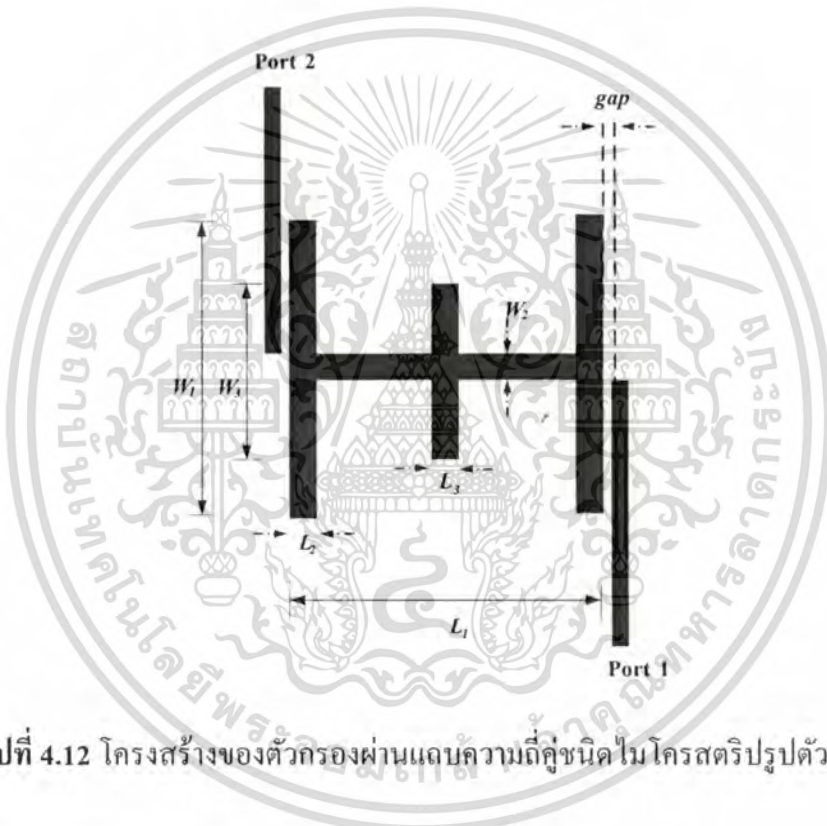
ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดียว

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (mm)
L_1	16.5
W_1	17.5
L_2	2
W_2	0.5
gap	0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การจำลองของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอการปรับปรุงคุณลักษณะของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอชเพื่อให้รองรับกับการเกิดของแถบความถี่คู่ ในบริเวณแถบความถี่ที่ต้องการเพื่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สาย โดยตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ที่ได้นำเสนอนี้ใช้งานในย่านความถี่ 5.2 GHz ซึ่งเป็นความถี่ย่านไมโครเวฟ โดยการปรับปรุงคุณลักษณะของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวนั้นจะเป็นการเพิ่มไมโครสตริปรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเข้าไปในไมโครสตริปรูปตัวเอชเพื่อให้รองรับกับการเกิดของแถบความถี่คู่ ลักษณะโครงสร้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่แสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 โครงสร้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปรูปตัวเอช

สำหรับการจำลองของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่นั้น เริ่มจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยว ได้จากการพิจารณาในหัวข้อที่ 4.2 ส่วนค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ จะกำหนดให้ขนาดของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่มิมีขนาดเล็กที่สุด โดยคำนึงถึงขนาดของเรโซเนเตอร์แถบความถี่เดี่ยวเป็นหลัก ซึ่งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่แสดงได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

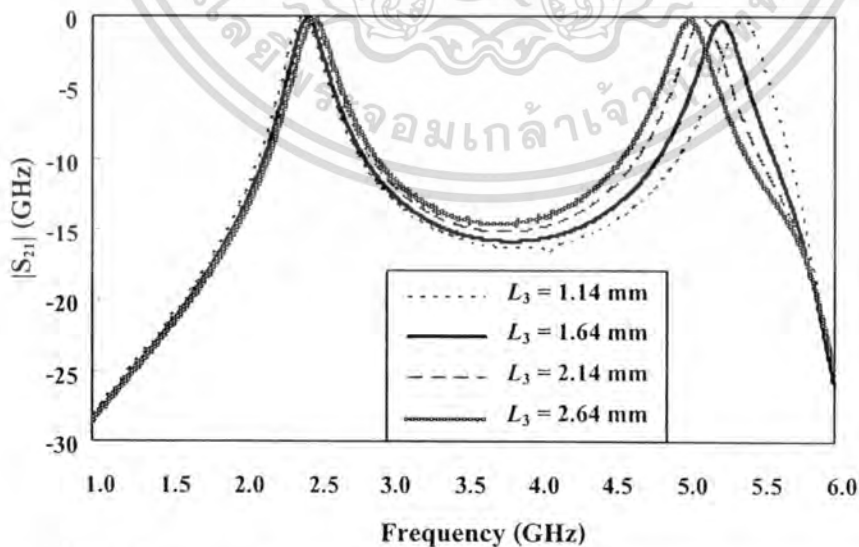
พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (mm)
L_1	16.5
W_1	17.5
L_2	2
W_2	0.5
gap	0.25
L_3	16.5
W_3	0.5

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้สร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ ต้นแบบสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่เพื่อให้ตอบสนองสำหรับแถบความถี่ที่ต้องการคือ 5.2 GHz

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

(L_3)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ (L_3) โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.25 mm ผลของค่า $|S_{21}|$ และ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ แสดงได้ดังรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ



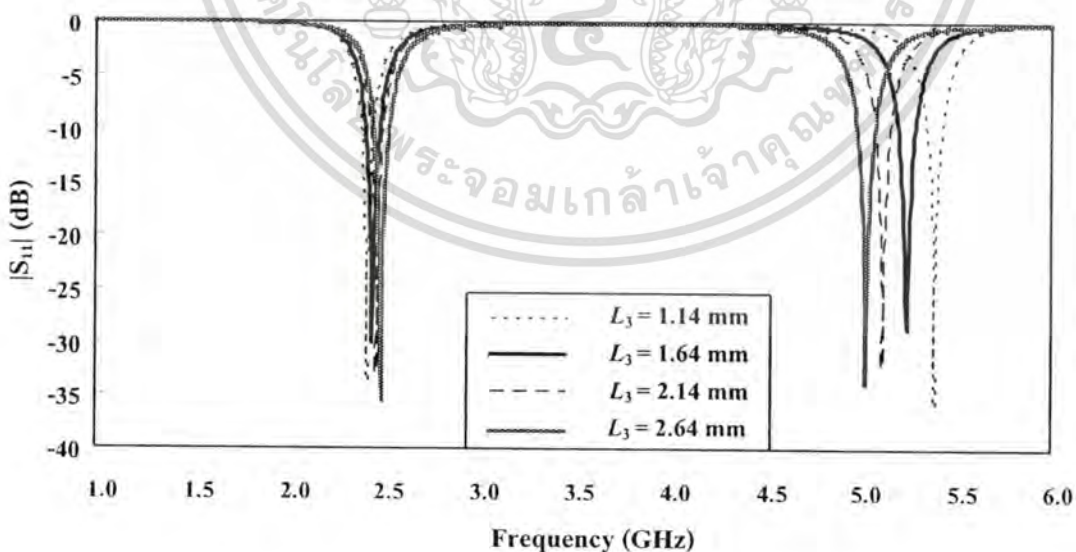
รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ (L_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่ (L_3) กับแบนด์วิดท์ของค่า $|S_{21}|$

ความยาว (L_3)	1.14	1.64	2.14	2.64
แบนด์วิดท์ (MHz)	261	261	264	272

จากรูปที่ 4.13 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่ จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเมื่อทำการเพิ่มความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่ โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่ ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่ต่ำกว่า และจากผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่ที่ได้จากการจำลอง ค่าพารามิเตอร์ความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่ที่เหมาะสมกับการรองรับการใช้งานในแถบความถี่จะมีขนาดเท่ากับ 1.64 mm และจะใช้ค่าพารามิเตอร์ความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่ที่ได้นี้ ในการจำลองต่อไป เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่มีขนาดที่ไม่น้อยจนเกินไปจนไม่สามารถนำมาสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่ได้ สำหรับแบนด์วิดท์ของค่า $|S_{21}|$ มีค่าประมาณ 261 MHz แสดงได้ดังตารางที่ 4.9 ซึ่งมีแบนด์วิดท์ที่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ใช้งานคือ 5.150-5.350 GHz และค่า $|S_{11}|$ ของค่าพารามิเตอร์ความยาวดังกล่าวจะมีค่าสูงกว่า 15 dB สำหรับความถี่ย่าน 5.2 GHz ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 ตามลำดับ

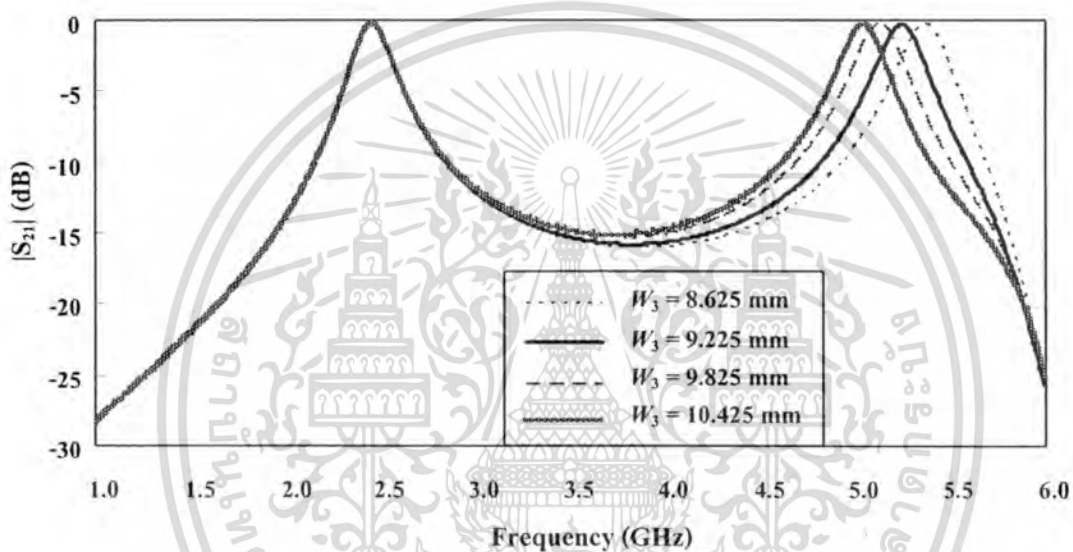


รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่ (L_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ (W_3)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ (W_3) เพื่อตอบสนอง ณ แถบความถี่ 5.2 GHz โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 16.5 mm และทำการกำหนดขนาดความยาวของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ (L_3) ให้มีค่าเท่ากับ 1.64 mm ซึ่งได้ผลมาจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 4.3.1 ผลของค่า $|S_{21}|$ และผลของค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่แสดงได้ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



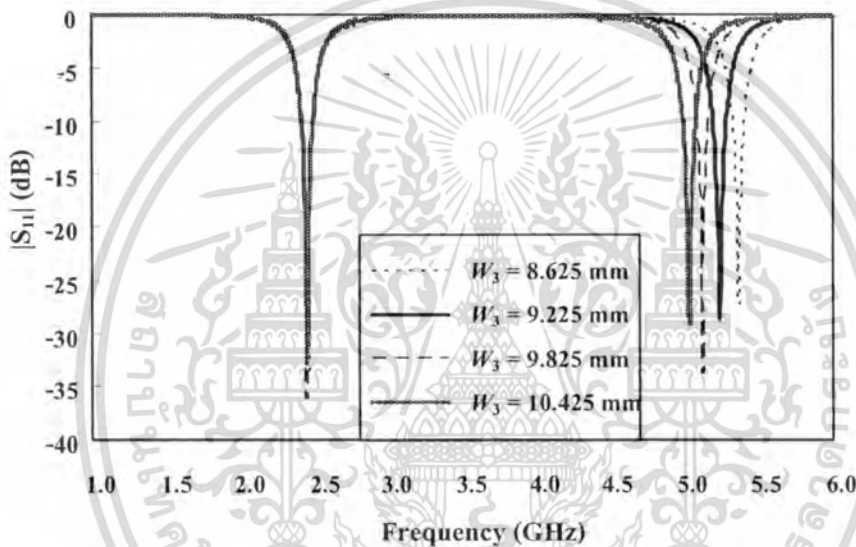
รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

ตารางที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ (W_3) กับแบนด์วิดธ์ของค่า $|S_{21}|$

ความกว้าง (mm)	8.625	9.225	9.825	10.425
แบนด์วิดธ์ (MHz)	268	263	262	253

จากรูปที่ 4.15 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ (W_3) จะมีผลกระทบต่อค่า $|S_{21}|$ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเมื่อทำการลดค่าความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ (W_3) โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นของความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ (W_3) ผลลัพธ์ในการตอบสนองทางความถี่จะตอบสนองต่อคลื่นย่านความถี่ที่สูงกว่า และจากผลของค่า $|S_{21}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ (W_3) ที่ได้จากการจำลองการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่ที่เหมาะสมกับการรองรับการใช้งานในแถบความถี่ (W_3) จะมีขนาดเท่ากับ 9.225 mm และจะใช้ค่าพารามิเตอร์ความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่ (W_3) ที่ได้นี้ ในการจำลองผลต่อไป เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่ (W_3) มีขนาดที่ไม่น้อยจนเกินไปจนไม่สามารถนำมาสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่ได้ สำหรับแบนด์วิดธ์ของค่า $|S_{21}|$ มีค่าประมาณ 9.225 MHz แสดงได้ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งมีแบนด์วิดธ์ที่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ใช้งานคือ 5.150-5.350 GHz และค่า $|S_{11}|$ ของค่าพารามิเตอร์ความกว้างดังกล่าวจะมีค่าสูงกว่า 15 dB สำหรับคลื่นความถี่ย่าน 5.2 GHz ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองความถี่ค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่

จากการจำลองของตัวกรองผ่านแถบความถี่จะได้อ่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวกรองผ่าน ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองของตัวกรองผ่านจะนำไปพิจารณาในขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (mm)
L_1	16.5
W_1	17.5
L_2	2
W_2	0.5
gap	0.25
L_3	1.64
W_3	9.225

4.4 การศึกษาลักษณะการเชื่อมต่อของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษารูปแบบของการเชื่อมต่อเรโซเนเตอร์ ซึ่งลักษณะการเชื่อมต่อของเรโซเนเตอร์มีหลากหลายรูปแบบ เช่น การเชื่อมต่อแบบลักษณะลำดับ หรือ การเชื่อมต่อแบบไขว้ ซึ่งลักษณะของการเชื่อมต่อแบบต่างๆ จะทำให้ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรองความถี่ผ่านมีการตอบสนองทางความถี่ที่ใกล้เคียงกับในทางทฤษฎีมากขึ้น ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลตอบสนองทางความถี่ของเรโซเนเตอร์ ซึ่งมีลักษณะการเชื่อมต่อของเรโซเนเตอร์ในลักษณะลำดับ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบและปรับปรุงพัฒนาสำหรับงานวิจัยในอนาคต

4.4.1 ขั้นตอนการหาค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกและค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อโดยการคำนวณ

จากพารามิเตอร์ข้อ 4.1 นำมาหาค่าองค์ประกอบวงจรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับวงจรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ ที่ใช้ในการออกแบบวงจรองความถี่ผ่าน คือ

4.4.1.1 ตัวประกอบคุณภาพภายนอก

เป็นพารามิเตอร์ในการบอกตำแหน่งระยะห่างของส่วนป้อนอินพุตและเอาต์พุตของเรโซเนเตอร์ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.38) จากค่าพารามิเตอร์ในหัวข้อที่ 4.1 จะได้ค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกทั้งอินพุตและเอาต์พุตดังนี้

$$\epsilon = 1 / \sqrt{10^{\frac{L_R}{10}} - 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = \sinh \left[\frac{1}{n} \sinh^{-1} \frac{1}{\varepsilon} \right]$$

$$FBW = BW / f_o$$

$$g_0 = 1 \quad g_1 = \frac{2}{\gamma} \sin(\pi/2n)$$

$$g_1 g_2 = \frac{4 \sin[\pi(2i-1)/2n] \sin[\pi(2i-3)/2n]}{\gamma^2 + \sin^2[\pi(i-1)/n]} \quad \text{เมื่อ } i = m = n/2$$

หาค่าแอดมิตแดนซ์ (J_m)

$$S = \left[\sqrt{1 + \varepsilon^2 + \varepsilon} \right]^2$$

$$J_1 = 1/\sqrt{S}$$

ค่าเริ่มต้น $J_0 = 0$: $J_1 = \frac{J_1}{1 + J_1 J_0}$ และจะได้ $J_0 = \frac{-J_1}{(\Omega_o g_1)^2 J_1}$

จากค่าพารามิเตอร์ในหัวข้อที่ 4.1 จะได้ค่าองค์ประกอบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบที่ได้จากการคำนวณดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าองค์ประกอบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบที่ได้จากการคำนวณ

	FBW	g_0	g_1	J_0	J_1
ค่าที่ได้จากการคำนวณ	3.44%	1	0.9790	1.5229	0.0284

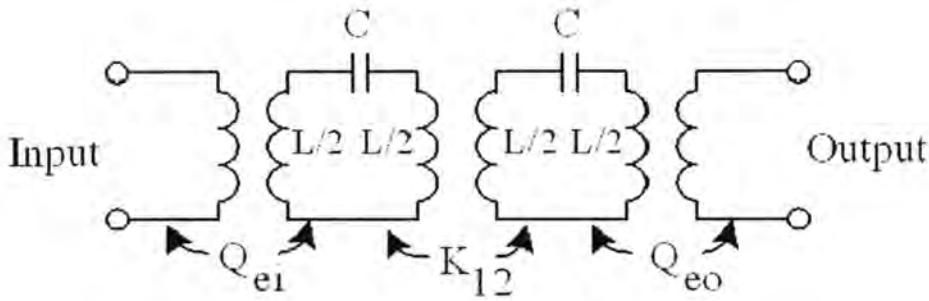
4.4.1.2 สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ

เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดระยะห่างระหว่างเรโซเนเตอร์แต่ละตัว สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.44) จากค่าพารามิเตอร์ในหัวข้อ 4.1 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อของแต่ละเรโซเนเตอร์ 1 ค่า เพราะมีเรโซเนเตอร์อยู่ 2 ตัว แต่เนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์ 1 กับ 2 มีการกำหนดรูปแบบการเชื่อมต่อที่เหมือนกันจึงมีค่าเท่ากันดังตารางที่ 4.12 วงจรสมมูลและโครงสร้างการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18

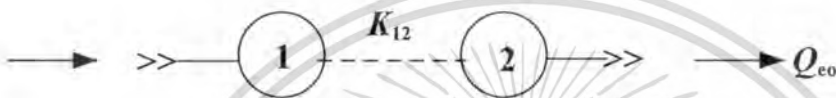
$$Q_{ci} = Q_{co} = \frac{g_0 g_1}{FBW}$$

$$K_{12} = \frac{FBW}{\sqrt{g_0 g_1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 วงจรสมมูลของวงจรกรองผ่านแถบโดยวิธีการเชื่อมต่อแบบ 2 โพล



รูปที่ 4.18 โครงสร้างการเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อของแต่ละเรโซเนเตอร์จากการคำนวณ

	$Q_{ei} = Q_{eo}$	K_{12}
ค่าที่ได้จากการคำนวณ	28.45	0.0347

4.4.2 ขั้นตอนการหาค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกและค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio

หลังจากได้ทำการออกแบบตัวเรโซเนเตอร์และคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบเรียบร้อยแล้วขั้นต่อมาก็คือ การหาตำแหน่งการวางพอร์ตอินพุตและพอร์ตเอาต์พุตของวงจรกรองและระยะห่างระหว่างเรโซเนเตอร์ ซึ่งใช้โปรแกรม CST Microwave Studio มาช่วยพิจารณา ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

4.4.2.1 ขั้นตอนการหาค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก

จากโครงสร้างตัวเรโซเนเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าตรงกับที่คำนวณโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ช่วยในการหาค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ และค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก โดยค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกจะเป็นตัวบอกตำแหน่งของการวางพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตซึ่งการจัดวางพอร์ตสำหรับเรโซเนเตอร์ที่มีลักษณะเป็นระนาบมีวิธีการจัดรูปแบบอยู่ 2 ลักษณะ แสดงดังรูปที่ 4.19 โดยรูปคือการวางพอร์ตแบบคัปเปิ้ลไลน์ (Coupled Line) ส่วนแบบอื่นเป็นการวางแนวการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

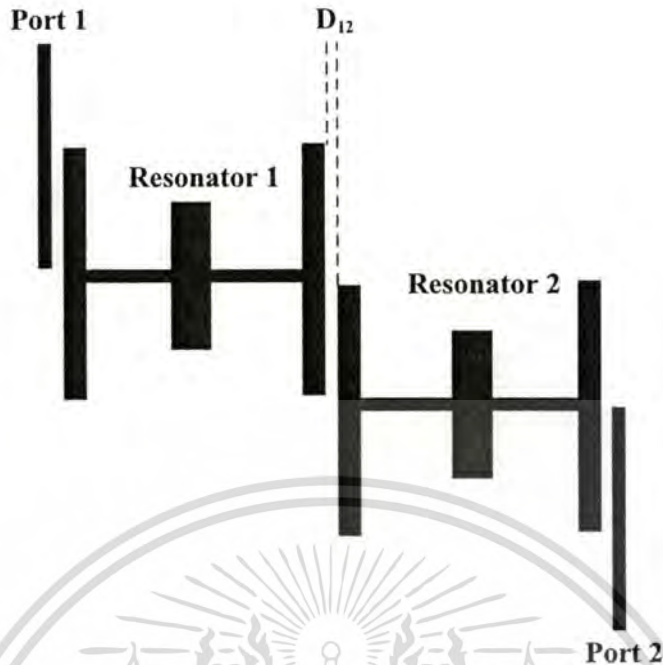
พอร์ดแบบแท็บไลน์ (Tapped Line) ซึ่งแต่ละแบบจะมีคุณลักษณะการเชื่อมต่อที่แตกต่างกันออกไป แต่สิ่งที่สนใจ ณ ที่นี้คือค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก โดยรูป ก. จะขึ้นอยู่กับขนาดสายป้อน สัญญาณและระยะห่างระหว่างสายป้อนสัญญาณกับตัวเรโซเนเตอร์ปกติแล้วถ้าต้องการการเชื่อมต่อสูงจะต้องให้สายป้อนสัญญาณมีขนาดเล็กและระยะห่างที่สั้นลง ส่วนรูป ข. จะขึ้นกับระยะห่างระหว่างสายป้อนสัญญาณกับจุดกึ่งกลางของจุดเปิดของเรโซเนเตอร์ โดยปกติถ้าระยะห่างมีค่าน้อย จะมีการเชื่อมต่อที่สูง ในงานวิจัยนี้จะใช้การวางพอร์ดอินพุตและพอร์ดเอาต์พุตตามภาพที่ 4.19 ก.



รูปที่ 4.19 การเชื่อมต่อของสายป้อนสัญญาณ (ก) แบบคัปเปิลไลน์ (ข) แบบแท็บไลน์

4.4.2.2 ขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ

หลังจากที่ได้เรโซเนเตอร์ที่ตอบสนองตามความถี่ที่ออกแบบไว้รวมทั้งตำแหน่งของสายป้อนสัญญาณ ขั้นตอนต่อมาคือนำเรโซเนเตอร์ที่ได้มาทำการจัดรูปแบบการวางตัวของเรโซเนเตอร์ จากภาพที่ 4.20 สิ่งที่ต้องการหาคือระยะห่างระหว่างเรโซเนเตอร์แต่ละตัวในที่นี้คือ D_{12} เป็นระยะห่างระหว่างเรโซเนเตอร์ตัวที่ 1 กับตัวที่ 2 ซึ่งระยะห่างที่ต้องการจะมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์คือ M_{12} จะมีความสัมพันธ์ความสัมพันธ์กับ D_{12}

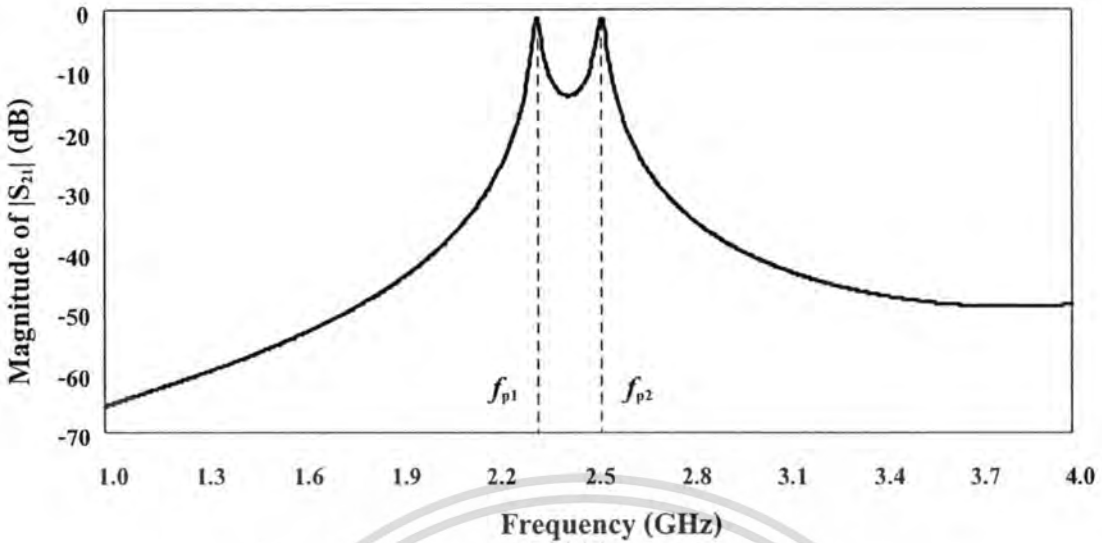


รูปที่ 4.20 รูปแบบการจัดวางตัวของเรโซเนเตอร์

ในการหาค่าระยะห่าง D จะขึ้นอยู่กับค่าของ f_{p1} และ f_{p2} ที่เปลี่ยนไป ซึ่งค่า f_{p1} และ f_{p2} ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์ สามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

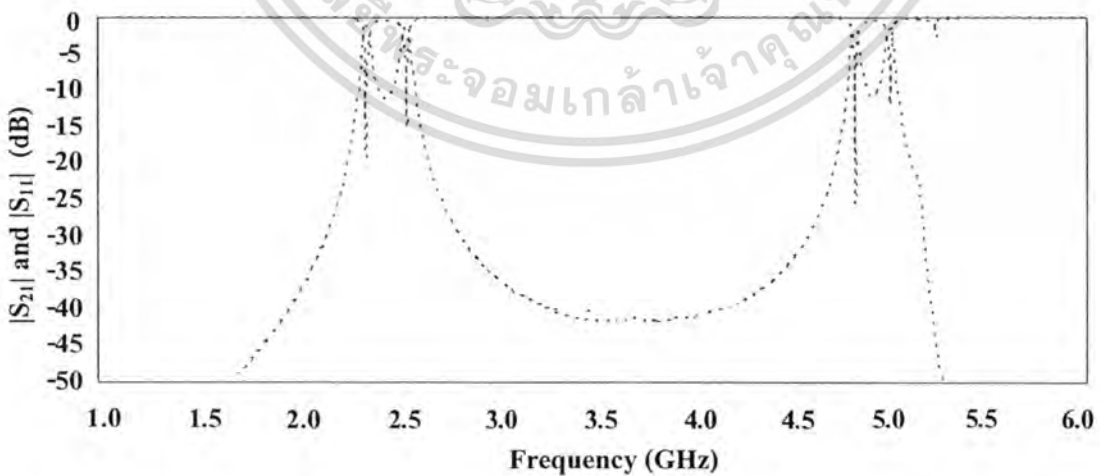
$$M_{ij} = \pm \frac{f_{p2}^2 - f_{p1}^2}{f_{p2}^2 + f_{p1}^2} \quad (3.1)$$

เมื่อ f_{p1} และ f_{p2} คือ ความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์ต่ำและเรโซแนนซ์สูงของการเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์จะมีทั้งหมด 1 ค่า คือระยะห่างระหว่างเรโซเนเตอร์ 1 กับ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์จะจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio มาแทนสมการที่ (3.1) โดยผลตอบสนองทางความถี่ของระยะห่างระหว่างเรโซเนเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองทางความถี่จากการจำลองหาค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ

จากผลการตอบสนองทางความถี่ โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ผลการตอบสนองทางความถี่ยังไม่สามารถตอบสนองทางความถี่ได้ตามคุณลักษณะที่ได้วางไว้ในตอนต้น ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.22 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก รูปแบบของเรโซเนเตอร์อาจไม่มีความเหมาะสมกับลักษณะการเชื่อมต่อแบบลำดับ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถเป็นแนวทางในการศึกษาและปรับปรุงพัฒนาเพิ่มเติมในอนาคต เกี่ยวกับรูปแบบของการเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์ เพื่อให้ได้ตามคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบต่อไป



รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองทางความถี่การออกแบบตัวกรองผ่าน

ที่มีลักษณะการเชื่อมต่อแบบลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการอธิบายถึงขั้นตอนในการจำลองของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่เพื่อศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ประโยชน์จากโปรแกรมวิเคราะห์คุณลักษณะค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกและค่าการสูญเสียย้อนกลับ โดยมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

ความถี่กลาง	2.442 GHz และ 5.250 GHz
แบนด์วิดท์ที่ -3 dB	100 MHz และ 200 MHz
ค่าการสูญเสียของช่วงความถี่ผ่าน	ไม่เกิน -3 dB
ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	50 โอห์ม
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11})	-15 dB

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว ดังนั้นเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลองโดยจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองนำไปสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบเพื่อนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 5

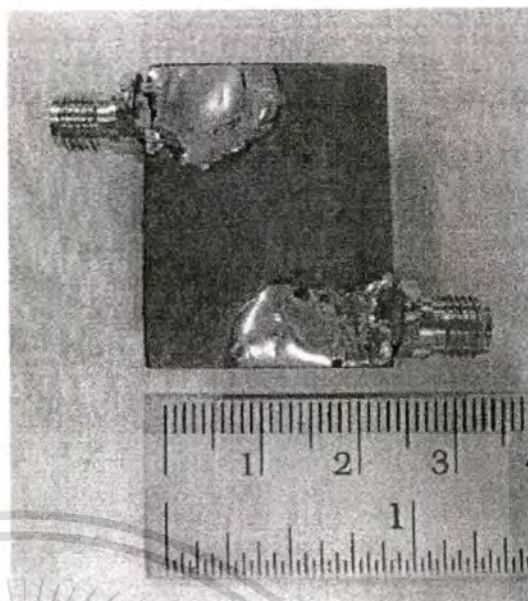
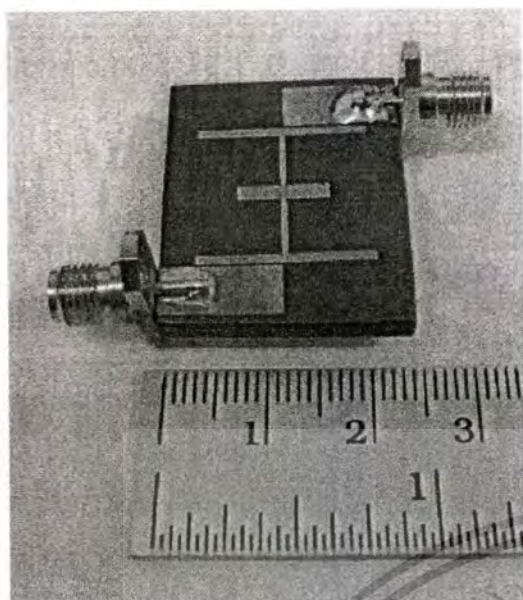
การทดสอบและผลการทดสอบ

5.1 บทนำ

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ห้ขนาดของตัวกรองผ่านแถบความถี่ที่เหมาะสมจากการจำลองในบทที่ 4 ทำให้จำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบตัวกรองผ่านแถบความถี่ เพื่อหาค่าผลตอบสนองทางความถี่ $|S_{21}|$ และ $|S_{11}|$ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบคุณลักษณะของตัวกรองผ่านแถบความถี่เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลที่ได้จากการจำลองว่ามี ความถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยตัวกรองผ่านแถบความถี่นี้จะทำที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.442 GHz และ 5.25 GHz โดยตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบมีแบนด์วิดธ์ครอบคลุมการใช้งานของระบบ การสื่อสารไร้สายช่วงความถี่ 2.4-2.4835 GHz และ 5.150-5.350 GHz ตามลำดับ

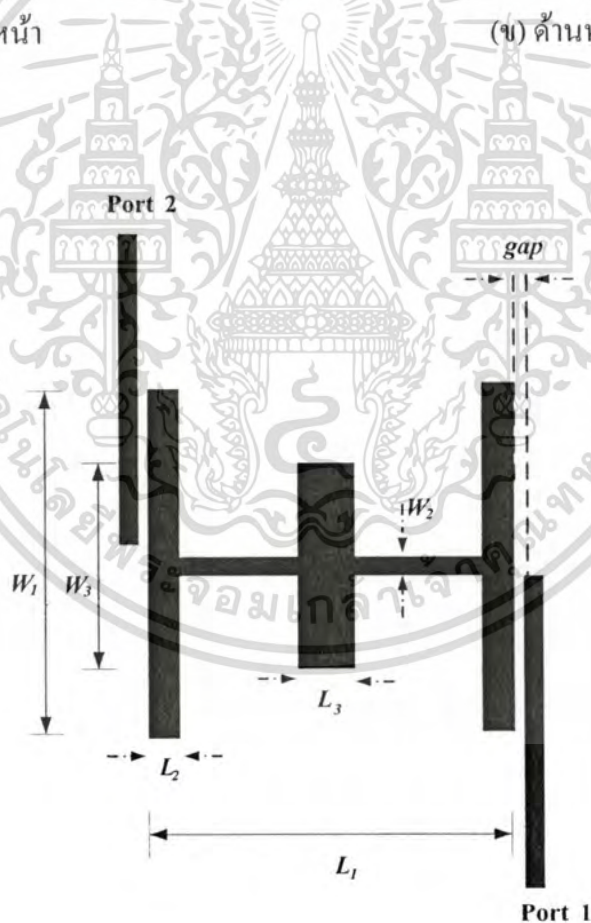
5.2 การสร้างและทดสอบคุณสมบัติตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิด ไมโครสตริปรีปตัวเอช เพื่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สาย ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11 และ 802.11a โดยตัวกรองผ่านแถบความถี่ที่ได้นำเสนอนี้ใช้งาน ณ คลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz และคลื่นความถี่ย่าน 5.2 GHz ซึ่งเป็นความถี่ย่านไมโครเวฟ โดยมีความถี่ปฏิบัติการกลางที่ความถี่ 2.442 GHz และ 5.25 GHz ตามลำดับ ลักษณะโครงสร้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ ตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 30 mm โดยวัสดุฐานรองใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด Duroid ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.2 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์เท่ากับ 0.001 และมีความหนาเท่ากับ 3 mm คอนเนกเตอร์ที่ใช้คือชนิด SMA โดยขนาดของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิด ไมโครสตริปต้นแบบที่สร้างขึ้นตามขนาดที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.1



(ก) ด้านหน้า

(ข) ด้านหลัง



(ค) ขนาดของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

รูปที่ 5.1 ลักษณะโครงสร้างของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

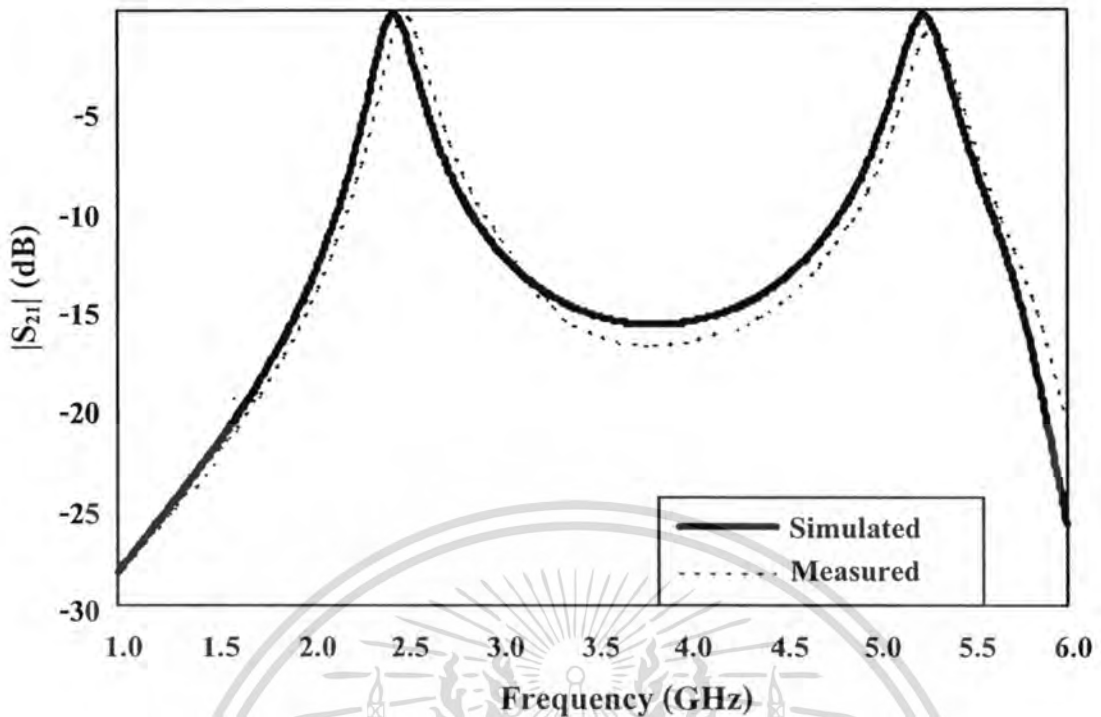
พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (mm)
L_1	16.5
W_1	17.5
L_2	2
W_2	0.5
gap	0.25
L_3	1.64
W_3	9.225

5.3 ผลการทดสอบของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่

เมื่อได้ทำการสร้างตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายเป็นที่เรียบร้อย จากนั้นเป็นการนำตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบมาทำการทดสอบแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยพารามิเตอร์ที่ทำการทดสอบนั้นมีอยู่ 2 พารามิเตอร์ คือ $|S_{21}|$ และ $|S_{11}|$

5.3.1 การทดสอบ $|S_{21}|$ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ

การทดสอบ $|S_{21}|$ ที่ได้จากตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ที่ความถี่ปฏิบัติการกลาง 2.442 GHz และ 5.25 GHz ตั้งแต่ย่านความถี่ 1 GHz ถึง 6 GHz แสดงดังรูปที่ 5.3

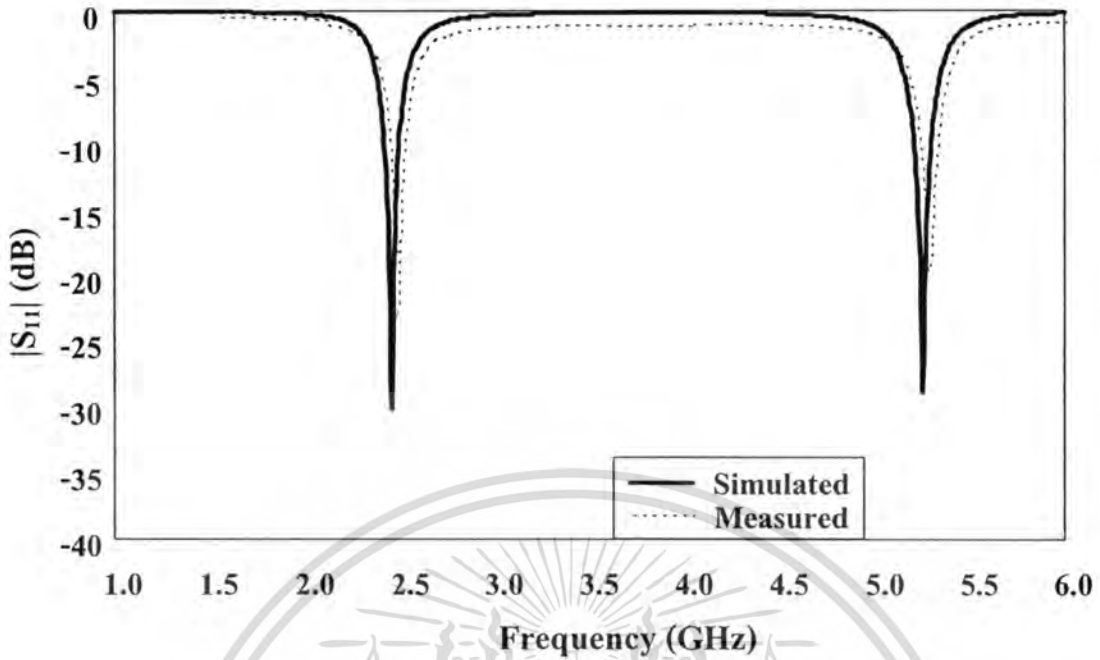


รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{21}|$ ที่ได้จากการจำลองและทดสอบของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ

จากรูปที่ 5.2 แสดงค่า $|S_{21}|$ ที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับกับผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ที่ความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 2.442 GHz ค่า $|S_{21}|$ จะมีค่าประมาณ -0.18 dB ซึ่งมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 228 MHz สำหรับค่า $|S_{21}|$ ที่ได้จากการทดสอบตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบจะมีค่าประมาณ -0.19 dB ซึ่งมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 175 MHz โดยมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 2.46 GHz ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ที่ความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 5.25 GHz ค่า $|S_{21}|$ จะมีค่าประมาณ -0.275 dB ซึ่งมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 263 MHz สำหรับค่า $|S_{21}|$ ที่ได้จากการทดสอบตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบจะมีค่าประมาณ -0.3 dB ซึ่งมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 215 MHz โดยมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 5.3 GHz

5.3.2 การทดสอบ $|S_{11}|$ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ

การทดสอบ $|S_{11}|$ ที่ได้จากตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.442 GHz และ 5.25 GHz ตั้งแต่อ่านความถี่ 1 GHz ถึง 6 GHz แสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการจำลองและทดสอบของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ

จากรูปที่ 5.3 แสดงค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ที่ความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 2.442 GHz ค่า $|S_{11}|$ จะมีค่าประมาณ -30 dB สำหรับค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบจะมีค่าประมาณ -24 dB โดยมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 2.46 GHz ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ที่ความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 5.25 GHz ค่า $|S_{11}|$ จะมีค่าประมาณ -28.468 dB สำหรับค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบจะมีค่าประมาณ -20 dB โดยมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 5.3 GHz

การเปรียบเทียบผลของการจำลองและการทดสอบของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริปตัวเอชสามารถสรุปและแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องระหว่างผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio และผลที่ได้จากการทดสอบของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

	ความถี่กลาง 2.442 GHz		ความถี่กลาง 5.25 GHz	
	การทดสอบ	การจำลอง	การทดสอบ	การจำลอง
$ S_{11} $ (dB)	-30	-24	-28.468	-20
$ S_{21} $ (dB)	-0.18	-0.19	-0.275	-0.3
แบนด์วิดท์ (MHz)	228	175	263	215

5.4 สรุป

สำหรับบทนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่สำหรับการประยุกต์ใช้งานในการสื่อสารไร้สายกับผลที่ได้จากการจำลองซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งคุณลักษณะของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ที่พิจารณาได้แก่ $|S_{21}|$ และ $|S_{11}|$ จากการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio พบว่าผลการทดสอบที่ได้จากตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบนั้นมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี กล่าวคือ เมื่อพิจารณาค่า $|S_{21}|$ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่จะมีค่าแบนด์วิดท์ที่ 3 dB ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานตามมาตรฐานของ IEEE 802.11b/g และ 802.11a เมื่อพิจารณาค่า $|S_{11}|$ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบจะมีค่าที่ต่ำกว่า -10 dB ทั้งสองย่านความถี่ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ว่ามีกำลังงานสะท้อนกลับไม่เกิน 10% ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบ

เพราะฉะนั้นสามารถที่จะสรุปได้ว่า ตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่ต้นแบบสามารถทำงานได้ในสองความถี่คือ 2.4 GHz และ 5.2 GHz โดยมีแบนด์วิดท์ที่ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สาย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอรูปแบบของวงจรกรองความถี่ผ่านแถบแบบสองความถี่สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สาย ตามมาตรฐานของ IEEE 802.11 และ 802.11a โดยมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานคือช่วงความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz โดยลักษณะ โครงสร้างของวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ จะเป็นโครงสร้างของเรโซเนเตอร์บนสายนำสัญญาณชนิดไมโครสตริป การปรับปรุงคุณลักษณะของวงจรกรองความถี่ผ่านแถบเพื่อให้รองรับกับการเกิดแถบความถี่คู่ในบริเวณแถบความถี่ที่ต้องการนั้น เป็นการเพิ่มเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปรูปลิ่มเหลี่ยมผืนผ้าลงไป ในไมโครสตริปรูปร่างตัวเอชเพื่อให้ตอบสนองในย่านความถี่ที่ต้องการ การปรับปรุงคุณลักษณะดังกล่าวเป็นการลดขนาดของวงจรกรองความถี่ที่มีผลทำให้วงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่มีขนาดเล็ก และมีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาและออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ เพื่อลดขนาดโครงสร้างของเรโซเนเตอร์ในการรองรับการเกิดของแถบความถี่คู่ โดยเน้นให้โครงสร้างมีขนาดเล็ก และไม่ซับซ้อน แต่มีประสิทธิภาพเพื่อเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สาย ในบทนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ในหัวข้อที่ 6.1 จะกล่าวถึงผลสรุปโดยรวมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งประกอบไปด้วยผลที่ได้จากการจำลองวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ ผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ ส่วนในหัวข้อที่ 6.2 จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเริ่มด้วยการอธิบายถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์ของการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ จากนั้นในบทที่ 2 จะอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่และพารามิเตอร์ที่สำคัญ เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงรูปแบบโครงสร้างของวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ที่ใช้ในการทำงานวิจัยและได้ทำการจำลองวงจรสมมูลของวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ขึ้นมาเพื่อศึกษาความสอดคล้องผลตอบสนองความถี่ระหว่างวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่ทำการจำลองขึ้นกับวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่ชนิดไมโครสตริป เมื่อทราบถึงทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่รวมถึงลักษณะ โครงสร้างของวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่แล้วจากนั้นทำการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5.2 GHz โดยจะพิจารณาผลตอบสนองความถี่ของค่า $|S_{21}|$ และ $|S_{11}|$ รวมถึงแบนด์วิดธ์ของตัวกรองผ่านแถบไมวากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่เป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งได้มีการกล่าวไว้ในบทที่ 4 หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของ วงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่ได้จากการจำลอง ในส่วนต่อไปได้ทำการนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่คั้งแสดงในตารางที่ 6.1 มาทำการสร้างวงจรกรองผ่าน แถบความถี่คู่คั้งแบบขึ้นมาเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่คั้งแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (mm)
L_1	16.5
W_1	17.5
L_2	2
W_2	0.5
gap	0.25
L_3	1.64
W_3	9.225

จากการทดสอบวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่คั้งแบบพบว่ามีผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดี กล่าวคือ เมื่อพิจารณา $|S_{21}|$ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่คั้งจะมีค่าแบนด์วิดท์ที่ 3 dB ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานตามมาตรฐานของ IEEE 802.11b/g และ 802.11a เมื่อพิจารณา $|S_{11}|$ ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่คั้งแบบจะมีค่าที่ต่ำกว่า -10 dB ทั้งสองย่านความถี่ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ว่า มีกำลังงานสะท้อนกลับไม่เกิน 10% ของตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่คั้งแบบผลของการทดสอบ วงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่คั้งเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม สามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่คั้ง

	ความถี่กลาง 2.442 GHz		ความถี่กลาง 5.25 GHz	
	การทดสอบ	การจำลอง	การทดสอบ	การจำลอง
$ S_{11} $ (dB)	-30	-24	-28.468	-20
$ S_{21} $ (dB)	-0.18	-0.19	-0.275	-0.3
แบนด์วิดท์ (MHz)	228	175	263	215

เพราะฉะนั้นสามารถที่จะสรุปได้ว่า ตัวกรองผ่านแถบความถี่คู่คั้งแบบที่นำเสนอใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถทำงานได้ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก การค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการสรุปของงานวิจัยพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เป็นอย่างดี แต่ผลของการตอบสนองทางความถี่อาจจะมีการเลื่อนของความถี่บ้างเล็กน้อย ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นอาจเกิดจากขั้นตอนในการสร้างชิ้นงาน เนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้ใช้วิธีการสร้างชิ้นงานโดยการฉายแสงบนแผ่นฟิล์มบาง (Negative Dryfilm Photo resist) ซึ่งอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในเรื่องขนาดของชิ้นงานที่ทำการสร้างขึ้น

อนึ่ง ในการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่โดยใช้เรโซเนเตอร์ที่มีค่าของอิมพีแดนซ์แบบขนันจะต้องทำให้ชิ้นงานมีขนาดเล็ก ทำให้ต้องมีการพับเพื่อให้มีขนาดเล็กแต่เมื่อทำการพับมากๆ จะทำให้การกัดชิ้นงานทำได้ยากลำบากและจะทำให้ความถี่เลื่อนไปจากผลการจำลองการทำงาน อีกอย่างถ้าต้องการออกแบบให้โครงสร้างของวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่มีขนาดเล็ก ในการออกแบบต้องใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกค่าสูงๆ ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานมีขนาดเล็กลงแต่ถ้าใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกค่าสูงๆ จะทำให้แผ่นวงจรมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นในการออกแบบวงจรกรองความถี่ควรเลือกค่าคงที่ไดอิเล็กตริกให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่สร้างขึ้นมา

สำหรับแนวทางในการพัฒนาต่อ คือ ในออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่คู่โดยใช้ค่าเรโซเนเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์แบบขนันสามารถทำการลดขนาดของวงจรลงได้อีกโดยการใช้การออกแบบเรโซเนเตอร์ที่มีค่าความยาวคลื่นประมาณ $\lambda/4$ ซึ่งต้องศึกษาเรื่องการใช้โพลคาปาซิทีฟเข้ามาช่วยเพื่อให้เรโซเนเตอร์มีขนาดที่เล็กลงกว่าเดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.E. William, "A Four-Cavity Elliptic Waveguide Filter," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-18, no. 18, pp. 1109-1114, Dec. 1970.
- [2] S.-F. Chang, Y.-H. Jeng, and J.-L. Chen, "Dual-Band step-impedance bandpass filter for multimode wireless lans," vol. 40, no. 1, pp. 38-39, Jan. 2004.
- [3] W. Ma and Q.-X. Chu, "Novel dual-band step-impedance filters with tunable Transmission Zero," *Proc. 2005 Asia-Pacific Microwave Conf.*, vol. 5, pp. 3, Dec. 2005.
- [4] J.S. Hong and M.J. Lancaster, "Coupling Of Microstrip Square Open-Loop Resonators For Cross-Coupled Planar Microwave Filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, pp. 2099-2109, Nov. 1996.
- [5] J.S. Hong and M.J. Lancaster, "Microstrip cross-coupled trisection bandpass filters with asymmetric frequency characteristics," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 146, pp. 84-90, Feb. 1999.
- [6] J.T. Kuo, M.J. Maa, and P.H. Lu, "A microstrip elliptic function filter with compact miniaturized hairpin resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, pp. 94-95, March 2000.
- [7] J.S. Hong, "On the development of superconducting microstrip filter for mobile," vol. 47, pp. communication applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, pp. 1656-1663, Sep. 1999.
- [8] C. Y. Chang, C. C. Chen, and H. J. Huang, "Folded quarter-wave resonator filter with Chebyshev, flat group delay, or quasi-elliptical function response," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, pp. 1609-1612.
- [9] M.Sakawa, K. Takahashi, and M. Makimoto, "Miniaturized hairpin resonator filters and their application to receiver front-end MIC's," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 37, pp. 1991-1997, Dec. 1989.
- [10] J.S. Hong and M.J. Lancaster, "Theory and experiment of novel microstrip slow-wave open-loop resonator filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, pp. 2358-2365, Dec. 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] C. M. Tsai, H. M. Lee, and C. C. Tsai, "Planar filter design with fully controllable second passband," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 53, no. 11, pp. 3429-3439, Nov. 2005.
- [12] S.-F. Chang, Y.-H. Jeng, and J.-L. Chen, "Dual-Band step-impedance bandpass filter for multimode wireless lans," vol. 40, no. 1, pp. 38-39, Jan. 2004.
- [13] G. Guillermo. *Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design* New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [14] Noyan Kinayman and M.I. Aksun, *Modern Microwave Circuit*, Artech House, Boston, 2005.
- [15] Jia-shen G. Hong and M. Jancadter. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. New York : John Wiley & Sons, 2001.
- [16] L.H. Weng, Y.C. Guo, X.W. Shi, and X.Q. Chen, "An Overview On Defected Ground Structure," *Progress In Electromagnetics Reserch B*, vol. 7, pp. 173-189, 2008
- [17] J.Xiao, S. Ma, and Y. Li, "A novel H-shaped microstrip resonator and it's design to filter using defected ground structure," *Pro. 2006 HDP Conf.*, pp. 1-4, Dec. 2006.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นายณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน
 วัน เดือน ปีเกิด 6 กันยายน 2527
 ที่อยู่ 74/3 หมู่ 2 ตำบลปากคม อำเภอห้วยยอด จังหวัดตรัง
 รหัสไปรษณีย์ 92130
 ประวัติการศึกษา 2550 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Nattaset Mhudtongon, Kittisak Phaebua and Chuwong Phongcharoenpanich, "Dual-Band Microstrip Bandpass Filter", *Proceeding of 2009 IEEE International Conferencr on Antennes, Propagation and System (INAS 2009)*, Dec. 2009.

