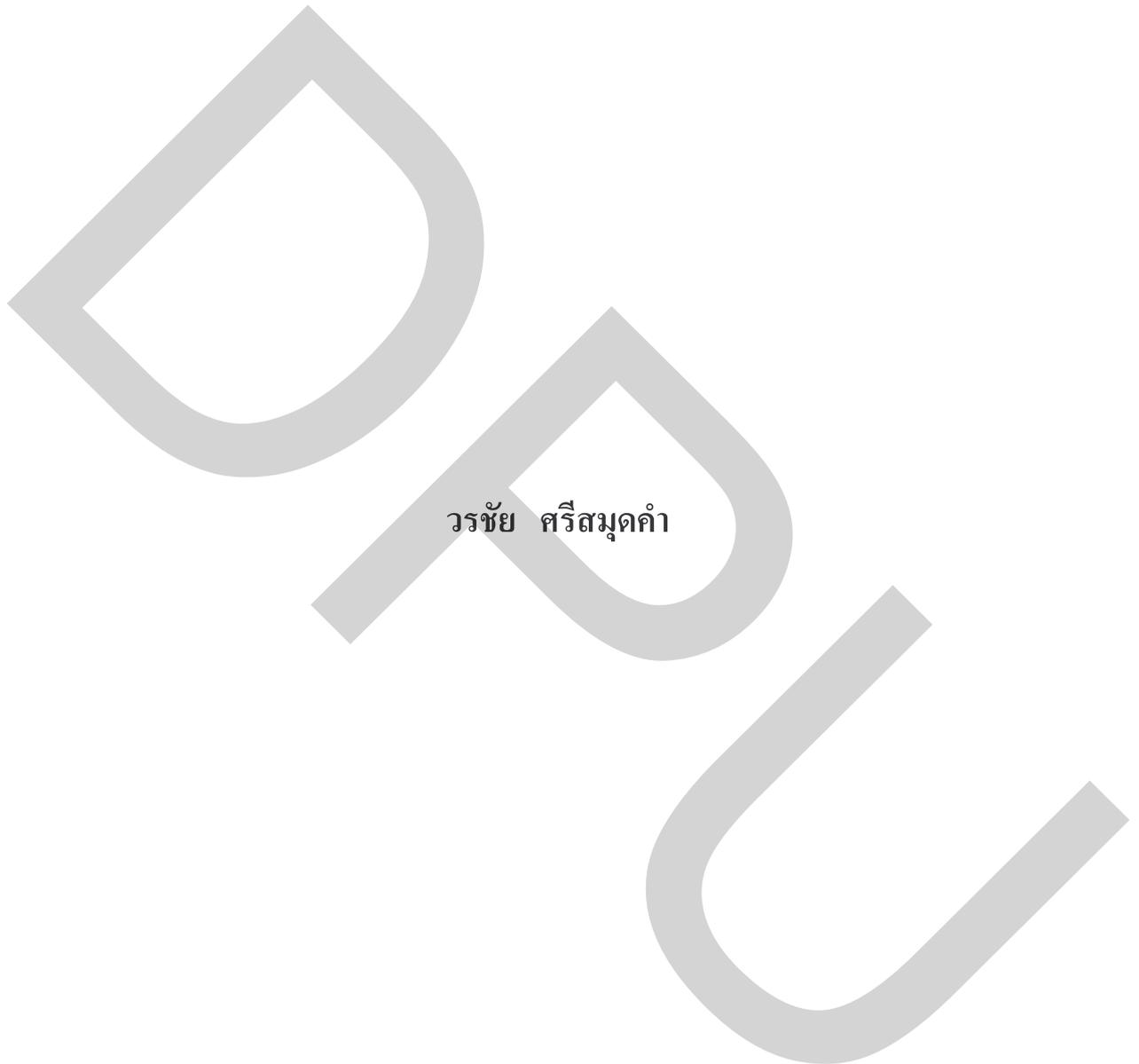


เรโซเนเตอร์หยุดแถบขนาดเล็กสำหรับการสื่อสารไร้สายสองย่านความถี่



วรชัย ศรีสมุดคำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

พ.ศ. 2553

Small Bandstop Resonator for Dual-Band Wireless Communication



Worachai Srisamudkam

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering**

Department of Computer and Telecommunication Engineering

Graduate School, Dhurakij Pundit University

2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเอาใจใส่และดูแลเป็นอย่างมากจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์บุญยวีร์ จามจรีกุล ซึ่งท่านคอยให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ นอกจากนี้ กระผมใคร่ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภักตะพันธ์ ผู้อำนวยการหลักสูตรฯ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และเอาใจใส่นักศึกษาทุกๆ คนเสมอมา

ขอขอบคุณ อ.ดร.ประศาสน์ จันทราทิพย์ และ อ.ดร.พีรเดช ฌ น่าน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ช่วยดำเนินเรื่องต่างๆ ให้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ร่วมรุ่นทุกๆ คน ที่คอยช่วยเหลือกันมาตลอด

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนบุคคลในครอบครัวของผู้วิจัย ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆ ด้าน ตลอดระยะเวลาการศึกษาจบจนสำเร็จการศึกษา

วรชัย ศรีสมุดคำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ฉ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
2. แนวคิด ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เรโซเนเตอร์ที่ทำจากอุปกรณ์ RLC	4
2.2 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างจากเรโซเนเตอร์ยาว $\lambda/4$	8
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
3. ระเบียบวิธีวิจัย.....	14
3.1 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์.....	14
3.2 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิด.....	16
4. ผลการศึกษา.....	22
4.1 ผลการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความกว้างและ ความยาวค่าต่างๆ.....	23
4.1.1 ผลการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่กลุ่มที่ 1.....	23
4.1.2 ผลการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่กลุ่มที่ 2.....	32
4.2 ผลการจำลองและทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอ.....	44
4.3 นิยามคำศัพท์ ค่าข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ และข้อสังเกตผลที่ได้จากการทดสอบ...	49

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5. สรุปผลการศึกษา.....	52
5.1 สรุปผลการทำงานตามขอบเขตงานวิจัย.....	52
5.2 สรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์งานวิจัย.....	52
5.3 สรุปประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	53
5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	53
บรรณานุกรม.....	55
ประวัติผู้เขียน.....	56

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สรุปค่าที่สำคัญของเรโซเนเตอร์แบบอนุกรมและแบบขนาน.....	7
4.1 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่ เท่ากับ 25 mm.....	25
4.2 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่ เท่ากับ 25 mm.....	26
4.3 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่ เท่ากับ 24 mm.....	28
4.4 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่ เท่ากับ 24 mm.....	29
4.5 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่ เท่ากับ 24 mm.....	30
4.6 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่ เท่ากับ 23 mm.....	31
4.7 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ เท่ากับ 2.44 mm.....	33
4.8 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ เท่ากับ 2.44 mm.....	34
4.9 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ เท่ากับ 2.64 mm.....	36
4.10 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ เท่ากับ 2.64 mm.....	37
4.11 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ เท่ากับ 2.84 mm.....	40
4.12 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ เท่ากับ 2.84 mm.....	41
4.13 ผลการทดสอบที่มีต่อการทำงานเมื่อปรับความกว้างและความยาวของ สายนำสัญญาณ.....	43

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 (ก) เรโซเนเตอร์แบบอนุกรม RLC (ข) กราฟแสดงขนาดของอินพุตอิมพีแดนซ์.....	5
2.2 (ก) เรโซเนเตอร์แบบอนุกรม RLC (ข) กราฟแสดงขนาดของอินพุตอิมพีแดนซ์.....	7
2.3 วงจรกรองหยุดแถบหรือวงจรกรองผ่านแถบโดยใช้เรโซเนเตอร์ที่ทำจาก สายนำสัญญาณที่ต่อขนานกันไปเรื่อยๆ.....	9
2.4 วงจรเทียบเท่าสำหรับวงจรกรองหยุดแถบของภาพที่ 2.3.....	10
2.5 วงจรกรองหยุดแถบที่ทำจากอุปกรณ์แบบลัมพ์.....	11
2.6 วงจรกรองหยุดแถบหรือวงจรกรองผ่านแถบโดยใช้เรโซเนเตอร์ที่ทำจาก สายนำสัญญาณที่ต่อขนานกันไปเรื่อยๆ.....	12
3.1 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์.....	14
3.2 ค่า Return Loss (S_{11}) และค่า Insertion Loss (S_{21}) ที่ได้จากการจำลองวงจรหยุดแถบ ที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์.....	15
3.3 เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบเป็นวงจรเปิด.....	16
3.4 ค่า Return Loss (S_{11}) และค่า Insertion Loss (S_{21}) ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์ หยุดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบเป็นวงจรเปิด.....	17
3.5 เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบเป็นวงจรเปิด ที่เป็นโครงสร้างใหม่ที่ปรับปรุงให้ดีขึ้นจากภาพที่ 3.4.....	18
3.6 วงจรเทียบเท่าภาพที่ 3.5 ที่สร้างจากเรโซเนเตอร์และวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์.....	19
3.7 สายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ ที่ต่ออยู่กับโหลด (เรโซเนเตอร์ LC ที่ต่ออนุกรมกัน).....	19
3.8 วงจรเทียบเท่าภาพที่ 3.7 เสมือนเป็นเป็นเรโซเนเตอร์ LC ที่ต่อขนานกัน.....	20
3.9 วงจรเทียบเท่าภาพที่ 3.6 ที่ได้จากการใช้เรโซเนเตอร์และอาศัยวงจรแปลง แอดมิตแตนซ์.....	20
3.10 ค่า S_{11} และค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่ที่ได้รับ เหมือนกับภาพที่ 3.6.....	21
4.1 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่ เท่ากับ 25 mm.....	24
4.2 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่ เท่ากับ 25 mm.....	25

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่ เท่ากับ 24 mm.....	27
4.4 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่ เท่ากับ 24 mm.....	28
4.5 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่ เท่ากับ 23 mm.....	30
4.6 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่ เท่ากับ 23 mm.....	31
4.7 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ เท่ากับ 2.44 mm.....	33
4.8 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ เท่ากับ 2.44 mm.....	34
4.9 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ เท่ากับ 2.64 mm.....	36
4.10 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ เท่ากับ 2.64 mm.....	37
4.11 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ เท่ากับ 2.84 mm.....	39
4.12 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ เท่ากับ 2.84 mm.....	40
4.13 ขนาดความกว้างและความยาวของเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีโครงสร้างใหม่ ที่นำเสนอ.....	43
4.14 ภาพถ่ายของเรโซเนเตอร์หูดแถบที่สร้างขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4.....	44
4.15 ภาพถ่ายของเครื่องเน็ตเวิร์กอนาลิเซอร์ (Network Analyzer) HP8753E.....	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.16 ภาพถ่ายเหตุการณ์ต่างๆ ในขณะที่ทำการทดสอบเรโซเนเตอร์หุคแถบ ที่นำเสนอ.....	46
4.17 ภาพถ่ายเหตุการณ์ต่างๆ ในขณะที่ทำการทดสอบเรโซเนเตอร์หุคแถบ ที่นำเสนอ (ต่อ).....	47
4.18 ค่า Return Loss (S_{11}) ที่ได้จากการจำลองและวัดเรโซเนเตอร์หุคแถบที่นำเสนอ....	47
4.19 ค่า Insertion Loss (S_{21}) ที่ได้จากการจำลองและวัดเรโซเนเตอร์หุคแถบที่นำเสนอ..	48

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เรโซเนเตอร์หยุดแถบขนาดเล็กสำหรับการสื่อสารไร้สาย สองย่านความถี่
ชื่อผู้เขียน	วรชัย ศรีสมุดคำ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปยุตย์วีร์ จามจรีกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอหลักการในการออกแบบและสร้างวงจรเรโซเนเตอร์หยุดแถบขนาดเล็กสำหรับการใช้งานในโครงข่ายสื่อสารแบบไร้สายสองย่านความถี่ โดยตัวเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอจะทำหน้าที่เสมือนเป็นวงจรกรองผ่านแถบ 2 ย่านความถี่ ซึ่งจะแยกย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ต้องการใช้งานออกจากกันโดยใช้ทฤษฎีสายนำสัญญาณร่วมกับวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์ โดยในที่นี้ ย่านความถี่ต่ำ 800 – 900 MHz จะถูกกำหนดเพื่อใช้งานรองรับโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ของ บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) และย่านความถี่สูง 2.3 – 2.7 GHz จะถูกกำหนดเพื่อใช้งานรองรับโครงข่ายสื่อสารไร้สายทั้งเครือข่าย WiFi – 2.45 GHz และ WiMAX – 2.5 GHz

Thesis Title Small Bandstop Resonator for Dual-Band Wireless Communication
Author Worachai Srisamudkum
Thesis Advisor Assoc. Prof. Punyawit Jamjareekul
Department Computer and Telecommunication Engineering
Academic Year 2010

ABSTRACT

This thesis proposes a concept for designing and fabrication about a compact bandstop resonator for existing dual-band wireless communication networks. This proposed bandstop resonator acts as a dual-band bandpass filter to separate widely the low and high frequency bands by using transmission lines theory and admittance inverter. The low frequency band, 800 – 900 MHz, can be served the CDMA mobile networks of CAT Telecom Public Company Limited, and the high frequency band, 2.3 – 2.7 GHz, can be served the wireless networks both WiFi-2.45 GHz and WiMAX-2.5 GHz.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีด้านการสื่อสารได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะเทคโนโลยีทางด้านการสื่อสารไร้สาย ไม่ว่าจะเป็น WLAN, WiMAX หรือ โทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น ดังนั้น ในการผลิตอุปกรณ์ด้านการสื่อสารนั้นจะต้องสามารถที่จะรองรับการใช้งานหลายประเภทของผู้ใช้ได้ ซึ่งการออกแบบวงจรเพียงวงจรเดียวแต่ใช้งานได้หลายย่านความถี่เท่านี้ที่ จะตอบสนองความต้องการและเป็นที่ยอมรับของผู้ใช้งานได้เป็นอย่างดี วงจรหนึ่งที่สำคัญในอุปกรณ์ใช้งานทางด้านคลื่นวิทยุและย่านความถี่ไมโครเวฟ คือ วงจรกรองผ่านแถบ (Band-pass Filter)

อีกทั้ง ในปัจจุบันนี้ มีเครือข่ายสื่อสารแบบไร้สายที่ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าหลายย่านความถี่และระบบ เช่น CDMA ของ บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน), GSM 1800, GSM 1900, WLAN (WiFi), WMAN (WiMAX) และ WCDMA ฯลฯ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่วงจรกรองผ่านแถบที่ถูกสร้างขึ้นมาใช้งาน ณ ขณะนี้ควรจะสามารถรองรับการใช้งานได้หลายย่านความถี่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตั้งแต่ 2 ย่านความถี่ขึ้นไป

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างวงจรกรองผ่านแถบออกมาอย่างมากมาย ยกตัวอย่างเช่น C.-Y. Hsu *et al.*¹ ได้นำเสนอวิธีหนึ่งที่น่าสนใจนำมาใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรกรองหยุดแถบ (Bandstop Filter) เพื่อสร้างวงจรกรองผ่านแถบ 2 ย่านความถี่ โดยกำหนดแถบหยุดเท่ากับ 5 – 6 GHz (แบนด์วิดธ์ -3 dB ที่ออกแบบได้มีความกว้างเท่ากับ 1 GHz) และ H.-Y. Anita Yim² ได้นำเสนอหลักการในการสร้างวงจรกรองที่ยอมให้ย่านความถี่ 900 MHz และ 2 GHz ผ่านไปได้โดยใช้วงจรเรโซเนเตอร์ (Resonator) และวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์ (Admittance Inverter) แต่มีขนาดที่ใหญ่

¹C.-Y. Hsu, H.-R. Chuang, and C.-Y. Chen. (2009). "Compact microstrip UWB dual-band bandpass filter with tunable rejection band." *J. of Electromagn. Waves and Appl.* pp. 617 – 626.

²H.-Y. Anita Yim and K.-K. Michael Cheng. (2005, June). "Novel dual-band planar resonator and admittance inverter for filter design and applications." *IEEE MTT-S Int' 2005.* 4 pages.

ดังนั้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะสร้างวงจรรีโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีขนาดเล็กกะทัดรัด (ขนาดของวงจรถ้ากับ 26.28×43 มม.) เพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรรองความถี่ผ่านแถบสำหรับการใช้งานในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย 2 ย่านความถี่ คือ ย่านความถี่ต่ำมีค่าเท่ากับ $800 - 900$ MHz และย่านความถี่สูงมีค่าเท่ากับ $2.3 - 2.7$ GHz

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างวงจรรีโซเนเตอร์หยุดแถบขนาดเล็กบนแผ่นวงจรมิพิมพ์สำหรับการใช้งานในโครงข่ายสื่อสารไร้สายสองย่านความถี่
2. เพื่อสร้างวงจรรีโซเนเตอร์หยุดแถบที่ใช้งานได้ดีในย่านความถี่ที่ต้องการและมีแถบหยุดที่กว้างและมีขนาดเล็กกะทัดรัด
3. เพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างวงจรรีโซเนเตอร์หยุดแถบบนแผ่นวงจรมิพิมพ์ที่รองรับการใช้งานย่านความถี่อื่นๆ ที่มีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างวงจรรีโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีขนาดเล็กกะทัดรัดบนแผ่นวงจรมิพิมพ์ที่รองรับการใช้งานสองย่านความถี่ ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำในช่วง $800 - 900$ MHz เพื่อรองรับการใช้งานกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ของ บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) และ ย่านความถี่สูงในช่วง $2.3 - 2.7$ GHz เพื่อรองรับการใช้งานกับระบบสื่อสารไร้สาย WiFi-2.45 GHz และ WiMAX-2.5 GHz
2. สร้างวงจรรีโซเนเตอร์หยุดแถบที่ใช้งานได้ดีในสองย่านความถี่ที่ต้องการและมีแถบหยุดที่กว้างและมีขนาดเล็กกะทัดรัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำไปใช้งานได้จริงกับโทรศัพท์เคลื่อนที่และอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาที่มีย่านความถี่ใช้งานตรงกับที่นำเสนอ เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ของ บมจ. กสท โทรคมนาคม (มหาชน), WiFi - 2.45 GHz และ WiMAX - 2.5 GHz
2. เป็นพื้นฐานในการออกแบบและสร้างวงจรรีโซเนเตอร์หยุดแถบที่รองรับการใช้งานระบบสื่อสารไร้สาย WiMAX ที่ย่านความถี่ $3.3 - 3.7$ GHz และ $5.25 - 5.85$ GHz นอกเหนือจากย่านความถี่ WiMAX - 2.5 GHz ที่นำเสนอ

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. สำรวจวรรณกรรมปริทัศน์ที่เกี่ยวกับวงจรรองความถี่ที่สร้างบนแผ่นวงจรมพิมพ์แบบต่างๆ
2. ศึกษาวงจรรองความถี่บนแผ่นวงจรมพิมพ์ที่ใช้งานกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ และ เครื่องข่าย WLAN และเครือข่าย WiMAX
3. จำลองและวิเคราะห์ผลการทำงานของวงจรรองความถี่บนแผ่นวงจรมพิมพ์ที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้
4. จำลอง ปรับแต่ง และวิเคราะห์ผลการทำงานของวงจรรองความถี่บนแผ่นวงจรมพิมพ์ที่มีโครงสร้างใหม่
5. สร้างวงจรมเรโซเนเตอร์หยุดแถบบนแผ่นวงจรมพิมพ์ที่นำเสนอ
6. ทดสอบ ปรับแต่ง และบันทึกผลการทดสอบวงจรมเรโซเนเตอร์หยุดแถบบนแผ่นวงจรมพิมพ์ที่นำเสนอ
7. จัดทำรายงานความคืบหน้าและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวงจรกรองหยุดแถบ (Bandstop Filter) ที่สร้างขึ้นจากเรโซเนเตอร์ (Resonator) ที่ทำจากสายนำสัญญาณ (Transmission Line) หรือสตับ (Stub) จึงถูกเรียกสั้นๆ รวมกันว่า “เรโซเนเตอร์หยุดแถบ” (Bandstop Resonator) สำหรับโครงข่ายสื่อสารไร้สายส่งย่านความถี่ ดังนั้นทฤษฎีต่างๆ ที่จะกล่าวถึงในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึง เรโซเนเตอร์ที่ทำจากอุปกรณ์ RLC และวงจรกรองหยุดแถบที่สร้างจากเรโซเนเตอร์ยาว $\lambda/4$ ตามลำดับ

2.1 เรโซเนเตอร์ที่ทำจากอุปกรณ์ RLC¹

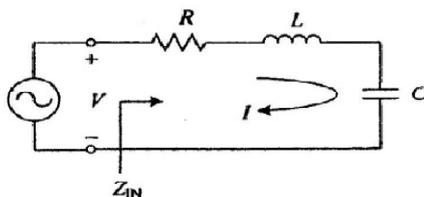
เรโซเนเตอร์หรือวงจรเรโซแนนซ์เป็นส่วนประกอบสำคัญของอุปกรณ์และวงจรไมโครเวฟต่างๆ เป็นจำนวนมาก ได้แก่ วงจรกรอง วงจรขยายแบบเลือกความถี่ วงจรออสซิลเลเตอร์ และมีเตอร์วัดความถี่ ฯลฯ โดยเรโซเนเตอร์ทำหน้าที่ในการทำให้เกิดผลตอบสนองในช่วงความถี่ตามที่ต้องการได้

เรโซเนเตอร์พื้นฐานประกอบด้วยอุปกรณ์ RLC ซึ่งผลตอบสนองของวงจร เช่น ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งาน โดยที่ค่าความถี่เรโซแนนซ์ ค่าพลังงานเฉลี่ยที่สะสมในรูปของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากันพอดี ดังนั้นค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จะมีสมบัติเป็นค่าความต้านทานเท่านั้น เรโซเนเตอร์มีประโยชน์มากเพื่อใช้ทำหน้าที่เป็นวงจรเลือกความถี่ที่ต้องการหรือไม่ต้องการ ได้แก่ วงจรกรอง วงจรขยายแบบเลือกความถี่ และวงจรออสซิลเลเตอร์ เป็นต้น ในที่นี้จะอธิบายพื้นฐานของเรโซเนเตอร์แบบอนุกรมและแบบขนานที่ประกอบด้วย RLC โดยจะกล่าวถึงการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญ ภาพที่ 2.1 แสดงวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม RLC ซึ่งค่าอินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าเป็น

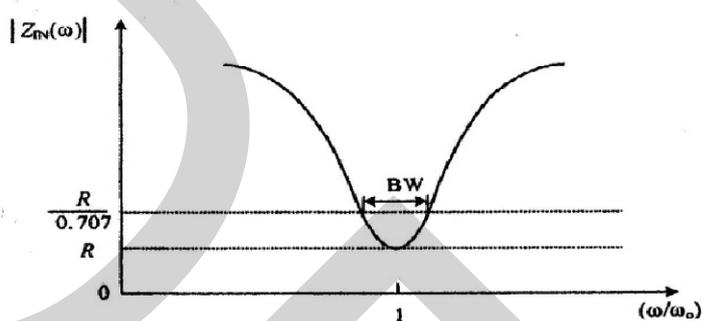
$$Z_{IN} = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} \quad (2.1)$$

¹ ประยูทธ อัครเอกผดลทิน. 2552. การออกแบบวงจรไมโครเวฟ (Microwave Circuit Design).

$$P_{IN} = P_{loss} + \underbrace{2j\omega(W_L - W_C)}$$



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.1 (ก) เรโซเนเตอร์แบบอนุกรม RLC (ข) กราฟแสดงขนาดของอินพุตอิมพีแดนซ์¹

และค่ากำลังที่จ่ายให้กับเรโซเนเตอร์มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} P_{IN} &= \frac{1}{2}VI = \frac{1}{2}Z_{IN}|I|^2 = \frac{1}{2}Z_{IN}\left|\frac{V}{Z_{IN}}\right|^2 \\ &= \frac{1}{2}|I|^2R\left(R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}\right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

โดยกำลังสูญเสียที่ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ

$$P_{loss} = \frac{1}{2}|I|^2R \quad (2.3)$$

และพลังงานแม่เหล็กในตัวเหนี่ยวนำและพลังงานไฟฟ้าในตัวเก็บประจุมีค่าดังนี้

$$W_L = \frac{1}{2}|I|^2L \quad (2.4ก)$$

$$W_C = \frac{1}{4}|I|^2\frac{1}{\omega^2C} \quad (2.4ข)$$

¹ประยูทธ อัครเอกตาติน. 2552. การออกแบบวงจรไมโครเวฟ (Microwave Circuit Design).

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ดังนั้น ค่ากำลังที่จ่ายให้กับเรโซเนเตอร์ในสมการ (2.2) และค่าอิมพีแดนซ์ในสมการ (2.1) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$W_L = \frac{1}{4}|I|^2 \frac{1}{\omega^2 C} \quad (2.5)$$

$$P_{IN} = P_{loss} + 2j\omega(W_L - W_C) \quad (2.6)$$

$$Z_{IN} = \frac{2P_{IN}}{|I|^2} = \frac{P_{loss} + 2j\omega(W_L - W_C)}{|I|^2 / 2} \quad (2.7)$$

ที่ความถี่เรโซแนนท์ ค่าพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะต้องมีค่าเท่ากัน $W_L = W_C$ ดังนั้น จากสมการ (2.7) จะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของเรโซเนเตอร์มีค่าเป็น

$$Z_{IN} = \frac{P_{loss}}{|I|^2 / 2} = R \quad (2.8)$$

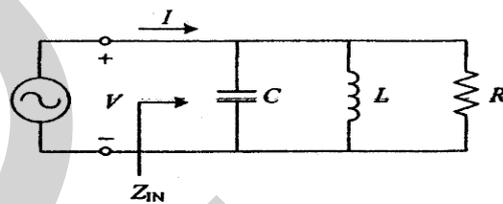
พบว่าที่ความถี่เรโซแนนท์นั้น ค่ากำลังของเรโซเนเตอร์ก็คือค่ากำลังสูญเสียในวงจร หรือที่ตัวต้านทานของวงจร ขณะที่พลังงานเฉลี่ยที่สะสมในเรโซเนเตอร์จะมีค่า $2W_L$ หรือ $2W_C$ และค่าความถี่เรโซแนนท์หาได้จากสมการ (2.4) และ (2.5) เมื่อ $W_L = W_C$ ซึ่งจะพบว่าค่าความถี่เรโซแนนท์มีค่าดังนี้

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.9)$$

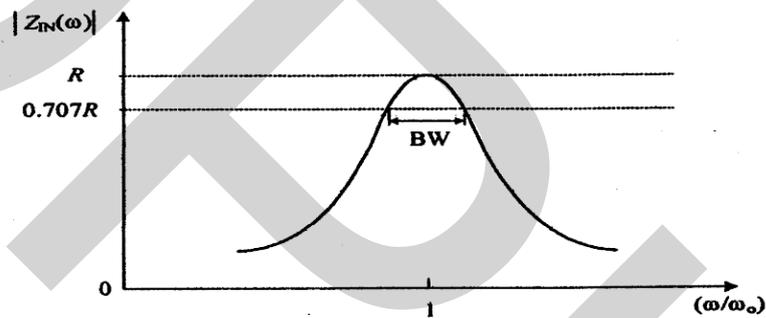
พิจารณาความถี่ที่อยู่ใกล้ๆ ความถี่เรโซแนนท์ $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ โดยที่ $\Delta\omega$ มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ในสมการ (2.1) จะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Z_{IN} &= R + j\omega L \left(1 - \frac{1}{LC}\right) \\ &= R + j\omega L \left(\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega^2}\right) \\ &\approx R + j2L\Delta\omega \\ &\approx R + j\frac{2RQ\Delta\omega}{\omega_0} \end{aligned} \quad (2.10)$$

เมื่อ $\omega_0^2 = 1/LC$, $\omega^2 - \omega_0^2 = (\omega - \omega_0)(\omega + \omega_0) = \Delta\omega(2\omega - \Delta\omega) \approx 2\omega\Delta\omega$ สมการ (2.10) นี้ใช้ในการพิจารณาวจรสมมูลของเรโซเนเตอร์ที่มีองค์ประกอบแบบกระจาย ภาพที่ 2.1 (ข) แสดงผลตอบสนองของอินพุตอิมพีแดนซ์ พบว่ามีค่าต่ำสุดเท่ากับ R ที่ความถี่เรโซแนนท์ สำหรับที่ความถี่รอบๆ ความถี่เรโซแนนท์นั้น ส่วนจินตภาพของ Z_{IN} มีค่าไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นอินพุตอิมพีแดนซ์จึงมีค่าเพิ่มขึ้นรอบๆ ความถี่เรโซแนนท์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.2 (ก) เรโซเนเตอร์แบบขนาน RLC และ (ข) กราฟแสดงขนาดของอินพุตอิมพีแดนซ์¹
ตารางที่ 2.1 สรุปค่าที่สำคัญของเรโซเนเตอร์แบบอนุกรมและแบบขนาน¹

ค่าที่สำคัญ	วงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม	วงจรเรโซแนนท์แบบขนาน
อิมพีแดนซ์/แอดมิตแตนซ์ ที่อินพุต	$Z_{IN} = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}$ $\approx R + j\frac{2RQ\Delta\omega}{\omega_0}$	$Y_{IN} = \frac{1}{R} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}$ $\approx \frac{1}{R} + j\frac{2Q\Delta\omega}{R\omega_0}$
กำลังสูญเสีย	$P_{loss} = \frac{1}{2} I ^2 R$	$P_{loss} = \frac{1}{2}\frac{ V ^2}{R}$
พลังงานแม่เหล็กที่สะสม	$W_L = \frac{1}{4} I ^2 L$	$W_L = \frac{1}{4} V ^2 \frac{1}{\omega^2 L}$
พลังงานไฟฟ้าที่สะสม	$W_C = \frac{1}{4} I ^2 \frac{1}{\omega^2 C}$	$W_C = \frac{1}{4} V ^2 C$
ความถี่เรโซแนนท์	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

¹ ปรายูท อัครเอกตาดลิน. 2552. การออกแบบวงจรไมโครเวฟ (Microwave Circuit Design).

สำหรับเรโซเนเตอร์แบบขนาน RLC ในภาพที่ 2.2 (ก) จะเป็นวงจรคู่กับเรโซเนเตอร์แบบอนุกรม โดยมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็นดังนี้

$$Z_{IN} = \frac{1}{Y_{IN}} = \left(\frac{1}{R} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} \quad (2.11)$$

ผลตอบสนองของขนาดของอินพุตอิมพีแดนซ์ในสมการ (2.11) แสดงในภาพที่ 2.2 (ข) ซึ่งพบว่าจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ R ที่ความถี่เรโซแนนท์ สำหรับที่ความถี่รอบๆ ความถี่เรโซแนนท์นั้น ส่วนจินตภาพของ Z_{IN} จะมีค่าไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบขนานจึงมีค่าลดลงรอบๆ ความถี่เรโซแนนท์ และค่าพารามิเตอร์ของเรโซเนเตอร์แบบขนานได้สรุปในตารางที่ 2.1

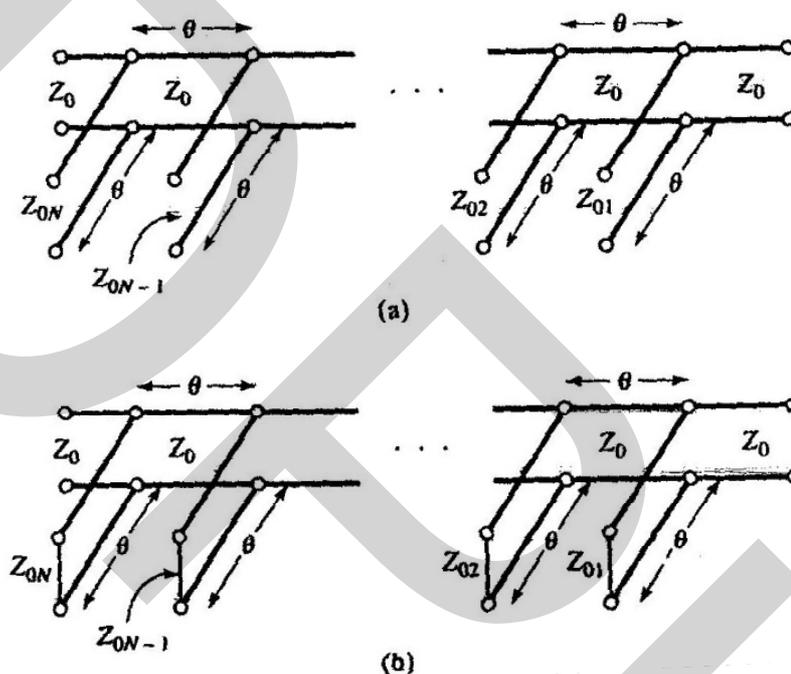
2.2 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างจากเรโซเนเตอร์ยาว $\lambda/4$ ¹

สตัปสายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$ ที่ถูกเปิดวงจรหรือที่ถูกลัดวงจรสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรเรโซเนเตอร์แบบอนุกรมหรือแบบขนานได้ ตามลำดับ ดังนั้นเราสามารถนำสตัปเหล่านี้มาต่อขนานกันตามแนวยาวของสายนำสัญญาณเส้นหนึ่ง เพื่อที่จะใช้งานเป็นวงจรกรองผ่านแถบ (Band-pass Filter) หรือวงจรกรองหยุดแถบ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ส่วนของสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda/4$ ระหว่างสตัปจะทำหน้าที่เสมือนเป็นวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์ (Admittance Inverter) ซึ่งถูกนำมาใช้งานเพื่อที่จะเปลี่ยนวงจรเรโซเนเตอร์แบบอนุกรมอีกด้านหนึ่งไปเป็นวงจรเรโซเนเตอร์แบบขนานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในที่นี้ ความยาวของทั้งสตัปสายนำสัญญาณทั้ง 2 ด้านและส่วนของสายนำสัญญาณระหว่างสตัปมีค่าเท่ากับ $\lambda/4$ ที่ค่าความถี่ศูนย์กลาง ω_0

สำหรับวงจรกรองที่มีค่าแบนด์วิดท์แคบตัวหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากการใช้สตัป N ตัวจะให้ผลตอบสนองในการทำงานที่เหมือนกับวงจรกรองที่ทำจากสายส่งคู่ขนาน (Coupled Line Filter) ที่มี $N+1$ ส่วน อีกทั้งค่าอิมพีแดนซ์ภายในของวงจรกรองที่ทำจากสตัป (Stub Filter) มีค่าเท่ากับ Z_0 จึงทำให้วงจรกรองที่ทำจากสตัปมีขนาดเล็กกะทัดรัดและง่ายกว่าในการออกแบบ เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรกรองที่ทำจากสายส่งคู่ขนาน อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของวงจรกรองที่ทำจากเรโซเนเตอร์แบบสตัปก็คือ จะต้องหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมในทางปฏิบัติ

¹ David M. Pozar, 1998. **Microwave Engineering**. 2nd Edition. New York: John Wiley & Son.

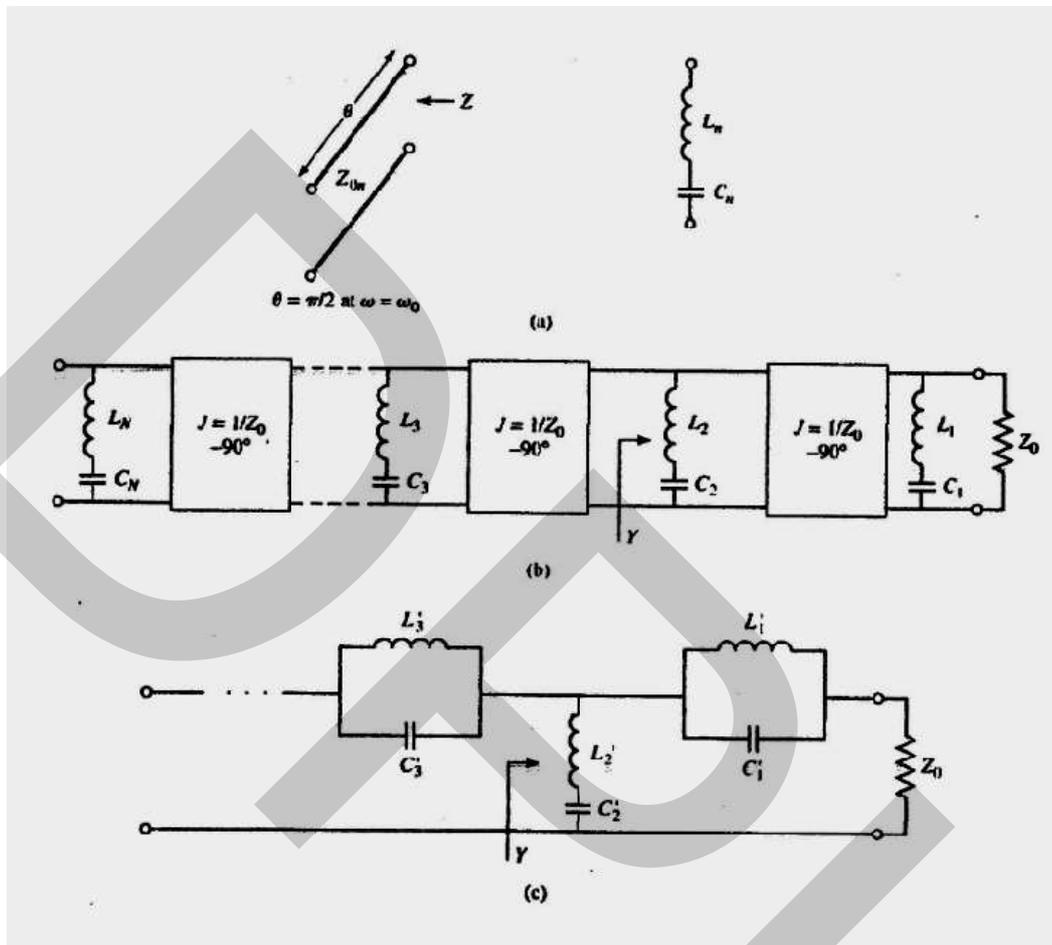
ขั้นแรก เราจะพิจารณาวงจรกรองหยุดแถบตัวหนึ่งที่ใช้สแต็ปแบบเปิดวงจรจำนวน N ตัว ดังแสดงในภาพที่ 2.3 (a) สมการการออกแบบสำหรับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสแต็ป (Z_{0n}) ที่เกิดขึ้นจะหาค่าออกมาได้ในเทอมของอุปกรณ์ของต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำ (Lowpass Filter Prototype) โดยผ่านการใช้นางจรเทียบเท่า (Equivalent Circuit)



ภาพที่ 2.3 วงจรกรองหยุดแถบหรือวงจรกรองผ่านแถบโดยใช้เรโซเนเตอร์ที่ทำจากสายนำสัญญาณ ที่ต่อขนานกันไปเรื่อยๆ (a) วงจรกรองหยุดแถบ (b) วงจรกรองผ่านแถบ¹

จากภาพที่ 2.4 (a) สแต็ปที่ถูกเปิดวงจรตัวหนึ่งสามารถที่จะถูกประมาณได้ว่าเป็นวงจรเรโซเนเตอร์ LC ที่อนุกรมกันได้ โดยมีความยาวทางไฟฟ้า $\theta \approx 90^\circ$ ถ้าเราพิจารณาส่วนของสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda/4$ ระหว่างสแต็ปเสมือนเป็นวงจรแปลงแอดมิตแดนซ์ วงจรกรองหยุดแถบในภาพที่ 2.3 (a) สามารถที่ถูกแทนได้ด้วยวงจรเทียบเท่าดังแสดงในภาพที่ 2.4 (b) แล้วค่าอุปกรณ์ต่างๆ ของวงจรเทียบเท่าในภาพที่ 2.4 (b) สามารถที่จะถูกหาค่าออกมาได้และสัมพันธ์กับวงจรเทียบเท่าที่สร้างจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ (Lumped-Elements) ดังในภาพที่ 2.4 (c)

¹ David M. Pozar, 1998. **Microwave Engineering**. 2nd Edition. New York: John Wiley & Son.



ภาพที่ 2.4 วงจรเทียบเท่าสำหรับวงจรกรอดหยุดแถบของภาพที่ 2.3¹

- (a) วงจรเทียบเท่าของสแต็ปแบบเปิดวงจรสำหรับค่าความยาวทางไฟฟ้า $\theta \approx 90^\circ$
- (b) วงจรเทียบเท่าของวงจรกรอดหยุดแถบที่สร้างจากรีโซเนเตอร์และวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์
- (c) วงจรเทียบเท่าของวงจรกรอดหยุดแถบที่สร้างจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ (Lumped Elements)

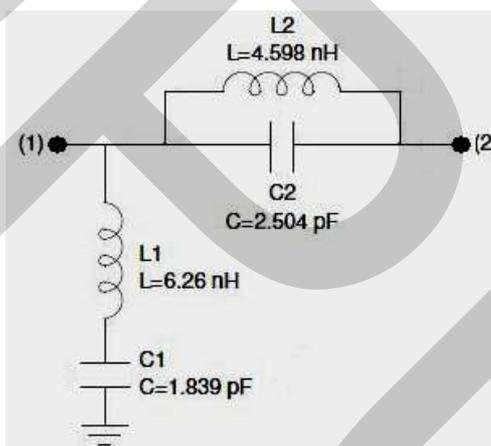
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วงจรกรอดหยุดแถบเป็นวงจรที่ทำหน้าที่สกัดกั้นมิให้ค่าความถี่หรือย่านความถี่ที่เข้ามาทางอินพุตของวงจรรอกไปสู่เอาต์พุตของวงจรได้ ยกตัวอย่างเช่น วงจรกรอดหยุดแถบวงจรหนึ่งถูกกำหนดค่าความถี่ศูนย์กลางเท่ากับ 1.65 GHz ย่อมแสดงว่า “ย่านความถี่ที่ล้อมรอบค่าความถี่ศูนย์กลาง 1.65 GHz จะไม่สามารถถูกส่งออกไปที่เอาต์พุตของวงจรได้” ส่วนจะมีแถบกว้างของ

¹David M. Pozar, 1998. **Microwave Engineering**. 2nd Edition. New York: John Wiley & Son.

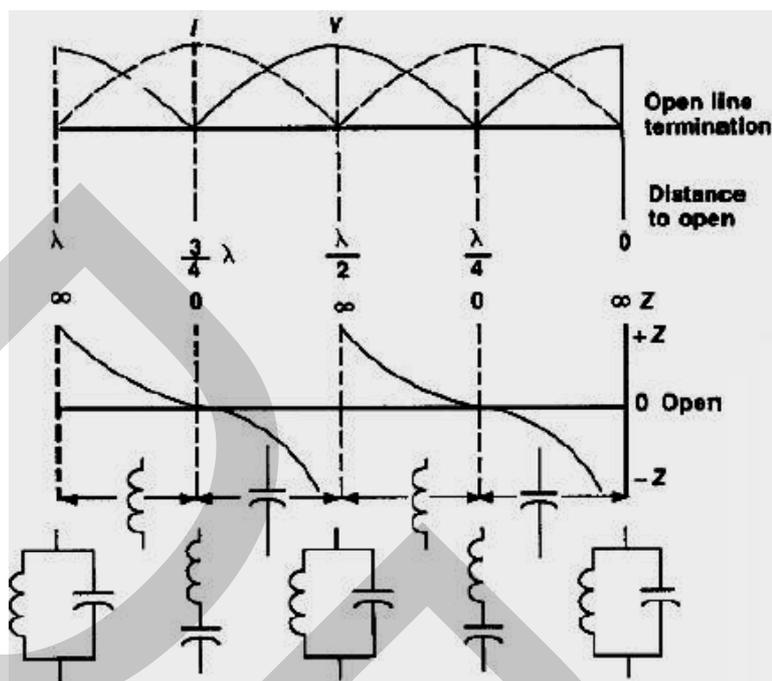
ความถี่หรือแบนด์วิดท์เท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าความถี่ทั้ง 2 ด้านที่ต้องการจะยอมให้ผ่านออกไปที่เอาต์พุตของวงจรได้ กล่าวคือ “วงจรกรองหยุดแถบทำหน้าที่เสมือนเป็นวงจรกรองผ่านแถบที่สามารถทำงานรองรับ 2 ย่านความถี่ที่แยกห่างจากกันได้ โดยวงจรกรองหยุดแถบนั้นสามารถสร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์และจากสายนำสัญญาณที่ประกอบขึ้นจากองค์ประกอบกระจาย (Distributed Elements) ในที่นี้ เราสามารถนำวงจรเรโซเนเตอร์แบบ RLC ซึ่งสร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์หรือสร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณมาทำหน้าที่เป็นวงจรหยุดแถบตามที่เราต้องการได้

ในอดีตที่ผ่านมา วงจรกรองหยุดแถบนิยมถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์โดยอาศัยตารางการแปลงต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำไปเป็นวงจรกรองความถี่กรองหยุดแถบ ยกตัวอย่างเช่น เราจะออกแบบและสร้างวงจรกรองหยุดแถบให้ทำงานรับส่งสัญญาณที่ย่านความถี่ 800 MHz ร่วมกับ 2.4 GHz เราจะได้วงจรหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์ LC ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 วงจรกรองหยุดแถบที่ทำจากอุปกรณ์แบบลัมพ์

ในทางปฏิบัติจริงนั้น การสร้างวงจรกรองหยุดแถบจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ไม่สามารถที่จะกระทำได้จริง เนื่องจากเราไม่สามารถหาค่าอุปกรณ์ดังกล่าวที่แม่นยำเพื่อใช้งานได้ตามที่ต้องการ อีกทั้ง เนื่องจากที่ย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น การใช้เรโซเนเตอร์แบบ RLC ที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์จะไม่เหมาะสมและมีความยุ่งยาก จึงมีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการนำส่วนหนึ่งของสายสัญญาณมาใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์แทน เหตุผลก็คือ เนื่องจากสายนำสัญญาณประกอบไปด้วยองค์ประกอบกระจาย สายนำสัญญาณที่มีความยาวขนาดต่างๆ โดยที่ปลายด้านหนึ่งของสายนำสัญญาณต่อโหลดแบบวงจรลัดหรือวงจรเปิดจึงถูกใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์ได้



ภาพที่ 2.6 วงจรเทียบเท่าที่ความยาวค่าต่างๆ ของสายนำสัญญาณแบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิด

จากหลักการดังกล่าว เมื่อพิจารณาทฤษฎีของสายนำสัญญาณ พบว่า ที่ความยาวค่าต่างๆ ของสายนำสัญญาณที่เปิดปลายสาย จะมีวงจรเทียบเท่าเป็นไปตามภาพที่ 2.6 ซึ่งเมื่อพิจารณาสายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$ แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิดจะถูกใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์ได้ โดยพบว่าจะเกิดการเรโซแนนซ์ที่มีคุณสมบัติเหมือนวงจรเรโซแนนซ์ RLC แบบอนุกรม

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างวงจรกรองออกมามากมาย แต่โดยส่วนใหญ่จะเน้นไปที่การนำเสนอและพัฒนาวงจรกรองผ่านแถบที่มีโครงสร้างใหม่และออกแบบยาก เพื่อให้มีคุณสมบัติการใช้งานที่ดีขึ้นตามที่ต้องการ มีบทความวิจัยน้อยมากที่นำเสนอวงจรกรองหยุดแถบ ยกตัวอย่างเช่น

C.-Y. Hsu *et al.*¹ ได้ออกแบบและสร้างวงจรกรองผ่านแถบสองความถี่บนแผ่นไมโครสตริปที่มีขนาดเล็กกะทัดรัดและแถบความถี่หยุดถูกปรับจูนได้ โดยสตับเปิด (Open Stub) ถูกนำมาใช้งานทำหน้าที่เป็นวงจรกรองหยุดแถบ (Bandstop Filter) เพื่อสร้างวงจรกรองผ่าน 2 ย่านความถี่ โดยกำหนดแถบความถี่หยุด (Rejection Band) อยู่ในช่วง 5 – 6 GHz

¹C.-Y. Hsu, H.-R. Chuang, and C.-Y. Chen. (2009). "Compact microstrip UWB dual-band bandpass filter with tunable rejection band." *J. of Electromagn. Waves and Appl.* pp. 617 – 626.

H.-Y. Anita Yim *et al.*¹ ได้นำเสนอหลักการในการสร้างวงจรกรองผ่านแถบที่ยอมให้ย่านความถี่ 900 MHz และ 2 GHz ผ่านไปได้ โดยใช้วงจรเรโซเนเตอร์และวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์ แต่มีขนาดใหญ่

จากผลการศึกษาที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะออกแบบและสร้างวงจรกรองหยุดแถบที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นวงจรกรองผ่านแถบที่มีโครงสร้างอย่างง่ายและสามารถรองรับการใช้งาน 2 ย่านความถี่ที่แยกห่างกันได้ โดยวงจรกรองหยุดแถบที่นำเสนอนี้ถูกสร้างขึ้นจากรีโซเนเตอร์ที่ทำจากสายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$ แบบวงจรเปิด (เรโซเนเตอร์หยุดแถบ) ร่วมกับวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์ (อ้างถึงเนื้อหาในหัวข้อที่ 2.2) โดยมีเป้าหมายในการออกแบบคือ ต้องมีโครงสร้างใหม่ ขนาดเล็กกะทัดรัด และมีคุณสมบัติการใช้งานที่ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำช่วง 800 – 900 MHz เพื่อที่จะสามารถทำงานรองรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ของ บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) และ ย่านความถี่สูงช่วง 2.3 – 2.7 GHz เพื่อที่จะสามารถทำงานรองรับระบบสื่อสารไร้สาย WiFi-2.45 GHz และ WiMAX-2.5 GHz ฯลฯ ได้ โดย 2 ย่านความถี่ใช้งานดังกล่าวนี้เป็นย่านความถี่ที่ใช้งานจริงในปัจจุบันและในอนาคตของประเทศไทย ที่ซึ่งยังไม่มีนักวิจัยท่านใดๆ นำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารและบทความเชิงวิชาการต่างๆ และยังไม่ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อขายและใช้งานจริงในประเทศไทย จึงไม่มีการเปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรนี้กับวงจรอื่นๆ ที่ปรากฏในวารสารและบทความเชิงวิชาการต่างๆ

¹ H.-Y. Anita Yim and K.-K. Michael Cheng. (2005, June). "Novel dual-band planar resonator and admittance inverter for filter design and applications." *IEEE MTT-S Int'* 2005. 4 pages.

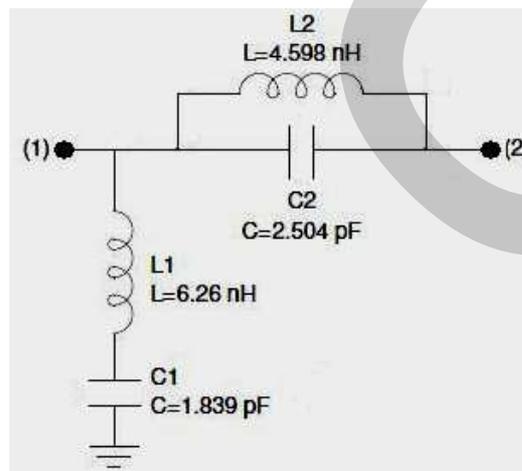
บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

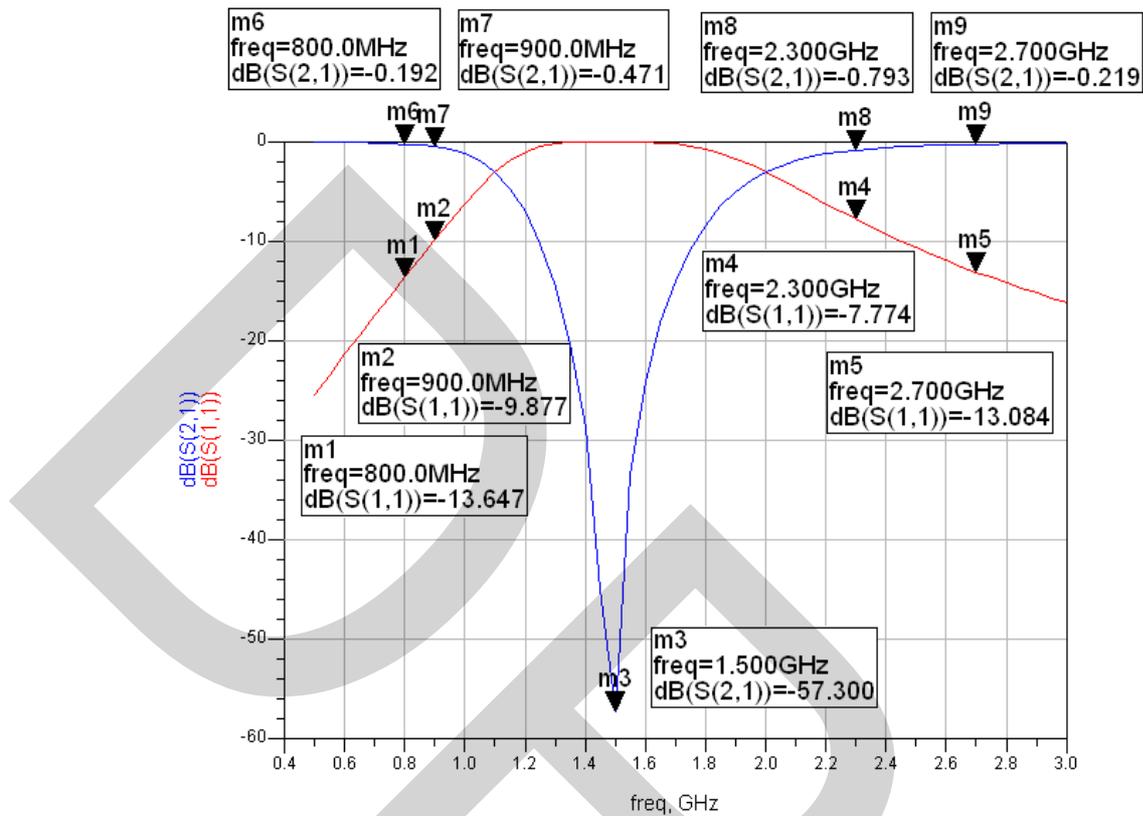
ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงหลักการและการออกแบบที่ละเอียดขึ้นตอน โดยเริ่มต้นจากหัวข้อที่ 3.1 ที่จะกล่าวถึงวงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ หลังจากนั้น หัวข้อที่ 3.2 จะกล่าวถึงวงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณยาว $\lambda/4$ แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิด หัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงการออกแบบเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีโครงสร้างใหม่และนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถรองรับการใช้งานที่ 2 ย่านความถี่ และคุณสมบัติในการใช้งานเป็นไปตามที่ต้องการได้ รายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

3.1 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์

ในอดีตที่ผ่านมา วงจรกรองหยุดแถบนิยมนำมาสร้างจากอุปกรณ์แบบลัมพ์โดยอาศัยตารางการแปลงต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำไปเป็นวงจรกรองความถี่กรองหยุดแถบ ยกตัวอย่างเช่น เราจะออกแบบและสร้างวงจรกรองหยุดแถบให้ทำงานรับส่งสัญญาณที่ย่านความถี่ 800 MHz ร่วมกับ 2.4 GHz เราจะได้วงจรหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์ LC ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์



ภาพที่ 3.2 ค่า Return Loss (S_{11}) และค่า Insertion Loss (S_{21}) ที่ได้จากการจำลองวงจรหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์

คุณสมบัติการทำงานที่ได้รับจากการจำลองวงจรหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์มีแสดงไว้ดังในภาพที่ 3.2 โดยค่า S_{11} (ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับหรือ Return Loss) และค่า S_{21} (ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับหรือ Return Loss) ที่ได้จากการจำลองของวงจรสรุปได้ดังนี้

(1) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า S_{11} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -13.647 dB และ -9.877 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า S_{11} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -7.774 dB และ -13.084 dB ตามลำดับ

(2) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า S_{21} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -0.192 dB และ -0.471 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า S_{21} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -0.793 dB และ -0.219 dB ตามลำดับ

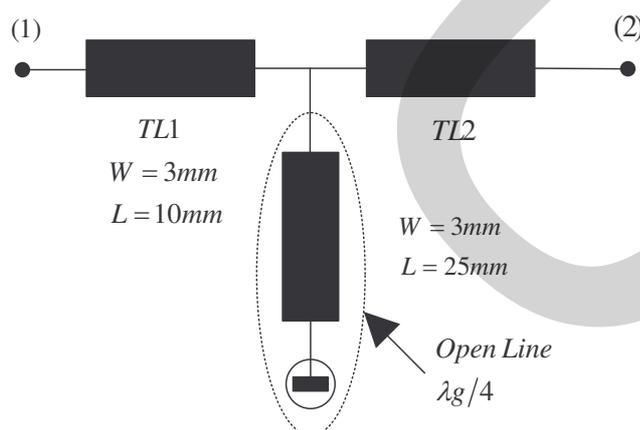
(3) ที่ความถี่ศูนย์กลางของการออกแบบวงจรหยุดแถบ 1.5 GHz พบว่า ค่า S_{21} มีค่าต่ำสุดตามต้องการ เท่ากับ -57.300 dB

ในทางปฏิบัติจริงนั้น การสร้างวงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ไม่สามารถที่จะกระทำได้อย่างแท้จริง เนื่องจากเราไม่สามารถหาค่าอุปกรณ์ดังกล่าวที่แม่นยำเพื่อใช้งานได้ตามที่ต้องการ อีกทั้ง เนื่องจากที่ย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น การใช้เรโซเนเตอร์แบบ RLC ที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์จะไม่เหมาะสมและมีความยุ่งยาก จึงมีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการนำส่วนหนึ่งของสายสัญญาณมาใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์แทน เหตุผลก็คือ เนื่องจากสายนำสัญญาณประกอบไปด้วยองค์ประกอบกระจาย สายนำสัญญาณที่มีความยาวขนาดต่างๆ โดยที่ปลายด้านหนึ่งของสายนำสัญญาณต่อโหลดแบบวงจรลัดหรือวงจรเปิดจึงถูกใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์ได้

3.2 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิด

จากหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.1 เมื่อพิจารณาทฤษฎีของสายนำสัญญาณ พบว่าสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิดจะถูกใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์ RLC แบบอนุกรม นั่นก็หมายความว่า เราสามารถออกแบบและสร้างวงจรกรองหยุดแถบที่ต้องการโดยใช้สายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิดได้

ในเบื้องต้นจะทำการออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรกรองหยุดแถบอย่างง่ายที่สร้างขึ้นจากการใช้สายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิด (ต่อไปนี้จะใช้คำว่า เรโซเนเตอร์หยุดแถบ แทน) เพียง 1 เส้นเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 3.3 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของวงจรที่ได้รับ

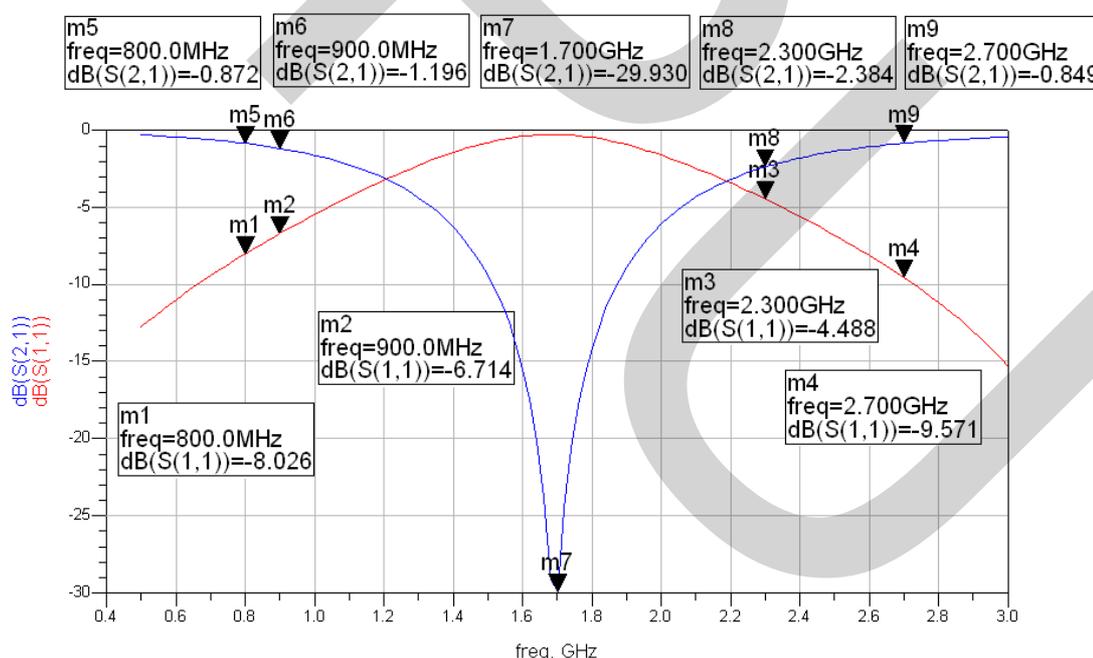


ภาพที่ 3.3 เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบเป็นวงจรเปิด

โดยในที่นี้ จะทำการออกแบบและสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีค่าความถี่ศูนย์กลางเพื่อหูดแถบเท่ากับ 1.65 GHz สำหรับแยกย่านความถี่ต่ำ 800 – 900 MHz ออกจากย่านความถี่สูงที่กำหนดคือ 2.3 - 2.7 GHz และทำการสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบนี้บนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่มีค่าความหนา h เท่ากับ 1.6 mm มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_r เท่ากับ 4.3 พบว่าจากการใช้คอนเน็กเตอร์ SMA 50 โอห์ม เราจะได้ค่าความกว้างของสตริปเท่ากับ 3 mm^1 และหาค่า λ_g ได้จากสมการดังนี้

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{3 \times 10^8}{1.65 \times 10^9 \times \sqrt{3.31}} = 100 \text{ mm} \quad (3.1)$$

เมื่อ $\lambda_0 = c/f$ เป็นค่าความยาวคลื่นในอากาศ, λ_g เป็นค่าความยาวคลื่นในแผ่นวงจรพิมพ์ และ ϵ_{eff} เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ คุณสมบัติการทำงานที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบเป็นวงจรเปิดเพียง 1 เส้นมีแสดงไว้ดังในภาพที่ 3.4 โดยค่า S_{11} และค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรสรุปได้ดังนี้



ภาพที่ 3.4 ค่า Return Loss (S_{11}) และค่า Insertion Loss (S_{21}) ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบเป็นวงจรเปิดเพียง 1 เส้น

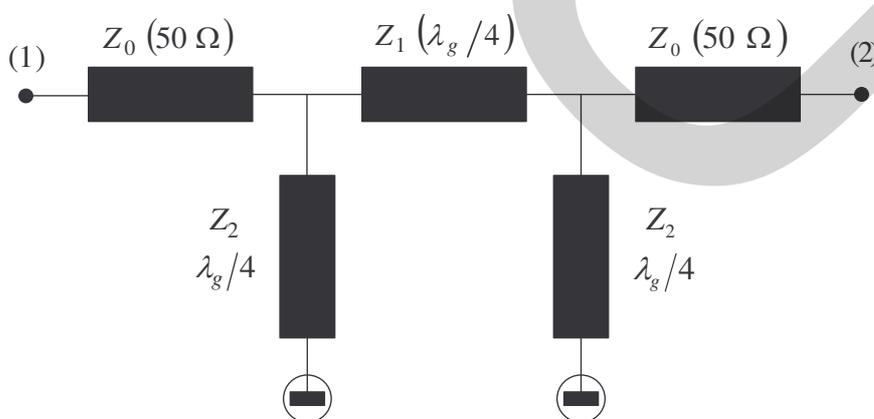
¹ C. Laohapensaeng, C. Free, and K.M. Lum. (2005, March). "Printed strip monopole antenna with the parasitic elements on the circular ground plane." *IWAT 2005*, pp. 371 - 374.

(1) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า S_{11} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -8.026 dB และ -6.714 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า S_{11} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -4.488 dB และ -9.571 dB ตามลำดับ

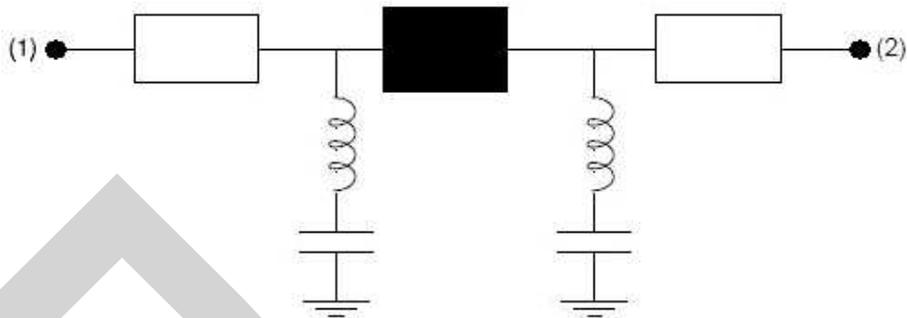
(2) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า S_{21} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -0.872 dB และ -1.196 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า S_{21} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -2.384 dB และ -0.849 dB ตามลำดับ และ ที่ความถี่ศูนย์กลางของการออกแบบวงจรกรองหยุดแถบ 1.7 GHz พบว่า ค่า S_{21} มีค่าต่ำสุดตามต้องการ เท่ากับ -29.930 dB

จากผลการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบเป็นวงจรเปิดเพียง 1 เส้นดังกล่าวพบว่า ค่า Return Loss (S_{11}) และค่า Insertion Loss (S_{21}) ที่ได้รับต่ำกว่า วงจรกรองหยุดแถบที่ทำจากอุปกรณ์แบบคัมป์ และค่าความถี่ศูนย์กลางมีการขยับออกไปจากเดิม 500 MHz แต่เนื่องจากวงจรเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบเป็นวงจรเปิดดังกล่าวเป็นโครงสร้างการออกแบบที่ง่ายกว่าและสามารถสร้างใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้น จึงทำการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างใหม่เพื่อให้มีผลตอบสนองเชิงความถี่หรือมีคุณสมบัติในการทำงานที่ดีขึ้น โดยอาศัยทฤษฎีที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.2 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างจากเรโซเนเตอร์ยาว $\lambda/4$ และอ้างถึงภาพที่ 2.4 วงจรเทียบเท่าสำหรับวงจรกรองหยุดแถบของภาพที่ 2.3 (a)

ซึ่งในที่นี้ จะทำการต่อสายนำสัญญาณขนาดความยาว $\lambda_g/4$ วางตัวแบบอนุกรมกับอินพุตและเอาต์พุตของวงจร (ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_1) และต่อเชื่อมสายนำสัญญาณขนาดความยาว $\lambda_g/4$ แบบขนานเข้าไปทางขวาของวงจรถัดก่อนจะส่งสัญญาณออกไปที่โหลดหรือเอาต์พุตของวงจร (ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_2) ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับภาพที่ 2.3 (a)



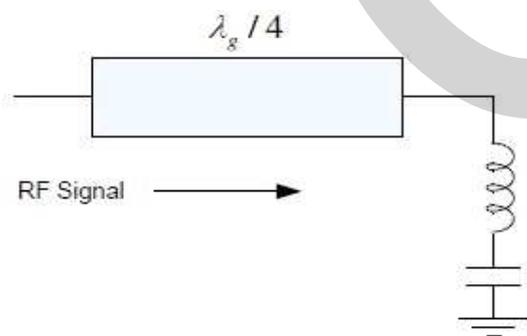
ภาพที่ 3.5 เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบเป็นวงจรเปิดที่เป็นโครงสร้างใหม่ที่ปรับปรุงให้ดีขึ้นจากภาพที่ 3.4



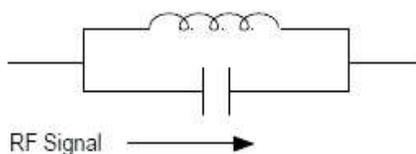
ภาพที่ 3.6 วงจรเทียบเท่าภาพที่ 3.5 ที่สร้างจากรีโซเนเตอร์และวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์

อ้างอิงวงจรเทียบเท่าของวงจรกรอดหยุดแถบที่สร้างจากรีโซเนเตอร์และวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์ดังในภาพที่ 2.4 (b) ทำให้ได้วงจรเทียบเท่าของภาพที่ 3.5 เป็นไปตามภาพที่ 3.6 กล่าวคือ สายนำสัญญาณขนาดความยาว $\lambda_g/4$ ที่วางตัวอยู่ตรงกลางระหว่างเรโซเนเตอร์ LC ที่ต่ออนุกรมกันทั้งสองด้านทำหน้าที่เป็นตัว J-Inverter โดยในที่นี้ เรโซเนเตอร์ LC ที่ต่ออนุกรมกันแต่ละด้านเปรียบเสมือนสวิตช์ที่ถูกเปิดวงจรและมีความยาวทางไฟฟ้า $\theta \approx 90^\circ$ ดังในภาพที่ 2.4 (a)

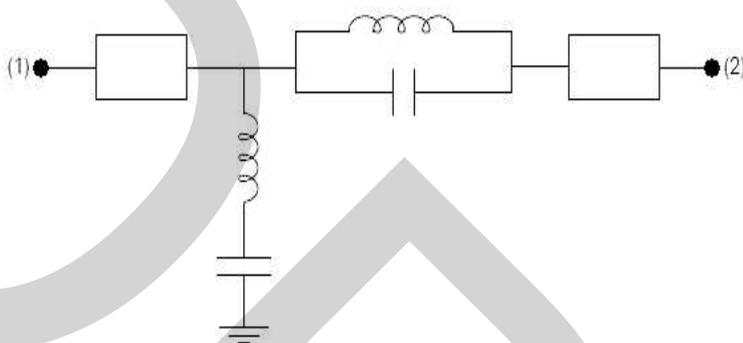
หลังจากนั้น อ้างถึงวงจรเทียบเท่าของวงจรกรอดหยุดแถบที่สร้างจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ดังในภาพที่ 2.4 (c) ทำให้ได้วงจรเทียบเท่าของภาพที่ 2.4 (b) เป็นไปตามภาพที่ 3.9 กล่าวคือ เมื่อสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งผ่านสายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ ที่ต่ออยู่กับโหลด (เรโซเนเตอร์ LC ที่ต่ออนุกรมกัน) ดังในภาพที่ 3.7 สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างกล่าวจะมองวงจรในภาพที่ 3.7 เสมือนเป็นเรโซเนเตอร์ LC ที่ต่อขนานกัน ดังในภาพที่ 3.8 โดยในที่นี้ เรโซเนเตอร์ LC ที่ต่อขนานกันนี้จะถูกมองว่าเป็น 1 บล็อกที่ต่ออนุกรมกับวงจร และ เรโซเนเตอร์ LC ที่ต่ออนุกรมกันอยู่จะถูกมองว่าต่อขนานกับวงจร เช่นเดียวกับ L_1C_1' และ L_2C_2' ดังในภาพที่ 2.4 (c) ตามลำดับ



ภาพที่ 3.7 สายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ ที่ต่ออยู่กับโหลด (เรโซเนเตอร์ LC ที่ต่ออนุกรมกัน)



ภาพที่ 3.8 วงจรเทียบเท่าภาพที่ 3.7 เสมือนเป็นเป็นเรโซเนเตอร์ LC ที่ต่อขนานกัน



ภาพที่ 3.9 วงจรเทียบเท่าภาพที่ 3.6 ที่ได้จากการใช้เรโซเนเตอร์และอาศัยวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์

จากหลักการออกแบบที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่า ภาพที่ 3.9 เป็นรูปวงจรเทียบเท่าของภาพที่ 3.6 กล่าวคือ เรโซเนเตอร์หุ้ดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ จำนวน 1 ท่อนที่วางอยู่ตรงกลางระหว่างสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิดที่วางตัวแบบขนานไว้ทั้ง 2 ด้านสามารถที่จะถูกมองเสมือนเป็นหรือมีวงจรเทียบเท่าเป็นวงจรกรองหุ้ดแถบที่สร้างจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ที่มีโครงสร้างเหมือนกับภาพที่ 3.1 ตามทฤษฎี

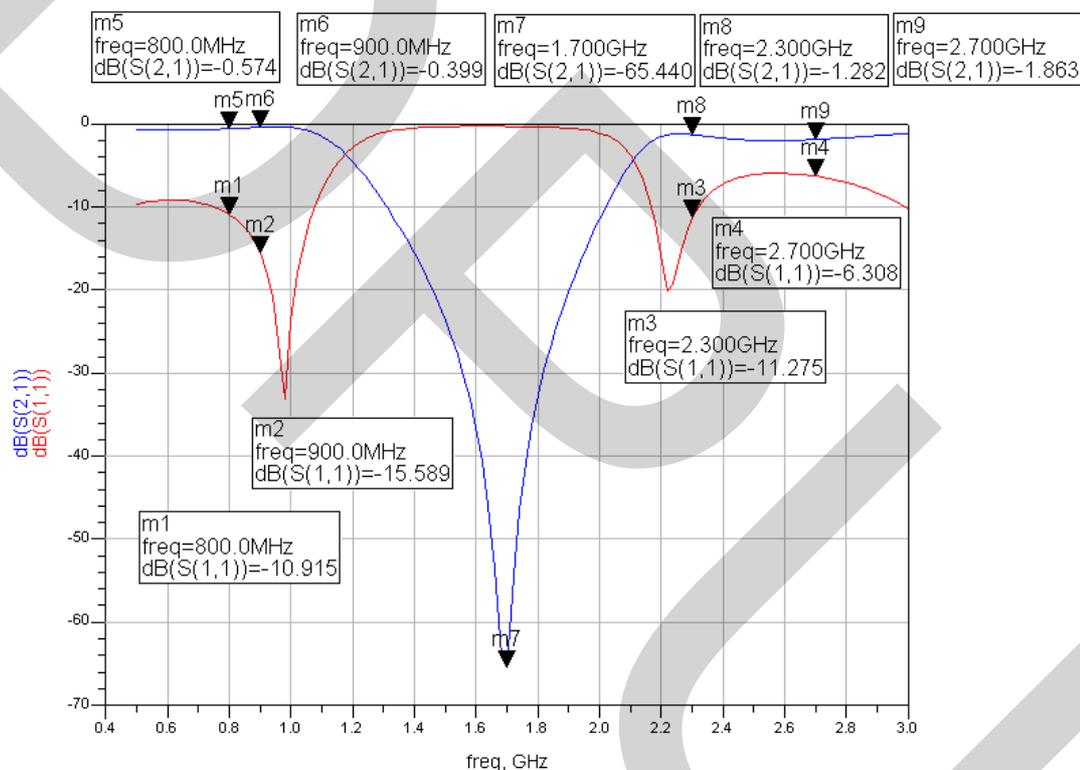
ในภาพที่ 3.10 แสดงคุณสมบัติการทำงานที่ได้รับจากการจำลองเรโซเนเตอร์หุ้ดแถบที่มีโครงสร้างใหม่ตามภาพที่ 3.6 พบว่า ค่า S_{11} และค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรสรุปได้ดังนี้

(1) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า S_{11} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -10.915 dB และ -15.589 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า S_{11} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -11.275 dB และ -6.308 dB ตามลำดับ

(2) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า S_{21} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -0.574 dB และ -0.399 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า S_{21} ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -1.282 dB และ -1.863 dB ตามลำดับ

(3) ที่ความถี่ศูนย์กลางของการออกแบบวงจรกรองหยุดแถบ 1.5 GHz พบว่า ค่า S_{21} มีค่าต่ำสุดตามต้องการ เท่ากับ -65.440 dB

จากผลการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ จำนวน 1 ท่อนที่วางอยู่ตรงกลางระหว่างสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิดที่วางตัวแบบขนานไว้ทั้ง 2 ด้านดังกล่าวพบว่า ค่า Return Loss (S_{11}) และค่า Insertion Loss (S_{21}) ที่ได้รับสอดคล้องเป็นอย่างดีกับวงจรเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมป์ และ ค่าความถี่ศูนย์กลางก็ยังคงขยับออกไปจากเดิม 500 MHz เช่นกัน



ภาพที่ 3.10 ค่า S_{11} และค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่ที่ได้รับเหมือนกับภาพที่ 3.6

หมายเหตุ เหตุผลที่กำหนดค่าความถี่ศูนย์กลางเท่ากับ 1.65 GHz คือ “ค่าความถี่ศูนย์กลาง 1.65 GHz นั้นเป็นค่าความถี่กลางที่เกิดขึ้นจากการออกแบบที่ต้องการหยุดแถบตั้งแต่ค่าความถี่ 1.1 GHz ไปจนถึง 2.2 GHz ส่วนย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 1.1 GHz และสูงกว่า 2.2 GHz ประมาณ 500 MHz นั้นเป็นย่านความถี่ผ่านแถบที่ต้องการออกแบบและปรับจูนเรโซเนเตอร์หยุดแถบ เพื่อที่ให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงตามที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้”

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงผลการจำลองและการวิเคราะห์สมรรถนะหรือคุณสมบัติในการทำงานของเรโซเนเตอร์หูดแถบแบนแผ่นวงจรมิโครเวฟโครงสร้างใหม่ที่มีขนาดความยาวและความกว้างค่าต่างๆ โดยในที่นี้ ขนาดและความยาวที่เหมาะสมที่สุดที่ให้คุณสมบัติในการทำงานที่ดีที่สุดจะถูกนำไปสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบโครงสร้างใหม่เพียงวงจรวัดเท่านั้นและถูกวัดค่าคุณสมบัติการทำงานจริง (Measurement Results) ได้แก่ ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss หรือ S_{11}) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion Loss หรือ S_{21}) เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้รับกับผลการทดสอบที่ได้จากการเขียนโปรแกรมจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบในทางทฤษฎี (Simulation Results)

หลักการที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบวงจรมิโครเวฟชนิดต่างๆ ขึ้นมาใช้งานนั้น ผู้วิจัยหรือผู้ที่ออกแบบจะต้องกำหนดค่าความถี่ที่ใช้งาน ค่าเป้าหมายหรือเกณฑ์ที่ใช้ในการบ่งชี้ถึงสมรรถนะการทำงานของวงจรมิโครเวฟนั้นๆ ขึ้นมาเสียก่อน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกำหนดค่าเป้าหมายต่างๆ ที่ต้องการจะได้รับจากเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีโครงสร้างใหม่และต้องการออกแบบเพื่อสร้าง ดังนี้

(1) รองรับการใช้งาน 2 ย่านความถี่ ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำ 800 – 900 MHz และย่านความถี่สูง 2.3 - 2.7 GHz (กำหนดแบนด์วิดธ์ -3 dB ไว้ที่แถบหูด 1.1 GHz – 2.2 GHz)

(2) ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss หรือ S_{11}) มีค่าต่ำกว่า -20 dB (ค่าลบยิ่งมาก จะทำงานได้ดีกว่า กล่าวคือ สัญญาณที่ส่งไปแทบจะสะท้อนกลับมาจากด้านอินพุตน้อยมากขึ้นเท่านั้น)

(3) ค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion Loss หรือ S_{21}) มีค่าไม่เกิน -1.5 dB (ค่าลบยิ่งน้อย จะทำงานได้ดีกว่า กล่าวคือ สัญญาณที่ส่งไปจะส่งผ่านจากอินพุตไปยังเอาต์พุตได้มากขึ้นเท่านั้น)

ในหัวข้อที่ 4.1 จะกล่าวถึงผลการจำลองและการวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หูดแถบโครงสร้างใหม่ที่มีขนาดความยาวและความกว้างค่าต่างๆ หัวข้อที่ 4.2 จะกล่าวถึง ขนาดความกว้างและความยาว ผลการทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานของ เรโซเนเตอร์หูดแถบ

โครงสร้างใหม่ที่นำเสนอ ซึ่งจะให้คุณสมบัติในการทำงานที่ดีที่สุดและให้สมรรถนะในการทำงานค่าต่างๆ เป็นไปตามค่าความถี่ใช้งานและค่าเป้าหมายที่ใช้งานที่กำหนด รายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

4.1 ผลการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความกว้างและความยาวค่าต่างๆ

จากการที่หัวข้อที่ 3.2 ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างและหลักการออกแบบเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีโครงสร้างแบบใหม่ที่นำเสนอไปแล้ว ดังนั้น ในหัวข้อที่ 4.1 นี้ เราจะนำหลักการดังกล่าวมาใช้และจำลองชิ้นงานขึ้นมาโดยอาศัยโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาเพื่อจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบในทางทฤษฎี

ในการจำลองชิ้นงานด้วยโปรแกรมเพื่อจำลองและวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานนั้น จะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่มที่ 1 กำหนดให้ TL2 (J-Inverter) มีค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 25 mm, 24 mm, และ 23 mm โดยในแต่ละค่าความยาวที่กำหนดนั้น จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของ TL2 (J-Inverter) จำนวน 4 ค่า ได้แก่ 3.0 mm, 2.7 mm, 2.3 mm, และ 1.9 mm

กลุ่มที่ 2 กำหนดให้ TL4 และ TL7 (สายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิด หรือ Open-Line Quarter Transmission Lines) มีค่าความกว้างที่เปลี่ยนแปลงจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 2.44 mm, 2.64 mm, และ 2.84 mm โดยในแต่ละค่าความกว้างที่กำหนดนั้น จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ยาวรวมกันจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 24.6 mm, 25.6 mm, 26.3 mm, และ 26.6 mm ส่วนค่าความกว้างและความยาวของ TL2 (J-Inverter) ที่เลือกใช้จะมีค่าคงที่ โดยถูกหาได้จากค่าความกว้างและความยาวที่เหมาะสมที่สุดและให้สมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุดค่าเดียวที่ได้รับจากการจำลองชิ้นงานกลุ่มที่ 1

หมายเหตุ ค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ใช้งานมีค่าเท่ากับ TL3 และ TL6 ตามลำดับ เนื่องจากเป็นสายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิดที่เหมือนกันดังที่กล่าวไว้ในทฤษฎีหัวข้อ 3.2

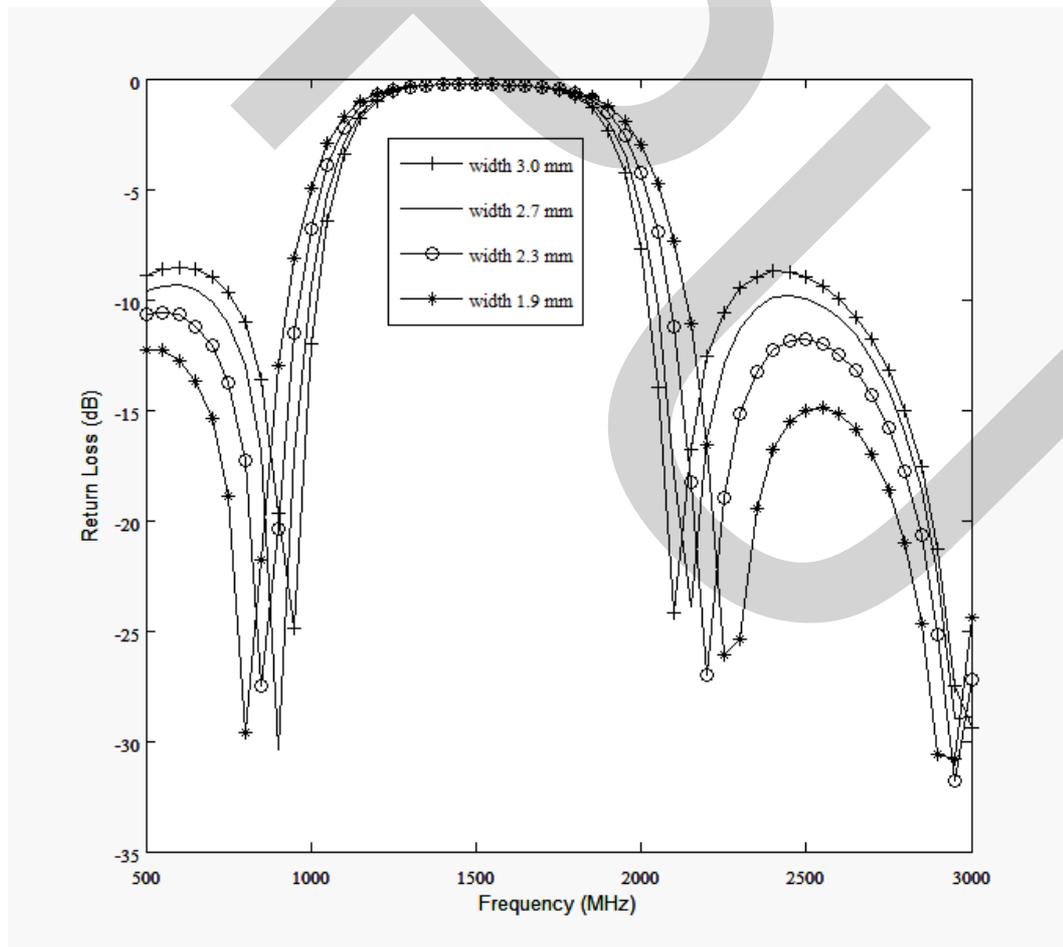
4.1.1 ผลการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่กลุ่มที่ 1

การจำลองชิ้นงานในหัวข้อแรกนี้เป็นการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่กลุ่มที่ 1 ดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งกำหนดให้ TL2 (J-Inverter) มีค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 25 mm, 24 mm, และ 23 mm โดยในแต่ละค่าความยาวที่กำหนดนั้น จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของ TL2 (J-Inverter) จำนวน 4 ค่า ได้แก่ 3.0 mm, 2.7 mm, 2.3

mm, และ 1.9 mm เพื่อที่จะทำการหาค่าความกว้างและความยาวของ TL2 (J-Inverter) ที่เหมาะสมที่สุดและให้สมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุดค่าเดียวท่ามกลางการจำลองและการวิเคราะห์ชิ้นงานกลุ่มที่ 1 โดยแต่ละกรณีมีรายละเอียดดังนี้

กรณีที่ 1 พิจารณาค่าความยาวของ TL2 มีค่าคงที่เท่ากับ 25 mm และค่าความกว้างของ TL2 มีค่าเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 3.0 mm, 2.7 mm, 2.3 mm, และ 1.9 mm จากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานตามค่าความกว้างและความยาวที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 1 จะได้ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (S_{11}) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (S_{21}) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ อีกทั้ง ตารางที่ 4.1 แสดงค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุดและแบนด์วิดท์ที่ใช้งานได้ ในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยพิจารณาที่ค่า S_{11} เท่ากับ -20 dB และตารางที่ 4.2 แสดงค่า S_{21} ที่สูงที่สุดและต่ำที่สุด

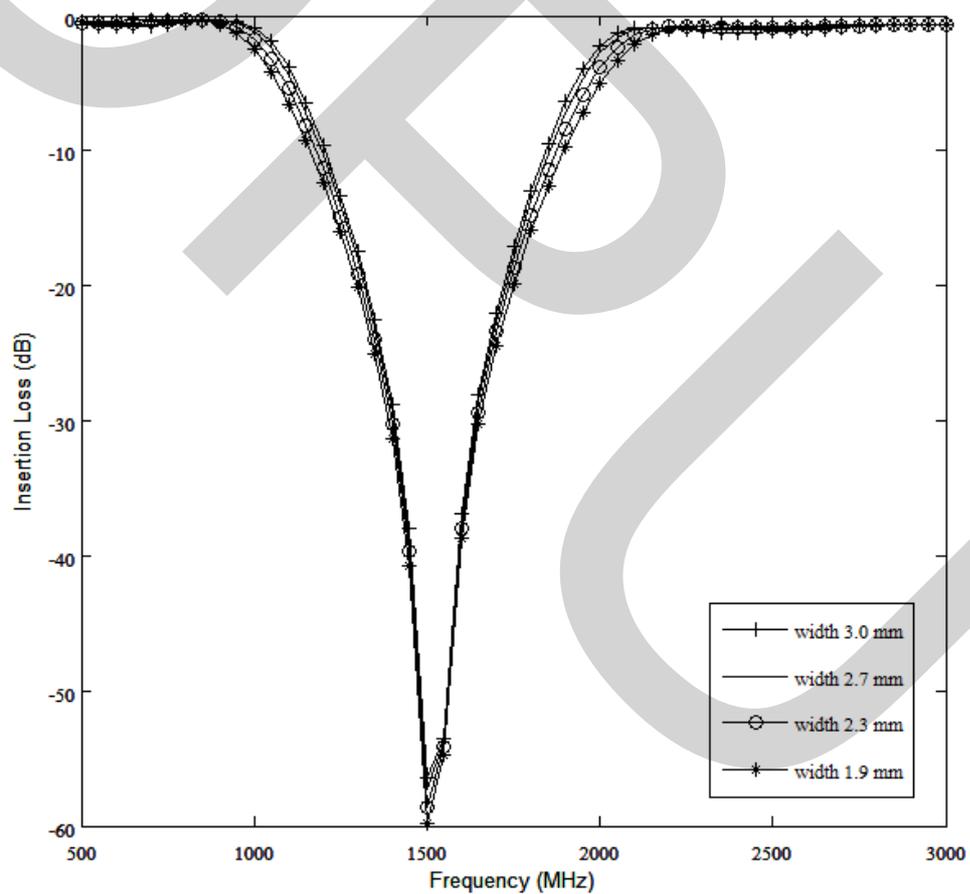
หมายเหตุ ในตารางผลการจำลองต่อไปนี้จะใช้สัญลักษณ์ – ในแต่ละตาราง ถ้าหากความยาวและความกว้างของสายนำสัญญาณที่เป็น โครงสร้างของเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีค่านั้นๆ ไม่สามารถใช้งานรองรับย่านความถี่ต่ำ 800 – 900 MHz และย่านความถี่สูง 2.3 – 2.7 GHz ที่ออกแบบได้



ภาพที่ 4.1 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 25 mm

ตารางที่ 4.1 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 25 mm

ความยาว TL2 (mm)	ความกว้าง TL2 (mm)	ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ช่วง 800 - 900 MHz (dB)	ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB)	แบนด์วิดธ์ที่ใช้ งานได้ช่วง 800 - 900 MHz (MHz)	แบนด์วิดธ์ที่ใช้ งานได้ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (MHz)
25	3	-18.5	-12	-	-
25	2.7	-30.5	-11.5	37.5	-
25	2.3	-27.5	-15	75	-
25	1.9	-29.5	-25.5	62.5	37.5



ภาพที่ 4.2 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 25 mm

ตารางที่ 4.2 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 25 mm

ความยาว TL2 (mm)	ความกว้าง TL2 (mm)	ค่า S_{21} ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ณ ย่าน ความถี่หยุดแถบ	ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz (dB)	ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB)
25	3	-60 dB @ 1.5 GHz	-0.4	-0.4
25	2.7	-58.5 dB @ 1.5 GHz	-0.5	-0.5
25	2.3	-57.5 dB @ 1.5 GHz	-0.6	-0.6
25	1.9	-57 dB @ 1.5 GHz	-0.7	-0.7

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 1 มีดังนี้

(1) ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 2.7 mm ให้ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -30.5 dB แต่ให้ค่า S_{11} มีค่ามากที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -11.5 dB ซึ่งจากการทดสอบหาค่าแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ 2 ย่านความถี่ที่กำหนด พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ในกรณีนี้สามารถรองรับการใช้งานเพียง 37.5 MHz จากย่านความถี่ต่ำออกแบบทั้งหมด 100 MHz ได้เท่านั้น ไม่สามารถรองรับการใช้งานในช่วงย่านความถี่สูงที่กำหนดได้

(2) ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 1.9 mm ให้ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุดรองขึ้นมา ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -29.5 dB แต่ให้ค่า S_{11} มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -25.5 dB โดยในที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับสามารถรองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ออกแบบได้ โดยมีค่าเท่ากับ 62.5 MHz และ 37.5 MHz ตามลำดับ

(3) ส่วนค่าแบนด์วิดธ์ในกรณีที่ค่าความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 3 mm และความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 2.3 mm พบว่า ทั้ง 2 กรณีนี้ไม่สามารถรองรับการใช้งานในช่วงย่านความถี่สูงที่กำหนดได้ จึงไม่เหมาะสมที่ใช้ค่าความกว้างของ TL2 ทั้ง 2 ค่านี้ไปใช้ในการสร้างเรโซเนเตอร์ที่น่าเสนาจริงในทางปฏิบัติ

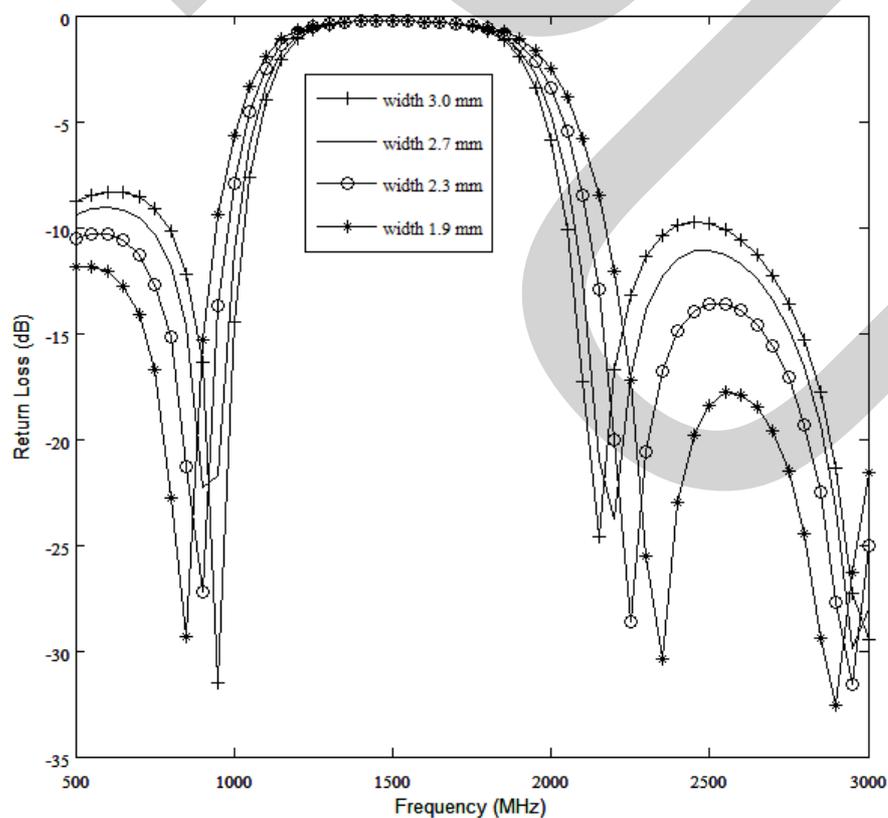
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 1.9 mm ให้ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุดรองขึ้นมา ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -29.5 dB แต่ให้ค่า S_{11} มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -25.5 dB โดยในที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับสามารถรองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ออกแบบได้ โดยสามารถรองรับการใช้งานในช่วงดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 62.5 MHz และ 37.5 MHz ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 1 มีดังนี้

(1) ค่าความกว้างของ TL2 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า S_{21} ที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน คือประมาณ 57 – 60 dB ที่ค่าความถี่ 1.5 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่หยุดแถบที่ออกแบบ กล่าวคือ ย่านความถี่ที่ไม่ต้องการแทบจะสะท้อนกลับหมด ไม่สามารถส่งออกไปที่เอาต์พุตของวงจรนี้ได้เลย

(2) ค่าความกว้างของ TL2 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz และช่วง 2.3 – 2.7 GHz ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 0.4 – 0.7 dB ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด

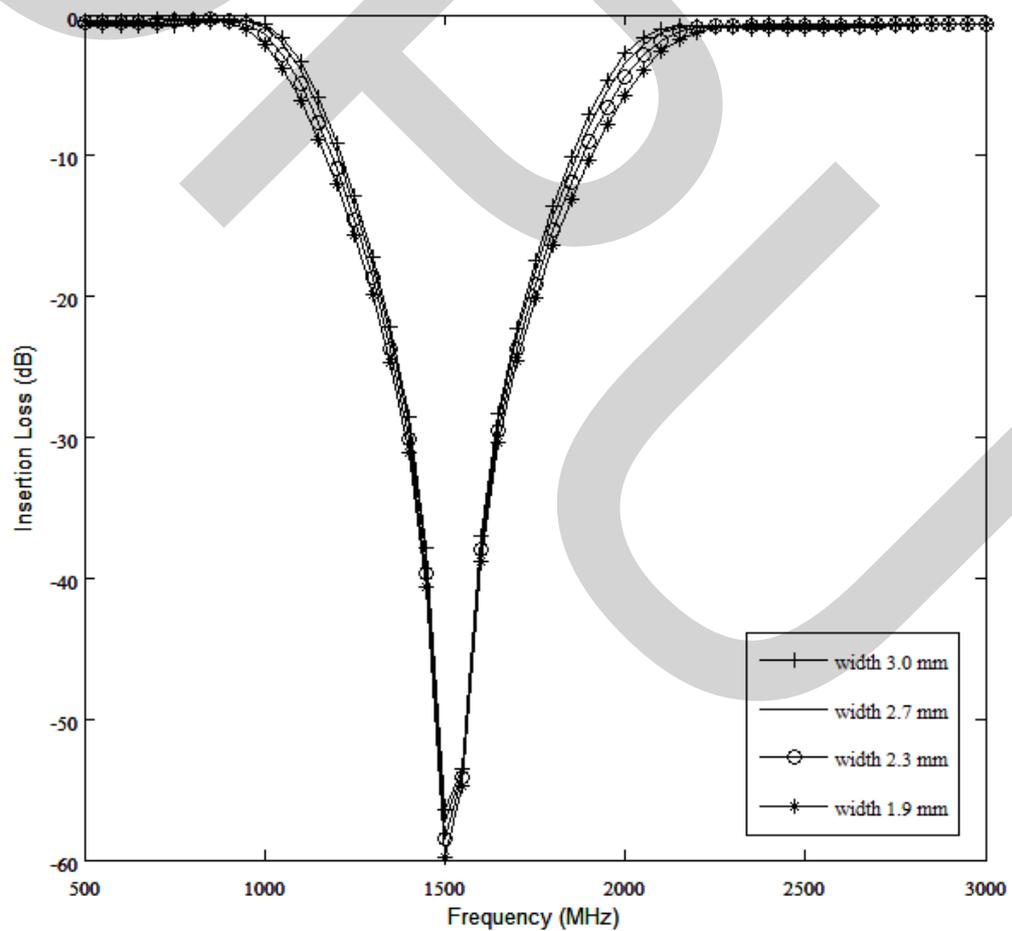
กรณีที่ 2 พิจารณาค่าความยาวของ TL2 มีค่าคงที่เท่ากับ 24 mm และค่าความกว้างของ TL2 มีค่าเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 3.0 mm, 2.7 mm, 2.3 mm, และ 1.9 mm จากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานตามค่าความกว้างและความยาวที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 จะได้ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (S_{11}) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (S_{21}) ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ อีกทั้ง ตารางที่ 4.3 แสดงค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุดและแบนด์วิดท์ที่ใช้งานได้ ในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยพิจารณาที่ค่า S_{11} เท่ากับ -20 dB และตารางที่ 4.4 แสดงค่า S_{21} ที่สูงที่สุดและต่ำที่สุด



ภาพที่ 4.3 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 24 mm

ตารางที่ 4.3 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 24 mm

ความยาว TL2 (mm)	ความกว้าง TL2 (mm)	ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ช่วง 800 - 900 MHz (dB)	ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB)	แบนด์วิดท์ที่ใช้ งานได้ช่วง 800 - 900 MHz (MHz)	แบนด์วิดท์ที่ใช้ งานได้ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (MHz)
24	3	-16.5	-12	-	-
24	2.7	-22	-13.3	20	-
24	2.3	-27	-20	66	-
24	1.9	-29.5	-30.5	105.3	131.6



ภาพที่ 4.4 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 24 mm

ตารางที่ 4.4 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 24 mm

ความยาว TL2 (mm)	ความกว้าง TL2 (mm)	ค่า S_{21} ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ณ ย่าน ความถี่หยุดแถบ	ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz (dB)	ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB)
24	3	-57 dB @ 1.5 GHz	-0.4	-0.4
24	2.7	-57.5 dB @ 1.5 GHz	-0.5	-0.5
24	2.3	-58.5 dB @ 1.5 GHz	-0.6	-0.6
24	1.9	-60 dB @ 1.5 GHz	-0.7	-0.7

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 1.9 mm ให้ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -29.5 dB และทำให้ค่า S_{11} มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูงเช่นกัน คือมีค่าเท่ากับ -30.5 dB โดยที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้รับสามารถรองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ออกแบบได้ โดยมีค่าเท่ากับ 105.3 MHz และ 131.6 MHz ตามลำดับ

(2) ส่วนค่าแบนด์วิดท์ในกรณีที่ค่าความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 3 mm, 2.7 mm และ 2.3 mm พบว่า ทั้ง 3 กรณีนี้ไม่สามารถรองรับการใช้งานในช่วงย่านความถี่สูงที่กำหนดได้ จึงไม่เหมาะสมที่ใช้ค่าความกว้างของ TL2 ทั้ง 3 ค่านี้ไปใช้ในการสร้างชิ้นงานที่นำเสนอในทางปฏิบัติ

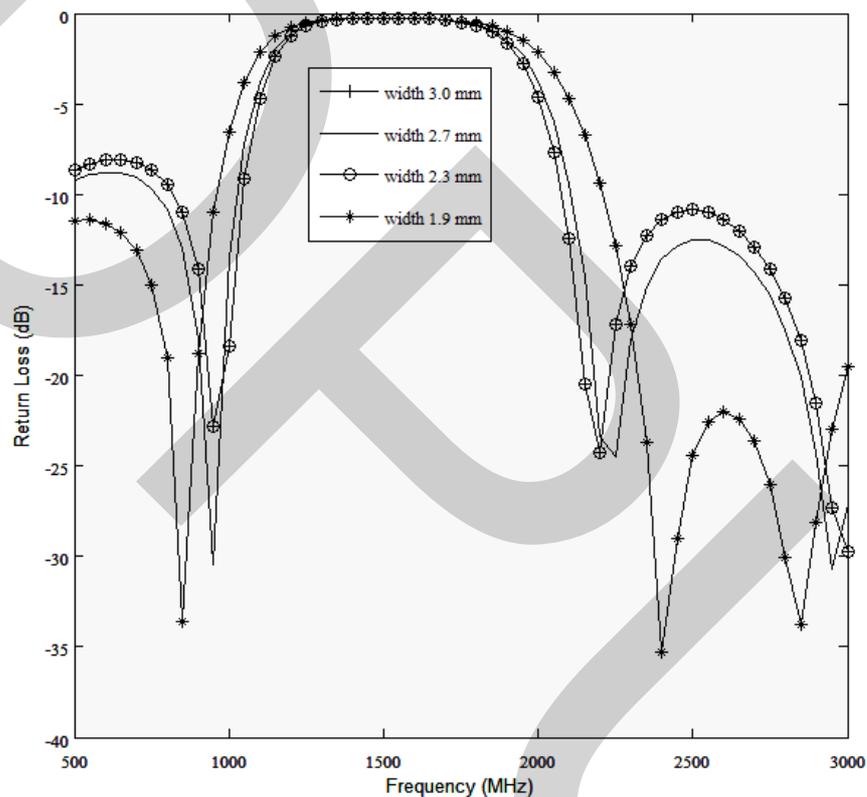
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 1.9 mm ให้ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -29.5 dB และ -30.5 dB ตามลำดับ อีกทั้ง รองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง เท่ากับ 105.3 MHz และ 131.6 MHz ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ค่าความกว้างของ TL2 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า S_{21} ที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน คือประมาณ 57 – 60 dB ที่ค่าความถี่ 1.5 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่หยุดแถบที่ออกแบบ กล่าวคือ ย่านความถี่ที่ไม่ต้องการแทบจะสะท้อนกลับหมด ไม่สามารถส่งออกไปที่เอาต์พุตของวงจรนี้ได้เลย

(2) ค่าความกว้างของ TL2 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz และช่วง 2.3 – 2.7 GHz ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 0.4 – 0.7 dB ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด

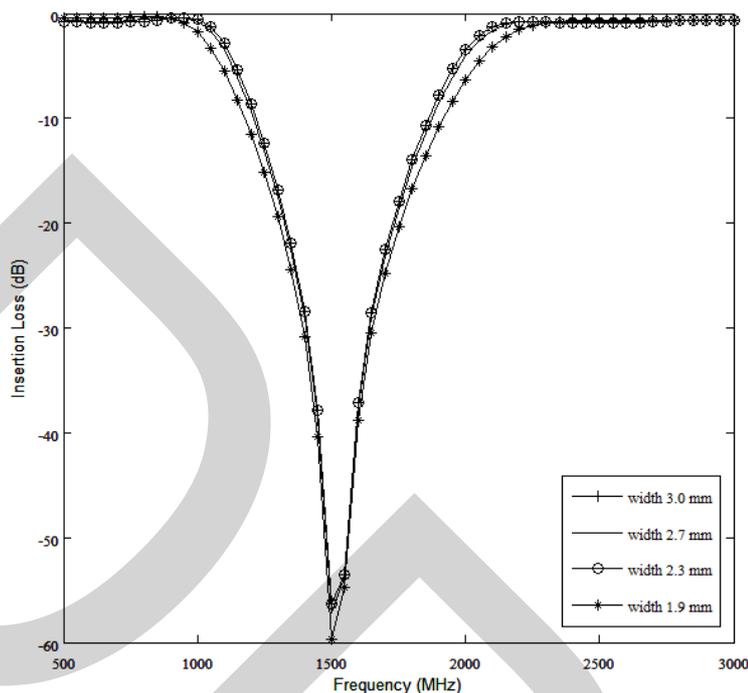
กรณีที่ 3 พิจารณาค่าความยาวของ TL2 มีค่าคงที่เท่ากับ 23 mm และค่าความกว้างของ TL2 มีค่าเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 3.0 mm, 2.7 mm, 2.3 mm, และ 1.9 mm จากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานตามค่าความกว้างและความยาวที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 จะได้ผลการจำลองค่า Return Loss และค่า Insertion Loss ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ อีกทั้ง ตารางที่ 4.5 แสดงค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุดและแบนด์วิดท์ที่ใช้งานได้ในช่วงความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยพิจารณาที่ค่า S_{11} เท่ากับ -20 dB และตารางที่ 4.6 แสดงค่า S_{21} ที่สูงที่สุดและต่ำที่สุด



ภาพที่ 4.5 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 23 mm

ตารางที่ 4.5 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 23 mm

ความยาว TL2 (mm)	ความกว้าง TL2 (mm)	ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ช่วง 800 - 900 MHz (dB)	ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB)	แบนด์วิดท์ที่ ใช้งานได้ช่วง 800 - 900 MHz (MHz)	แบนด์วิดท์ที่ ใช้งานได้ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (MHz)
23	3	-14.2	-14	-	-
23	2.7	-18.5	-18.5	-	-
23	2.3	-14.2	-14	-	-
23	1.9	-33.5	-35.5	87.5	375



ภาพที่ 4.6 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 23 mm

ตารางที่ 4.6 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 23 mm

ความยาว TL2 (mm)	ความกว้าง TL2 (mm)	ค่า S_{21} ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ณ ย่าน ความถี่หูดแถบ	ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz (dB)	ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB)
23	3	-57 dB @ 1.5 GHz	-0.2	-0.4
23	2.7	-57 dB @ 1.5 GHz	-0.3	-0.5
23	2.3	-57 dB @ 1.5 GHz	-0.4	-0.6
23	1.9	-59.5 dB @ 1.5 GHz	-0.5	-0.7

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 1.9 mm ให้ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -33.5 dB และทำให้ค่า S_{11} มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูงเช่นกัน คือมีค่าเท่ากับ -35.5 dB โดยที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้รับสามารถรองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ออกแบบได้ โดยมีค่าเท่ากับ 87.5 MHz และ 375 MHz ตามลำดับ

(2) ส่วนค่าแบนด์วิดธ์ในกรณีที่ค่าความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 3 mm, 2.7 mm และ 2.3 mm พบว่า ทั้ง 3 กรณีนี้ไม่สามารถรองรับการใช้งานใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนดได้ จึงไม่เหมาะสมที่ใช้ค่าความกว้างของ TL2 ทั้ง 3 ค่านี้ไปใช้ในการสร้างชิ้นงานที่นำเสนอในทางปฏิบัติ

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 1.9 mm ให้ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -33.5 dB และ -35.5 dB ตามลำดับ อีกทั้ง รองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง เท่ากับ 87.5 MHz และ 375 MHz ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ค่าความกว้างของ TL2 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า S_{21} ที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 57 – 59.5 dB ที่ค่าความถี่ 1.5 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอสามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่หยุดแถบที่ออกแบบ กล่าวคือ ย่านความถี่ที่ไม่ต้องการแทบจะสะท้อนกลับหมด ไม่สามารถส่งออกไปที่เอาต์พุตของวงจรนี้ได้เลย

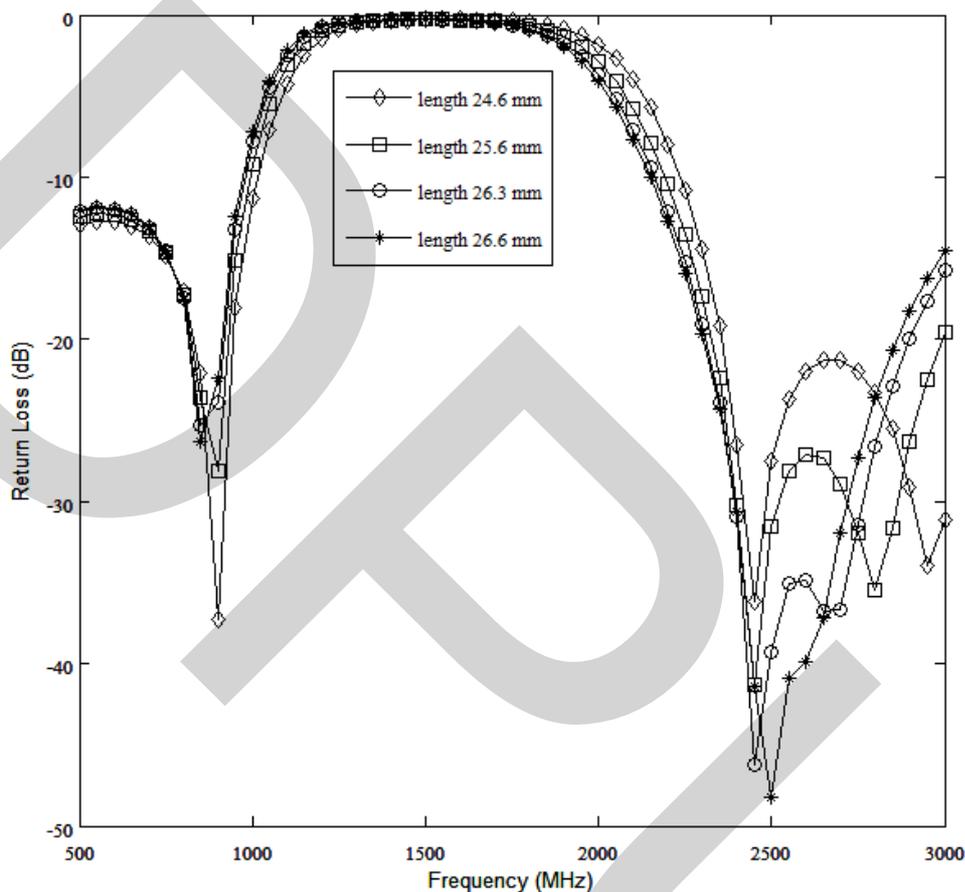
(2) ค่าความกว้างของ TL2 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 800 – 900 MHz และช่วง 2.3 – 2.7 GHz ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 0.2 – 0.7 dB ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอสามารถทำงานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด

4.1.2 ผลการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่กลุ่มที่ 2

การจำลองชิ้นงานในหัวข้อที่ 2 นี้เป็นการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่กลุ่มที่ 2 ดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งกำหนดให้ TL4 และ TL7 (สายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิด หรือ Open-Line Quarter Transmission Lines) มีค่าความกว้างที่เปลี่ยนแปลงจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 2.44 mm, 2.64 mm, และ 2.84 mm โดยในแต่ละค่าความกว้างที่กำหนดนั้น จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ยาวรวมกันจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 24.6 mm, 25.6 mm, 26.3 mm, และ 26.6 mm ส่วนค่าความกว้างและความยาวของ TL2 (J-Inverter) ที่เลือกใช้จะมีค่าคงที่ โดยถูกหาได้จากค่าความกว้างและความยาวที่เหมาะสมที่สุดและให้สมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุดค่าเดียวที่ได้รับจากการจำลองชิ้นงานกลุ่มที่ 1 โดยแต่ละกรณีมีรายละเอียดดังนี้

กรณีที่ 1 พิจารณาค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 มีค่าคงที่เท่ากับ 2.44 mm และค่าความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 24.6 mm, 25.6 mm, 26.3 mm, และ 26.6 mm จากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานตามค่าความกว้างและความยาวที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 จะได้ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (S_{11}) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (S_{21}) ดังแสดงในภาพที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ อีกทั้ง ตารางที่ 4.7 แสดงค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุดและ

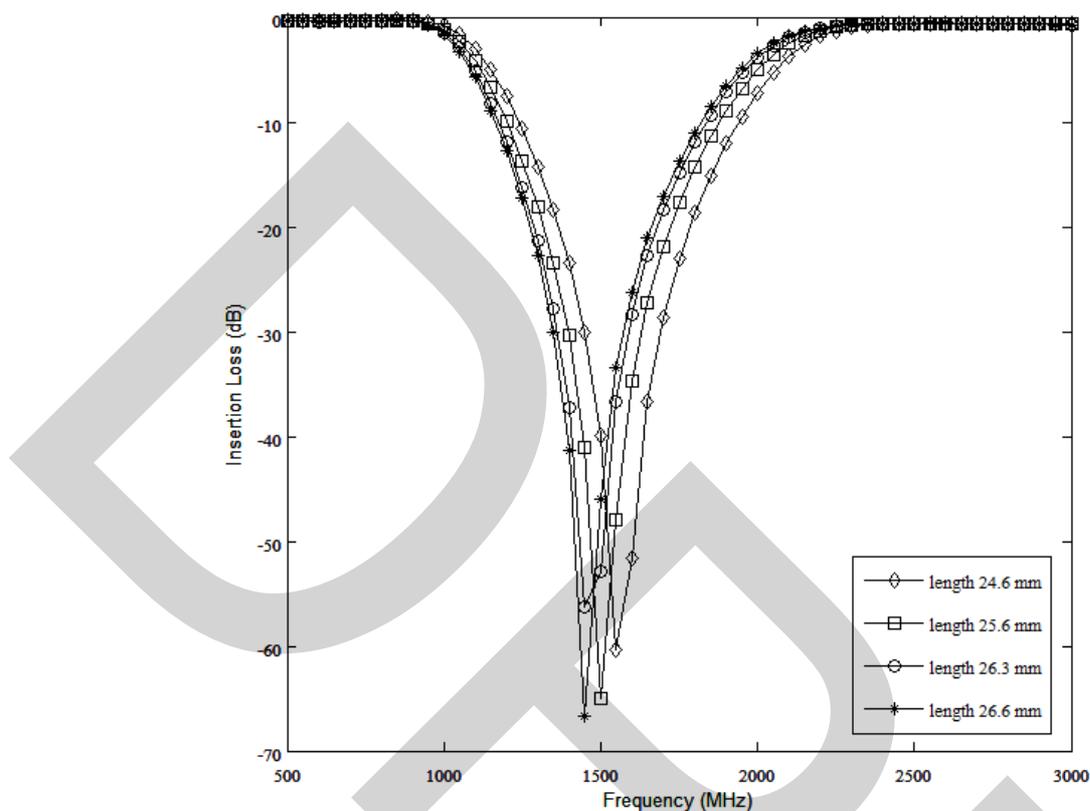
แบนด์วิดท์ที่ใช้งานได้ในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยพิจารณาที่ค่า S_{11} เท่ากับ -20 dB และ ตารางที่ 4.8 แสดงค่า S_{21} ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง และค่า S_{21} ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่หยุดแถบ



ภาพที่ 4.7 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.44 mm

ตารางที่ 4.7 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.44 mm

ความกว้าง TL4 และ TL7 (mm)	ความยาว TL4 และ TL7 (mm)	ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ช่วง 800 - 900 MHz (dB)	ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB)	แบนด์วิดท์ที่ใช้ งานได้ช่วง 800 - 900 MHz (MHz)	แบนด์วิดท์ที่ใช้ งานได้ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (MHz)
2.44	24.6	-37.5	-36.2	92	276
2.44	25.6	-28	-41.2	92	303
2.44	26.3	-25.5	-46.3	92	382
2.44	26.6	-26.5	-48.2	92	395



ภาพที่ 4.8 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.44 mm

ตารางที่ 4.8 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.44 mm

ความกว้าง TL4 และ TL7 (mm)	ความยาว TL4 และ TL7 (mm)	ค่า S_{21} ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ณ ย่าน ความถี่หูดแถบ	ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz (dB)	ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB)
2.44	24.6	-60 dB @ 1.55 GHz	-0.2	-0.4
2.44	25.6	-65 dB @ 1.5 GHz	-0.3	-0.5
2.44	26.3	-56 dB @ 1.45 GHz	-0.4	-0.6
2.44	26.6	-67 dB @ 1.45 GHz	-0.5	-0.7

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบกรณี
1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 24.6 mm ให้ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ณ ย่าน
ความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -37.5 dB แต่ให้ค่า S_{11} มีค่ามากที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -36.2

dB โดยที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้รับสามารถรองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ออกแบบได้ โดยมีค่าเท่ากับ 92 MHz และ 276 MHz ตามลำดับ

(2) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.6 mm ให้ค่า S_{11} ที่ต่ำปานกลาง ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -26.5 dB แต่ให้ค่า S_{11} มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -48.2 dB โดยที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้รับสามารถรองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ออกแบบได้ โดยมีค่าเท่ากับ 92 MHz และ 395 MHz ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

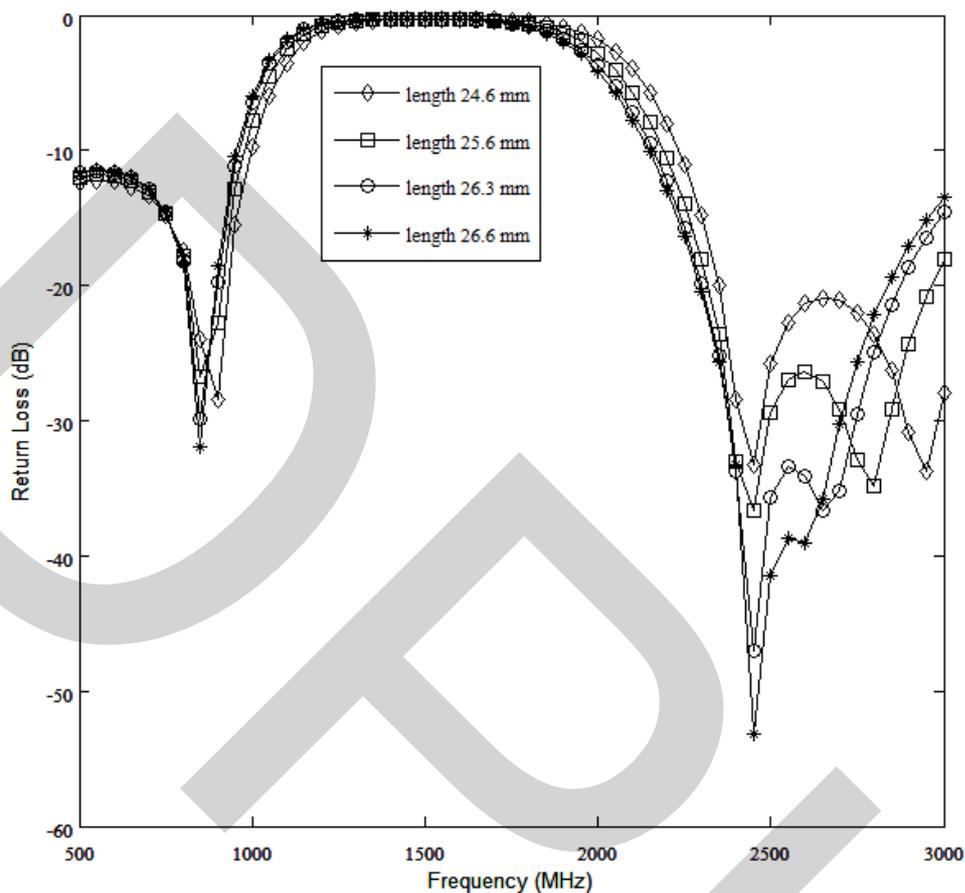
(1) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.6 mm ให้ค่า S_{21} ที่ต่ำที่สุดคือ -67 dB ที่ค่าความถี่ 1.45 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด

(2) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.3 mm ให้ค่า S_{21} ที่มากที่สุดคือ -56 dB ที่ค่าความถี่ 1.45 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด

(3) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz และช่วง 2.3 - 2.7 GHz ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 0.2 - 0.7 dB ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อกำหนดค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 2.44 mm และทำการเปลี่ยนค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าต่างๆ ตาม 4 กรณีข้างต้นที่กำหนด พบว่า คุณสมบัติในการทำงานของวงจรที่ทดสอบ ได้แก่ ค่า S_{11} ที่ย่านความถี่ต่ำและสูง, ค่า S_{21} ที่ย่านความถี่ต่ำและสูง และแบนด์วิดท์ที่รองรับการใช้งาน ณ ย่านความถี่ต่ำ ต่างก็ให้ค่าต่างๆ ที่ดีและใช้งานได้ใกล้เคียงกัน ยกเว้น ค่าแบนด์วิดท์ที่รองรับการใช้งาน ณ ย่านความถี่สูง

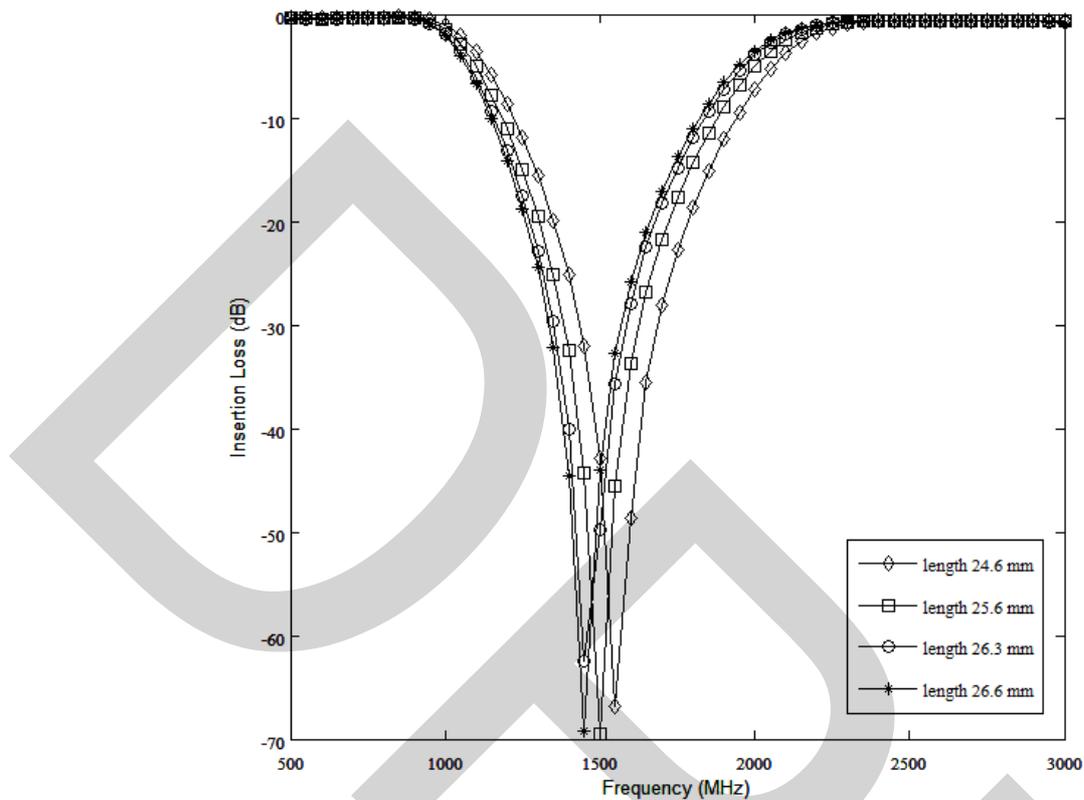
กรณีที่ 2 พิจารณาค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 มีค่าคงที่เท่ากับ 2.64 mm และค่าความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 24.6 mm, 25.6 mm, 26.3 mm, และ 26.6 mm จากการเขียนโปรแกรมจำลองขึ้นงานตามค่าความกว้างและความยาวที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 2 ของกลุ่มที่ 2 จะได้ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (S_{11}) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (S_{21}) ดังแสดงในภาพที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ อีกทั้ง ตารางที่ 4.9 แสดงค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด และแบนด์วิดท์ที่ใช้งานได้ทั้งในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยพิจารณาที่ค่า S_{11} เท่ากับ -20 dB และตารางที่ 4.10 แสดงค่า S_{21} ที่มากที่สุดทั้งในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง และค่า S_{21} ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่หยุดแถบ



ภาพที่ 4.9 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.64 mm

ตารางที่ 4.9 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หุุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.64 mm

ความกว้าง TL4 และ TL7 (mm)	ความยาว TL4 และ TL7 (mm)	ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ช่วง 800 - 900 MHz (dB)	ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB)	แบนด์วิดท์ที่ใช้ งานได้ช่วง 800 - 900 MHz (MHz)	แบนด์วิดท์ที่ใช้ งานได้ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (MHz)
2.64	24.6	-26	-33.5	92	355
2.64	25.6	-27	-37	92	388
2.64	26.3	-30	-47	99	395
2.64	26.6	-32	-53	92	395



ภาพที่ 4.10 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.64 mm

ตารางที่ 4.10 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.64 mm

ความกว้าง TL4 และ TL7 (mm)	ความยาว TL4 และ TL7 (mm)	ค่า S_{21} ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ณ ย่าน ความถี่หยุดแถบ	ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz (dB)	ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB)
2.64	24.6	-66.5 dB @ 1.55 GHz	-0.2	-0.4
2.64	25.6	-70 dB @ 1.5 GHz	-0.3	-0.5
2.64	26.3	-62.5 dB @ 1.45 GHz	-0.4	-0.6
2.64	26.6	-69 dB @ 1.45 GHz	-0.5	-0.7

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณี
1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.3 mm ให้ค่า S_{11} ที่มีค่าเกือบต่ำที่สุด ณ
ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -30 dB แต่ให้ค่า S_{11} มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -47

dB และให้ค่าแบนด์วิดธ์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่กว้างมากที่สุด เท่ากับ 99 dB และ 395 MHz ตามลำดับ

(2) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.6 mm ให้ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง คือ มีค่าเท่ากับ -32 dB และ -53 dB ตามลำดับ โดยในที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานเพื่อรองรับย่านความถี่ต่ำ มีค่าเท่ากับ 92 MHz ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับจากกรณีที่ TL4 และ TL7 มีค่าความยาวเท่ากับ 26.3 mm และค่าแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานเพื่อรองรับย่านความถี่สูง มีค่าเท่ากับ 395 MHz ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับจากกรณีที่ TL4 และ TL7 มีค่าความยาวเท่ากับ 26.3 mm

(3) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 24.6 mm และ 25.6 mm ให้ค่า S_{11} ที่มากที่สุดใกล้เคียงกัน ณ ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ -26.5 dB และ -35.25 dB ตามลำดับ อีกทั้ง ค่าแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานเพื่อรองรับย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 92 MHz และ ต่ำกว่า 388 MHz ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับจากกรณีที่ TL4 และ TL7 มีค่าความยาวเท่ากับ 26.3 mm

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 25.6 mm ให้ค่า S_{21} ที่ต่ำที่สุดคือ -70 dB ที่ค่าความถี่ 1.5 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด

(2) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.3 mm ให้ค่า S_{21} ที่มากที่สุดคือ -62.5 dB ที่ค่าความถี่ 1.45 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด

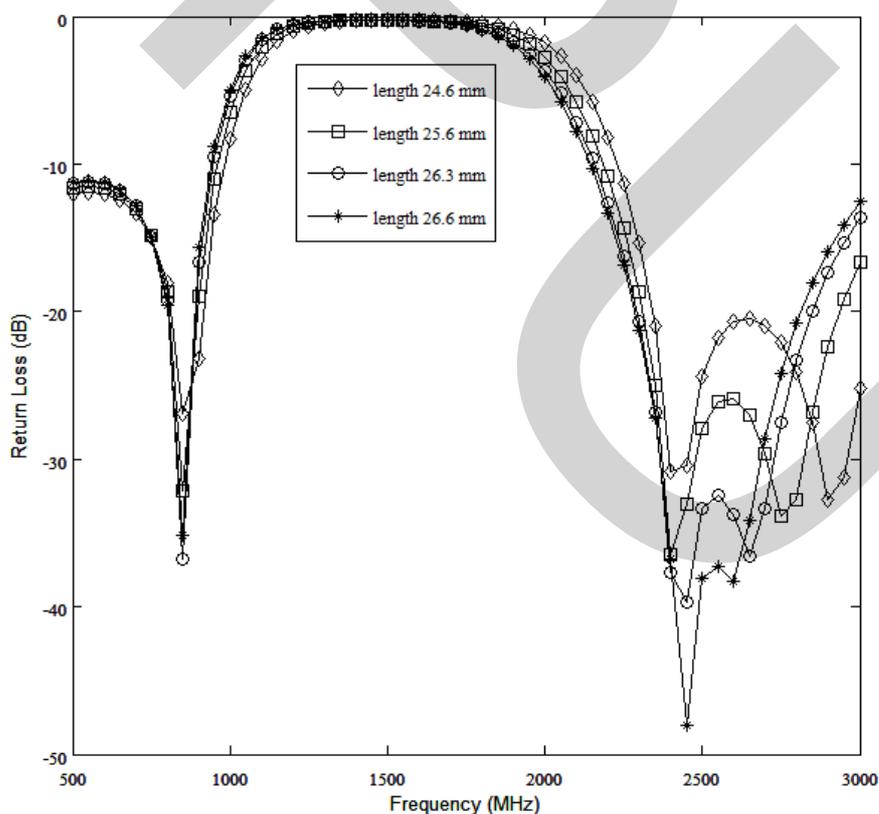
(3) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz และช่วง 2.3 - 2.7 GHz ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 0.2 - 0.7 dB ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า จากการจำลองชิ้นงาน เมื่อกำหนดให้ค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 2.64 mm และทำการเปลี่ยนค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าต่างๆ ตาม 4 กรณีข้างต้นที่กำหนด พบว่า ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.3 mm จะให้ค่า S_{11} ที่มีค่าเกือบต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -30 dB แต่ให้ค่า S_{11} มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -47 dB และให้ค่าแบนด์วิดธ์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่กว้างมากที่สุดเท่ากับ 99 dB และ 395 MHz ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า “ค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 2.64 mm และ 26.3 mm เป็นขนาดของสายนำสัญญาณยาว

$\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิดที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนำไปใช้ในการสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้”

ทั้งนี้ ค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ใช้งานมีค่าเท่ากับ TL3 และ TL6 ตามลำดับ เนื่องจากเป็นสายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิดที่เหมือนกันดังที่กล่าวไว้ในทฤษฎีหัวข้อ 3.2

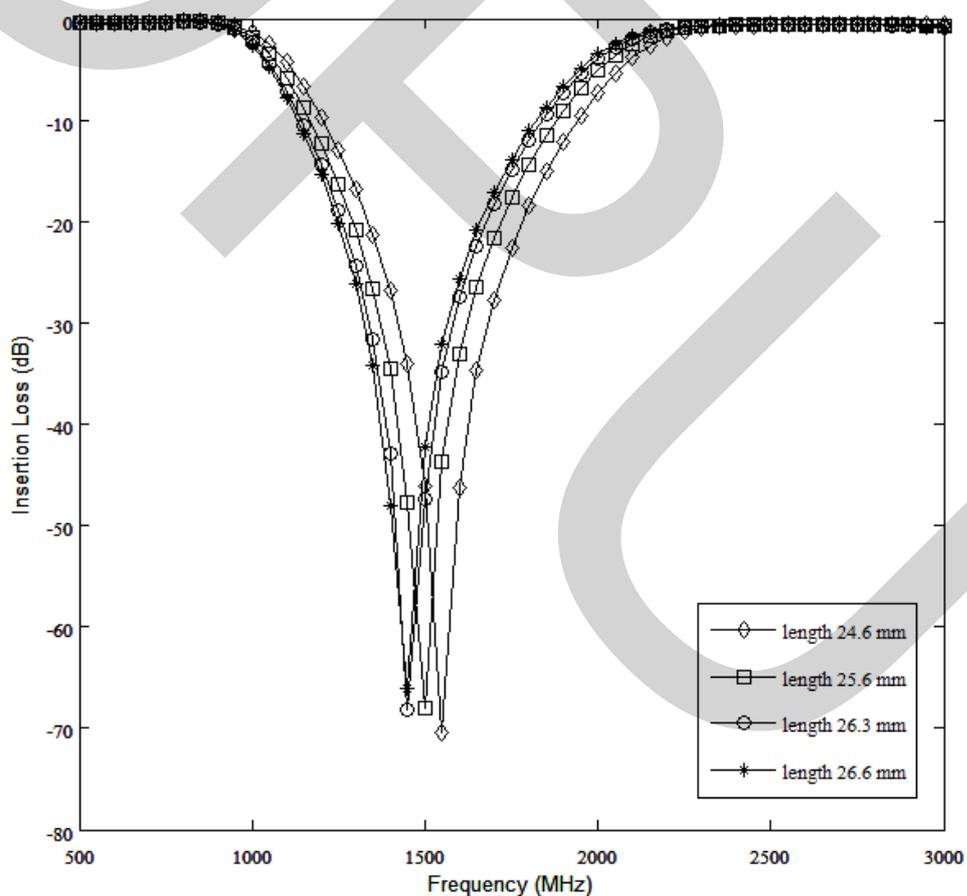
กรณีที่ 3 พิจารณาค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 มีค่าคงที่เท่ากับ 2.84 mm และค่าความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 24.6 mm, 25.6 mm, 26.3 mm, และ 26.6 mm จากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานตามค่าความกว้างและความยาวที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 3 ของกลุ่มที่ 2 จะได้ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (S_{11}) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (S_{21}) ดังแสดงในภาพที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ อีกทั้ง ตารางที่ 4.11 แสดงค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุดและแบนด์วิดท์ที่ใช้งานได้ในช่วงความถี่ต่ำและช่วงความถี่สูง โดยพิจารณาที่ค่า S_{11} เท่ากับ -20 dB และตารางที่ 4.12 แสดงค่า S_{21} ที่มากที่สุดในช่วงความถี่ต่ำและช่วงความถี่สูง และค่า S_{21} ที่ต่ำที่สุด ณ ช่วงความถี่หูดแถบ



ภาพที่ 4.11 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.84 mm

ตารางที่ 4.11 ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.84 mm

ความกว้าง TL4 และ TL7 (mm)	ความยาว TL4 และ TL7 (mm)	ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ช่วง 800 - 900 MHz (dB)	ค่า S_{11} ที่ต่ำที่สุด ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB)	แบนด์วิดท์ที่ใช้ งานได้ช่วง 800 - 900 MHz (MHz)	แบนด์วิดท์ที่ใช้ งานได้ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (MHz)
2.84	24.6	-37.5	-36.2	92	276
2.84	25.6	-28	-41.2	92	303
2.84	26.3	-25.5	-46.3	92	382
2.84	26.6	-26.5	-48.2	92	395



ภาพที่ 4.12 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.84 mm

ตารางที่ 4.12 ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.84 mm

ความกว้าง TL4 และ TL7 (mm)	ความยาว TL4 และ TL7 (mm)	ค่า S_{21} ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ณ ย่าน ความถี่หยุดแถบ	ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz (dB)	ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB)
2.84	24.6	-60 dB @ 1.55 GHz	-0.2	-0.4
2.84	25.6	-65 dB @ 1.5 GHz	-0.3	-0.5
2.84	26.3	-56 dB @ 1.45 GHz	-0.4	-0.6
2.84	26.6	-67 dB @ 1.45 GHz	-0.5	-0.7

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 24.6 mm ให้ค่า S_{11} ที่มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -37.5 dB แต่ให้ค่า S_{11} มีค่ามากที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -36.2 dB นอกจากนี้ ยังให้ค่าแบนด์วิดท์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่สูงที่แคบที่สุดเท่ากับ 276 MHz เท่านั้น

(2) ส่วนที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.6 mm ให้ค่า S_{11} ที่มากที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -26.5 dB แต่ให้ค่า S_{11} มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูง เท่ากับ -48.2 dB นอกจากนี้ ยังให้ค่าแบนด์วิดท์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่สูงที่กว้างมากที่สุดเท่ากับ 395 MHz ซึ่งเป็นค่าแบนด์วิดท์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่สูงที่มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากการที่ TL4 และ TL7 มีความยาวค่าอื่นๆ แต่ให้ค่าแบนด์วิดท์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่ต่ำที่พอๆ กับกรณีอื่นๆ คือเท่ากับ 92 MHz

แต่ทั้งนี้ ผลการจำลองในกรณีนี้ก็ด้อยกว่ากรณีที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.3 mm (ข้อที่ 1 ที่กล่าวไว้ข้างต้น) ซึ่งให้ค่า S_{11} ณ ย่านความถี่ต่ำที่ดีกว่า คือ มีค่าเท่ากับ -30 dB และให้ค่าแบนด์วิดท์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่ต่ำที่กว้างกว่า คือมีค่าเท่ากับ 99 dB ซึ่งแสดงให้เห็นว่า “ค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 2.64 mm และ 26.3 mm ยังคงเป็นขนาดของสายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิดที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนำไปใช้ในการสร้างเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้”

(3) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 25.6 mm และ 26.3 mm ให้ค่า S_{11} ที่มีค่าต่ำปานกลาง ณ ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ -26.75 dB และ -43.75 dB ตามลำดับ ค่าแบนด์วิดท์ที่ใช้งานเพื่อรองรับย่านความถี่ต่ำที่เท่ากัน คือมีค่าเท่ากับ 92 MHz แต่ให้ค่า

แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานเพื่อรองรับย่านความถี่สูงที่แตกต่างกันเท่ากับ 79 MHz ซึ่งคุณสมบัติในการใช้งานที่ได้รับจากการกำหนดค่าความยาว TL4 และ TL7 ในกรณีนี้ให้ผลการใช้งานที่ด้อยกว่ากรณีที่มีความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.3 mm (ข้อที่ 1 ที่กล่าวไว้ข้างต้น) ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.6 mm ให้ค่า S_{21} ที่ต่ำที่สุดคือ -67 dB ที่ค่าความถี่ 1.45 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด ส่วนที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 24.6 mm ให้ค่า S_{21} ที่มากที่สุดคือ -60 dB ที่ค่าความถี่ 1.55 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด นอกจากนี้ ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า S_{21} ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz และช่วง 2.3 - 2.7 GHz ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 0.2 - 0.7 dB ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า จากการจำลองใช้งานเมื่อกำหนดให้ค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 2.84 mm และทำการเปลี่ยนค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าต่างๆ ตาม 4 กรณีข้างต้นที่กำหนด (กรณีที่ 3) พบว่า ค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 2.84 mm ให้คุณสมบัติในการใช้งานต่างๆ ทั้งหมดที่ด้อยกว่ากรณีที่ใช้ค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 2.64 mm (กรณีที่ 2) ทั้งนี้ผลการทดสอบที่มีผลกระทบต่อการทำงานของเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอ เมื่อทำการปรับค่าความกว้างและความยาวของสายนำสัญญาณแต่ละเส้นมีแสดงไว้ในตารางที่ 4.13 โดยบทสรุปและการวิเคราะห์ผลการจำลองและทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอที่มีความกว้างและความยาวค่าต่างๆ กล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

(1) ค่าความยาวและความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 23 mm และ 1.9 mm ตามลำดับ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ทำให้เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอสามารถใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและสูงที่กำหนดได้ เมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างและความยาวค่าอื่นๆ (การทดสอบกลุ่มที่ 1 กรณีที่ 3)

(2) หลังจากนั้น เมื่อกำหนดค่าความยาวและความกว้างของ TL2 (J-Inverter) มีค่าคงที่ คือมีค่าเท่ากับ 23 mm และ 1.9 mm ตามลำดับ แล้ว จะทำการทดลองเปลี่ยนค่าความกว้างและค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าต่างๆ พบว่า ค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 2.64 mm และ 26.3 mm ตามลำดับ ให้สมรรถนะการทำงานที่ดีและเป็นไปตามเกณฑ์

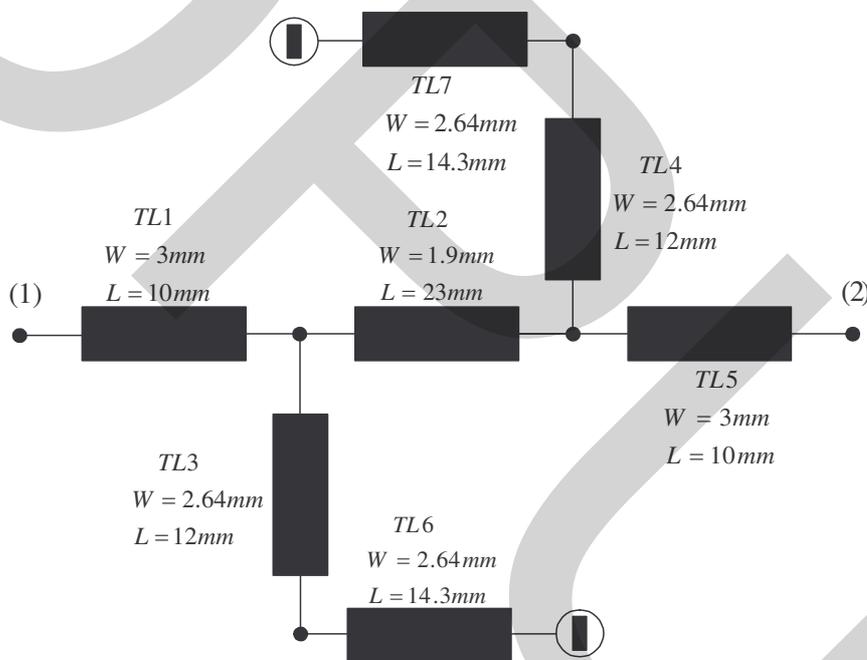
(3) สรุปได้ว่า “ค่าความยาวและความกว้างของ TL2 (J-Inverter) มีค่าเท่ากับ 23 mm และ 1.9 mm ตามลำดับ รวมถึงค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 (TL3 และ TL6) มีค่าเท่ากับ 2.64 mm และ 26.3 mm ตามลำดับ จึงเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการสร้างและทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอมากที่สุด”

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบที่มีต่อการทำงานเมื่อปรับความกว้างและความยาวของสายนำสัญญาณ

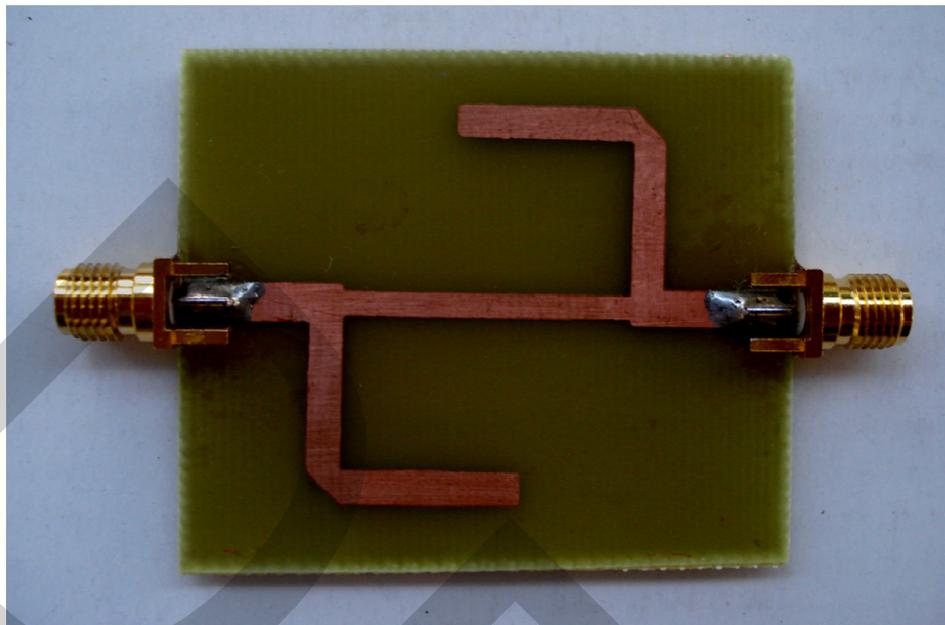
หมายเลขของสายนำสัญญาณ	หน้าที่ของสายนำสัญญาณ	ผลการทดสอบและผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติในการทำงานของเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอ
TL2	J-Inverter	ควรจะออกแบบให้มีขนาดความกว้างที่น้อยกว่าสายป้อนสัญญาณ 3 มม. มากๆ และชดเชยโดยใช้ความยาวที่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี 25 มม. เพื่อให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ ณ ย่านความถี่ต่ำและสูงที่ออกแบบได้เหมาะสมและดีที่สุด โดยค่าความกว้างและความยาวของ TL2 ที่ได้รับจากการทดสอบและนำไปใช้ในการออกแบบมีค่าเท่ากับ 1.9 มม. และ 23 มม. ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าจะสอดคล้องกับค่า LC ที่ขนานกันในวงจรลัมป์ เพราะค่าตัวเลขของ L ที่ใช้มีค่าใกล้เคียงกับค่าตัวเลขของ C จึงทำให้สตริปมีความกว้างที่ลดลงมาก และยาวลดลง ที่ซึ่งแสดงไว้ในวงจรสมบูรณรูปที่ 2 ของบทความวิจัย C.-Y. Hsu ¹
TL4 และ TL7 (มีค่าเท่ากับ TL3 และ TL6 ตามลำดับ)	สายนำสัญญาณแบบวงจรเปิดที่ยาวเท่ากับ $\lambda/4$	ควรจะออกแบบให้มีขนาดความกว้างที่น้อยกว่าสายป้อนสัญญาณ 3 มม. เพียงเล็กน้อยและชดเชยโดยใช้ความยาวที่มากขึ้นกว่าค่าที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี 25 มม. เพื่อให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ ณ ย่านความถี่ต่ำและสูงที่ออกแบบได้เหมาะสมและดีที่สุด โดยค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ได้รับจากการทดสอบและนำไปใช้ในการออกแบบมีค่าเท่ากับ 2.64 มม. และ 26.3 มม. ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าจะสอดคล้องกับค่า LC ที่อนุกรมกันในวงจรลัมป์ เพราะค่าตัวเลขของ L ที่ใช้มีค่ามากกว่า C จึงทำให้สตริปมีความกว้างที่น้อยแต่ยาวที่ซึ่งแสดงไว้ในวงจรสมบูรณรูปที่ 2 ของบทความวิจัย C.-Y. Hsu ¹

¹C.-Y. Hsu, et. al. H.-R. Chuang and C.-Y. Chen. (2009). "Compact microstrip UWB dual-band bandpass filter with tunable rejection band." *J. of Electromagn. Waves and Appl.* pp. 617 – 626.

หลังจากที่ได้ทำการจำลองชิ้นงานและได้ทราบค่าความกว้างและความยาวที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบที่นำเสนอ ดังแสดงในภาพที่ 4.13 แล้ว จึงนำค่าความกว้างและความยาวเหล่านี้ไปสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบที่นำเสนอจริงบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่มีความหนาเป็น h มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเป็น ϵ_r และมีกราวด์เพลนอยู่ด้านล่างของเรโซเนเตอร์หูดแถบ ซึ่งกราวด์เพลนของเรโซเนเตอร์หูดแถบก็เป็นกราวด์เพลนเดียวกับวงจรอื่นๆ ของอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาทั่วไป ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 เนื่องจาก FR-4 เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย อีกทั้งเรโซเนเตอร์หูดแถบนี้มีความถี่ใช้งานไม่เกิน 3 – 4 GHz จึงทำให้สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ได้ โดยภาพถ่ายของเรโซเนเตอร์หูดแถบที่นำเสนอแสดงไว้ในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.13 ขนาดความกว้างและความยาวของเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอ



ภาพที่ 4.14 ภาพถ่ายของเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่สร้างขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4

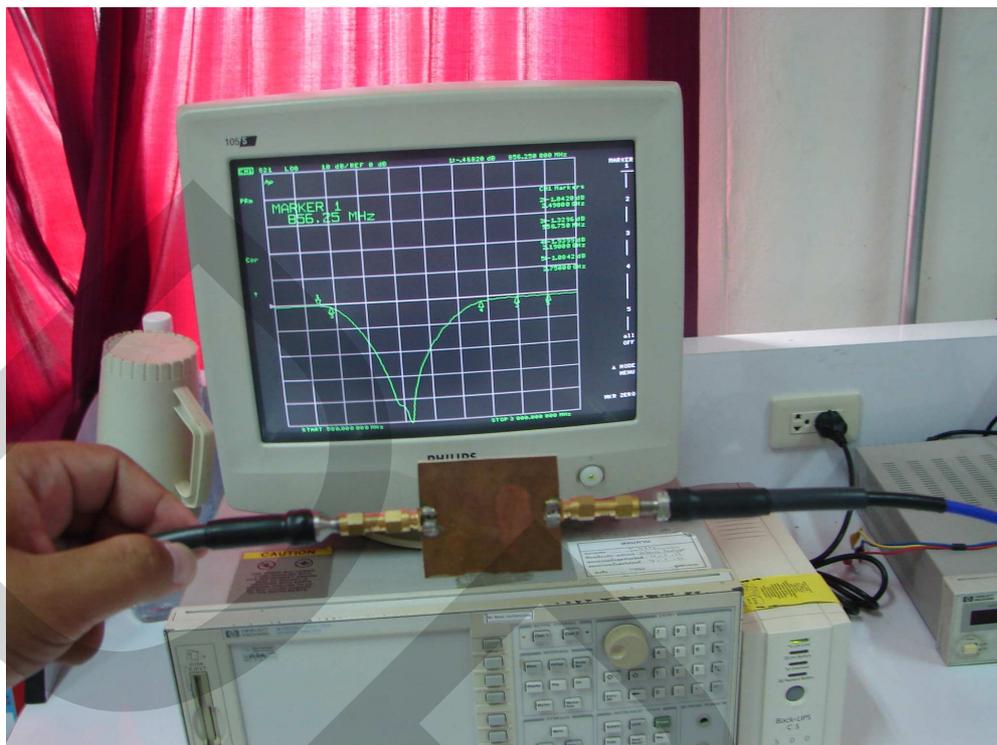
4.2 ผลการจำลองและทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองและทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอและให้คุณสมบัติการทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ โดยมีขนาดความกว้างและความยาวค่าต่างๆ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.13 เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่สร้างเสร็จแล้วดังในภาพที่ 4.14 จะถูกวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการทำงานของเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอ ดังนี้

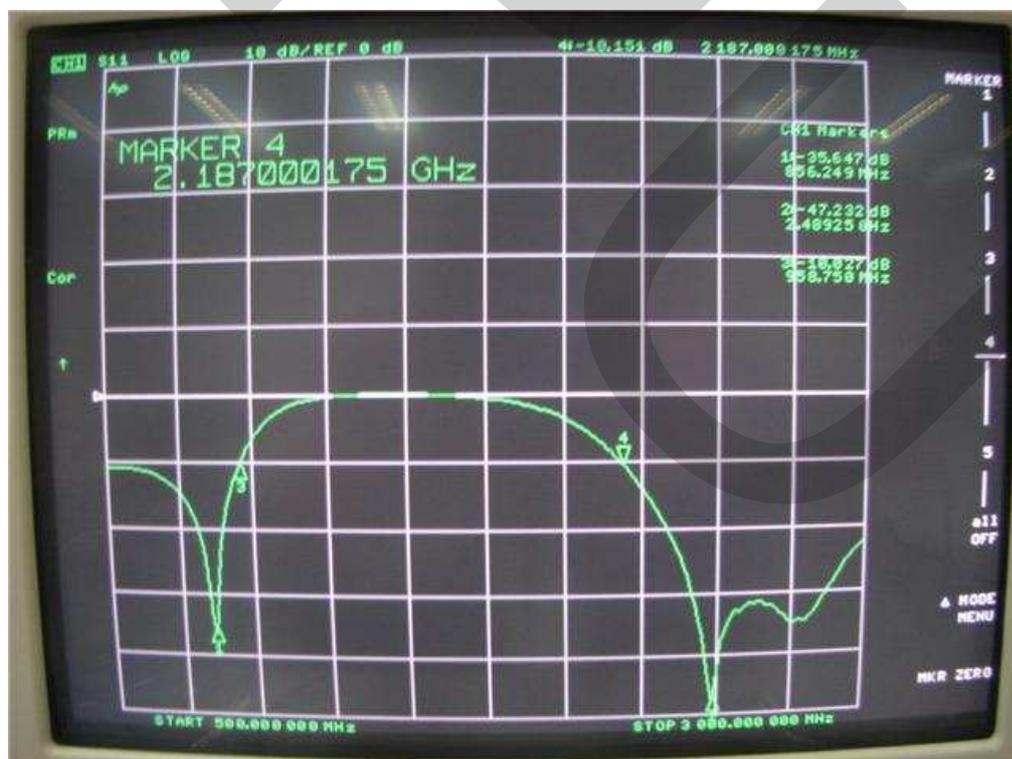
(1) วัดค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss) โดยใช้เครื่องเน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) HP8753E (ย่านความถี่ใช้งาน 30 kHz – 3 GHz)

(2) วัดระดับกำลังสัญญาณเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของเรโซเนเตอร์หยุดแถบ โดยใช้เครื่อง Signal Generator HP8657B (ย่านความถี่ 0.1 MHz – 2060 MHz), เครื่อง Signal Generator HP83731A (ย่านความถี่ 1 GHz – 20 GHz) และเครื่องสเปกตรัมอนาไลเซอร์ (Spectrum Analyzer) HP8593A (ย่านความถี่ 9 kHz – 22 GHz)

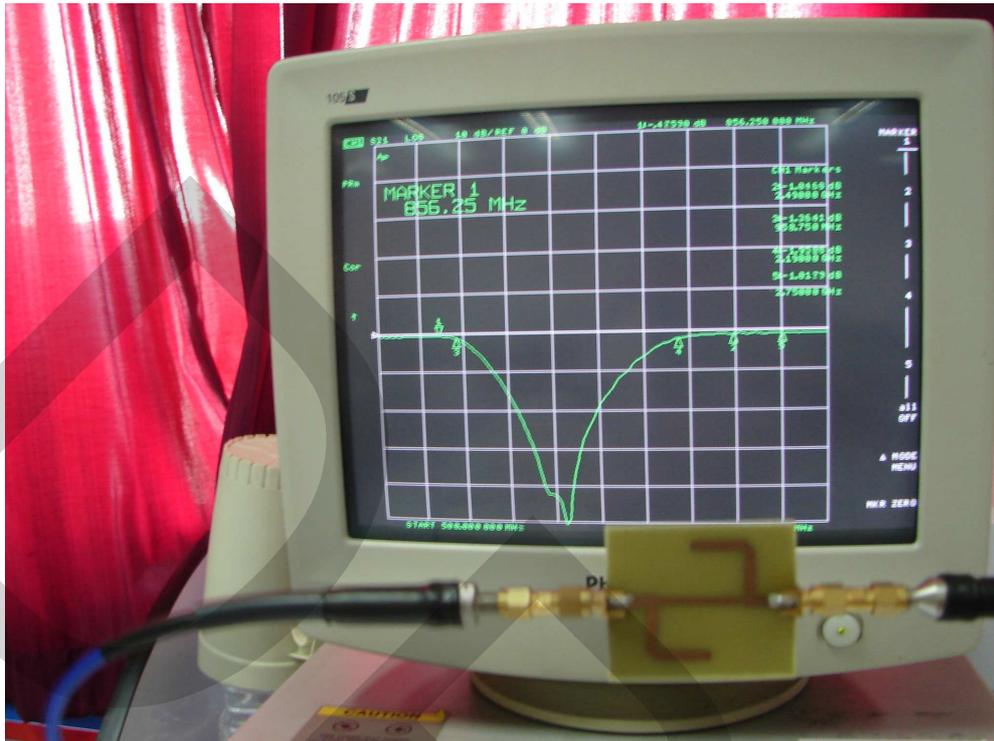
ภาพถ่ายของเครื่องมือวัดที่ใช้งานและภาพถ่ายในขณะที่ทำการทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอที่แสดงไว้ในภาพที่ 4.15 – 4.17



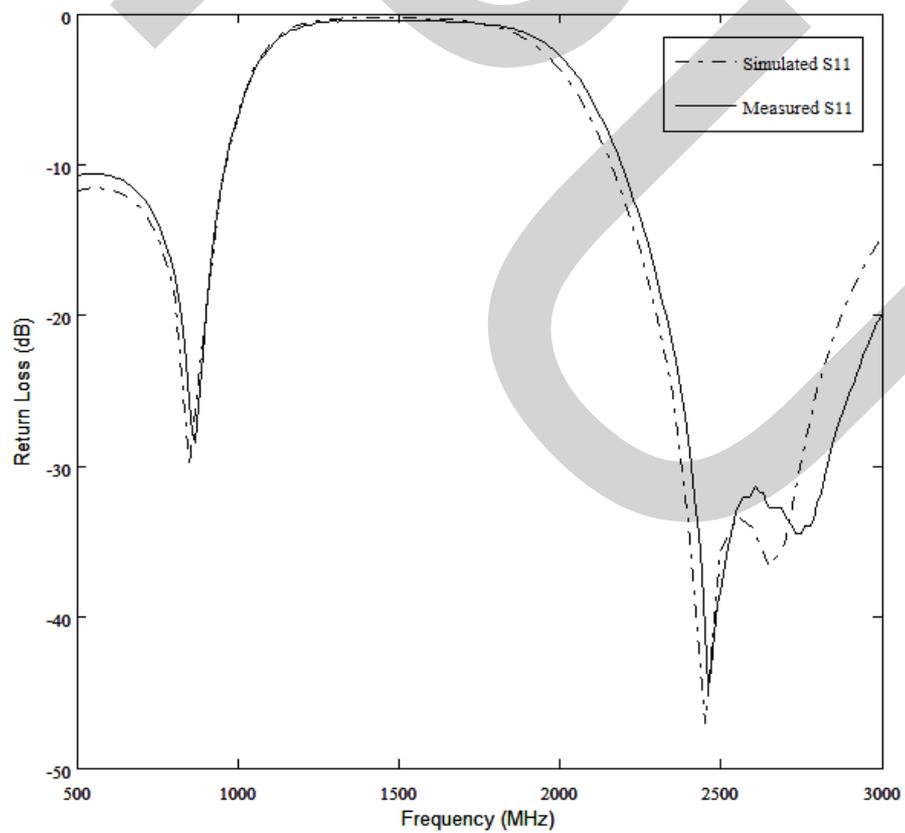
ภาพที่ 4.15 ภาพถ่ายของเครื่องเน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) HP8753E



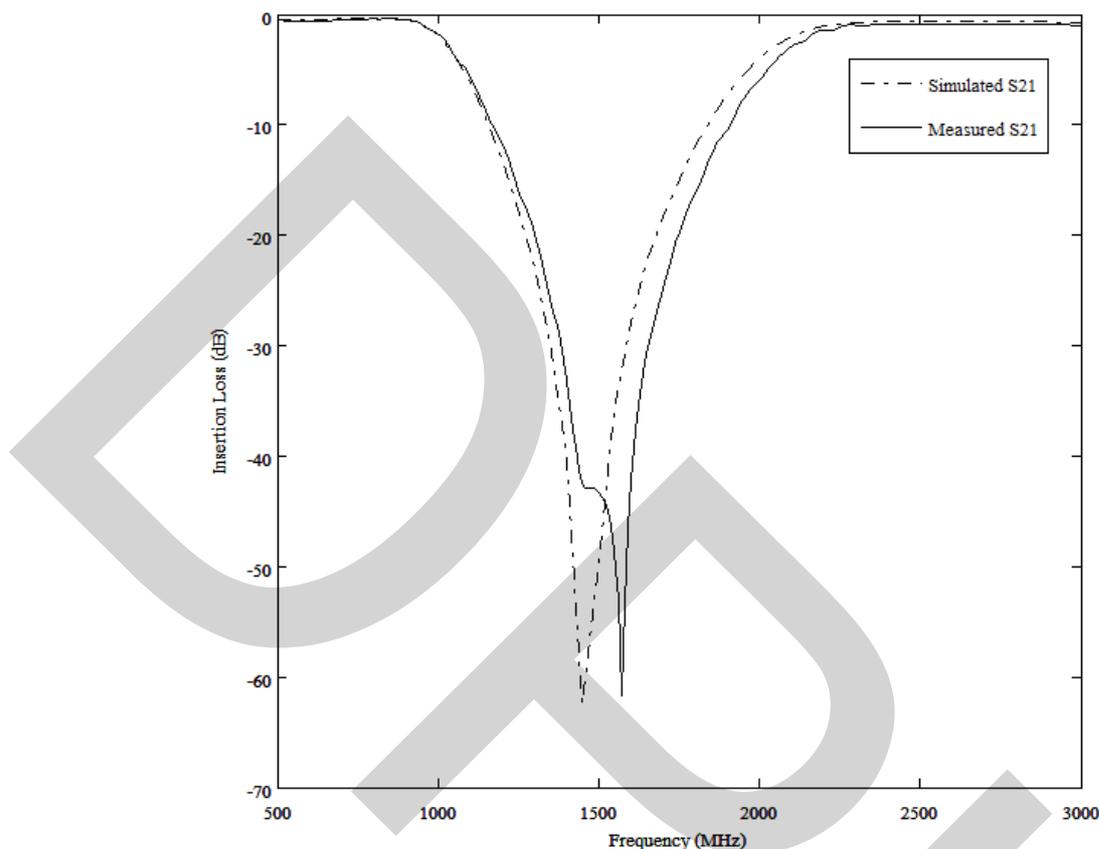
ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายเหตุการณ์ต่างๆ ในขณะที่ทำการทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอ



ภาพที่ 4.17 ภาพถ่ายเหตุการณ์ต่างๆ ในขณะที่ทำการทดสอบเรโซเนเตอร์หูดแถบที่นำเสนอ (ต่อ)



ภาพที่ 4.18 ค่า Return Loss (S_{11}) ที่ได้จากการจำลองและวัดเรโซเนเตอร์หูดแถบที่นำเสนอ



ภาพที่ 4.19 ค่า Insertion Loss (S_{21}) ที่ได้จากการจำลองและวัดเรโซเนเตอร์หุ้ดแถบที่นำเสนอ

โดยชิ้นงานที่สร้างเสร็จดังในภาพที่ 4.14 นั้นจะถูกนำมาทดสอบเพื่อวัดค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (S_{11}) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (S_{21}) พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากการจำลองชิ้นงาน ภาพที่ 4.18 แสดงค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดและจากการจำลองวงจร ที่ซึ่งสรุปได้ดังนี้

(1) ที่ความถี่ 800 MHz ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดและค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองมีค่าเท่ากับ -20 dB และ -22.5 dB ตามลำดับ ส่วนที่ความถี่ 900 MHz ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดและค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองมีค่าเท่ากัน คือเท่ากับ -20 dB

(2) ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดมีค่าต่ำกว่า -20 dB ตลอดทั้งย่านความถี่ต่ำ 800 - 900 MHz โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -28 dB ที่ 870 MHz ส่วนค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองมีค่าต่ำกว่า -20 dB ตลอดทั้งย่านเช่นกัน โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -30 dB ที่ 860 MHz ซึ่งจะเห็นว่า ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดสอดคล้องกับค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลอง

(3) ที่ความถี่ 2.3 GHz ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดและค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองมีค่ามีค่าเท่ากับ -20 dB และ -25 dB ตามลำดับ ส่วนที่ความถี่ 2.7 GHz ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดมีค่าที่ต่ำกว่าค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองเท่ากับ -4.5 dB โดยมีค่าเท่ากับ -32.5 dB และ -37 dB ตามลำดับ

(4) ทั้งค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดและค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองมีค่าต่ำกว่า -20 dB ตลอดทั้งย่านความถี่สูง 2.3 – 2.7 GHz โดยค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดมีค่าต่ำสุดประมาณ -45 dB ที่ 2.46 GHz แต่ค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองมีค่าต่ำสุดประมาณ -47 dB ที่ 2.44 GHz

(5) เมื่อพิจารณาค่า S_{11} เท่ากับ -20 dB พบว่า ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้จากชิ้นงานที่สร้างขึ้นจริงมีค่าที่กว้างกว่าค่าแบนด์วิดท์ที่ได้จากการจำลองระบบในช่วงย่านความถี่สูง และมีค่าแบนด์วิดท์ที่ใช้งานที่ใกล้เคียงกับค่าแบนด์วิดท์ที่ได้จากการจำลองระบบในช่วงย่านความถี่ต่ำ

ภาพที่ 4.19 แสดงค่า S_{21} ที่ได้จากการวัดและจากการจำลองวงจรที่ซึ่งสรุปได้ดังนี้

(1) ทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงของการทำงาน ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองสอดคล้องตามค่า S_{21} ที่ได้จากการวัด

(2) ตลอดทั้งย่านความถี่ต่ำ 800 - 900 MHz ค่า S_{21} ที่ได้รับจากการจำลองมีค่าอยู่ในช่วง -0.22 dB ไปจนถึง -0.31 dB แต่ค่า S_{21} ที่ได้จากการวัดมีค่าอยู่ในช่วง -0.38 dB ไปจนถึง -0.5 dB

(3) ตลอดทั้งย่านความถี่สูง 2.3 – 2.7 GHz ค่า S_{21} ที่ได้จากการจำลองมีค่า -0.55 dB ไปจนถึง -0.4 dB แต่ค่า S_{21} ที่ได้จากการวัดมีค่าที่สูงกว่า โดยมีค่าอยู่ในช่วง -1.1 dB ถึง -0.85 dB

กล่าวโดยสรุปที่ว่า วงจรเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้มีข้อดีในแง่ของค่า S_{11} ที่ดีและยอมรับได้ แถบหยุดก็มีค่าที่กว้างกว่าวงจรถัดไปเสนอโดย C.-Y. Hsu *et. al.*¹ โดยมีค่าแบนด์วิดท์ -3 dB เท่ากับ 1.1 GHz อีกทั้งยังมีขนาดเล็กกว่าวงจรถัดไปเสนอโดย H.-Y. Anita Yim *et. al.*² โดยความกว้างและความยาวของวงจรมีค่าเท่ากับ 26.28 มม. และ 43 มม. ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.13

4.3 นิยามคำศัพท์ ค่าข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ และข้อสังเกตผลที่ได้จากการทดสอบ

4.3.1 วงจรกรองหยุดแถบที่ใช้งาน มี 2 แบบ คือ วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์ลัมพ์ และ วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณ โดยการที่เลือกใช่วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณ เนื่องจากว่า “อุปกรณ์ลัมพ์ที่นำมาใช้สร้างวงจรถัดไปนั้นมักจะเป็นค่าทศนิยม ที่ซึ่งจะหาค่าที่แม่นยำยาก ทำให้ในการทดสอบจะต้องปรับค่าอุปกรณ์ลัมพ์

¹ C.-Y. Hsu, et. al. H.-R. Chuang and C.-Y. Chen. (2009). “Compact microstrip UWB dual-band bandpass filter with tunable rejection band.” *J. of Electromagn. Waves and Appl.* pp. 617 – 626.

² H.-Y. Anita Yim and K.-K. Michael Cheng. (2005, June). “Novel dual-band planar resonator and admittance inverter for filter design and applications.” *IEEE MTT-S Int’ 2005*, 4 pages.

และทดสอบหลายครั้ง จนกว่าจะได้คุณสมบัติการทำงานตามที่ต้องการ แม้กระนั้น เมื่อนำไปสร้างจริง ก็อาจจะไม่ได้ให้คุณสมบัติตามที่ต้องการก็ได้ เนื่องจากผลกระทบที่ได้รับจากแผ่นวงจรพิมพ์

4.3.2 ทฤษฎีของสายนำสัญญาณ พบว่า สายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda/4$ แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิดจะถูกใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์ RLC แบบอนุกรม ส่วนสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda/4$ แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรลัดจะถูกใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์ RLC แบบขนาน

4.3.3 เรโซเนเตอร์ RLC แบบอนุกรมที่ถูกเลือกนำมาใช้งานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพราะว่าเรโซเนเตอร์ RLC แบบอนุกรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของวงจรกรองหยุดแถบที่ทำจากอุปกรณ์ลัมพ์ ดังแสดงด้านซ้ายมือของภาพที่ 3.2 ของบทที่ 3 โดย R ในภาพดังกล่าวไม่มี เพราะถือว่าเป็นค่าความต้านทานแฝงที่อยู่ในวงจร ซึ่งอาจเป็นค่าความต้านทานของสายนำสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และกราวด์ได้ ส่วนเรโซเนเตอร์ RLC แบบขนานในรูปข้างล่างนี้ ด้านบนจะถูกแทนด้วยโดยใช้หลักการของ J-Inverter ดังที่กล่าวในตัวเล่มวิทยานิพนธ์หัวข้อที่ 3.2 ซึ่งที่นี้อาจจะเลือกใช้สายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda/4$ แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรลัดก็ได้ แต่ที่ไม่เลือกใช้ เพราะมองว่ามีขนาดวงจรที่ใหญ่

4.3.4 J-Inverter เป็นวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์ ซึ่งถูกนำมาใช้งานเพื่อที่จะแปลงจากวงจรกรองความถี่ที่ทำจากอุปกรณ์ Lump RLC เป็นวงจรที่ทำจากสายนำสัญญาณ โดยทั้งสองวงจรจะมีค่าแอดมิตแตนซ์ (Y) เท่ากัน จึงอาจจะกล่าวได้ว่า วงจรทั้งสองนี้เป็นวงจรที่เทียบเท่ากันหรือสมมูลกัน

4.3.5 ค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 (หรือ TL3 และ TL6) เท่ากับ 2.64 มม. ที่ได้รับเกิดขึ้นจากการอพติไมซ์หาค่าความกว้างที่เหมาะสมเบื้องต้นจากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานทางทฤษฎี หลังจากที่ได้ทำการทดสอบปรับค่าและหาค่าความกว้างและความยาวของ TL2 ที่เหมาะสมแล้ว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.9 mm และ 23 mm ตามลำดับ (ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1)

หลังจากนั้น จะทำการทดสอบความถูกต้องของค่าความกว้างที่เหมาะสมเบื้องต้นดังกล่าว โดยทำการทดสอบความกว้างของ TL4 และ TL7 ค่าอื่นๆ ข้างเคียงอีกด้วย ได้แก่ 2.44 มม. และ 2.84 มม. และปรับหาค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ณ ค่าความกว้าง 3 ค่าดังกล่าวอีกด้วย เพื่อทำการเปรียบเทียบว่าค่าความกว้างและความยาวที่เหมาะสมที่สุดและให้คุณสมบัติการทำงานที่ดีที่สุดของ TL4 และ TL7 ควรมีค่าเท่าไร ก่อนที่จะนำไปสร้างและทดสอบการใช้งานจริงในทางปฏิบัติ (ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1.2)

4.3.6 การที่ค่า S_{11} ที่ได้รับในช่วงย่านความถี่ 2.5 GHz – 2.8 GHz มีค่าที่ต่ำกว่าค่า S_{11} ที่ได้รับในช่วงย่านความถี่ 2.4 GHz – 2.5 GHz น่าจะเกิดขึ้นโดยมีสาเหตุดังนี้ “ย่านความถี่ 2.4 GHz – 2.5 GHz เป็นย่านความถี่สูงย่านแรกที่ผ่านออกไปยังเอาต์พุตของวงจรหยุดแถบได้ ดังนั้นวงจรหยุด

แถบจึงให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ดีมากตามที่ต้องการ จึงส่งผลให้ได้รับค่า S_{11} ที่ดี ซึ่งเป็นผลการทดสอบที่ได้รับตามทฤษฎีธรรมดา กล่าวคือ

“ย่านความถี่ที่ผ่านออกไปได้ช่วงแรก จะได้ค่า S_{11} ที่ลดลงมาก” ส่วนย่านความถี่ 2.5 GHz – 2.8 GHz เป็นย่านความถี่สูงย่านที่ 2 ที่ผ่านออกไปยังเอาต์พุตของวงจรถอดแถบได้ ดังนั้นวงจรถอดแถบจึงให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ไม่ดีเท่ากับย่านความถี่แรกที่วงจรถอดให้ผ่านไปได้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า S_{11} ที่ได้รับในย่านความถี่ 2.4 GHz – 2.5 GHz (อย่างไรก็ตาม ค่า S_{11} ที่ได้รับก็มีค่าต่ำกว่า -20 dB ตามที่ต้องการในการออกแบบ) ซึ่งโดยทั่วไป “วงจรถอดแถบก็ให้ผลตอบสนองเชิงความถี่เช่นเดียวกับผลการวัดและจำลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้”

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการทำงานตามขอบเขตงานวิจัย

หลังจากทดสอบระบบในด้านต่างๆ แล้วนั้น พบว่า เรโซเนเตอร์หูดแถบบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นมาสามารถรองรับการใช้งาน 2 ย่านความถี่ตามที่ต้องการได้ ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำในช่วง 800 – 900 MHz เพื่อรองรับการใช้งานกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ของ บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) และย่านความถี่สูงในช่วง 2.3 – 2.7 GHz เพื่อรองรับการใช้งานในระบบสื่อสารไร้สาย ได้แก่ WiFi-2.45 GHz และ WiMAX-2.5 GHz โดยกำหนดสมรรถนะในการทำงานที่ให้ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss) ที่ต่ำกว่า -20 dB

5.2 สรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์งานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีโครงสร้างใหม่ โดยทำการศึกษาระโซเนเตอร์หูดแถบที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์แบบต่างๆ และเรโซเนเตอร์หูดแถบบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้งานกับโทรศัพท์เคลื่อนที่, เครือข่าย WLAN, และเครือข่าย WiMAX – 2.5 GHz ทำการจำลองและทดสอบการทำงานของเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ถูกนำเสนอก่อนหน้านี้ สร้างและทดสอบเรโซเนเตอร์หูดแถบบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่นำเสนอ ไปจนถึงการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้รับจากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบเชิงทฤษฎีและการวัดเรโซเนเตอร์หูดแถบจริง โดยสามารถสรุปตามวัตถุประสงค์งานวิจัยได้ดังนี้

5.2.1 ผู้วิจัยสามารถสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีโครงสร้างใหม่บนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 และรองรับการใช้งานสองย่านความถี่ตามที่กำหนดได้สำเร็จ

5.2.2 ผู้วิจัยสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ใช้งานได้ดี โดยให้ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -20 dB ใน 2 ย่านความถี่ที่ต้องการได้สำเร็จ

5.2.3 ผู้วิจัยมีความเข้าใจในหลักการออกแบบและสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่นำเสนอ จึงทำให้พบว่า เรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีโครงสร้างใหม่แบบอื่นถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้งานในย่านความถี่ที่ต้องการสำหรับเครือข่ายสื่อสารไร้สายของประเทศไทยในอนาคตได้

5.3 สรุปประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ผลจากการพัฒนาเรโซเนเตอร์หูดแถบบนแผ่นวงจรพิมพ์สามารถสรุปประโยชน์ที่ได้รับจากการนำเสนอได้ดังนี้

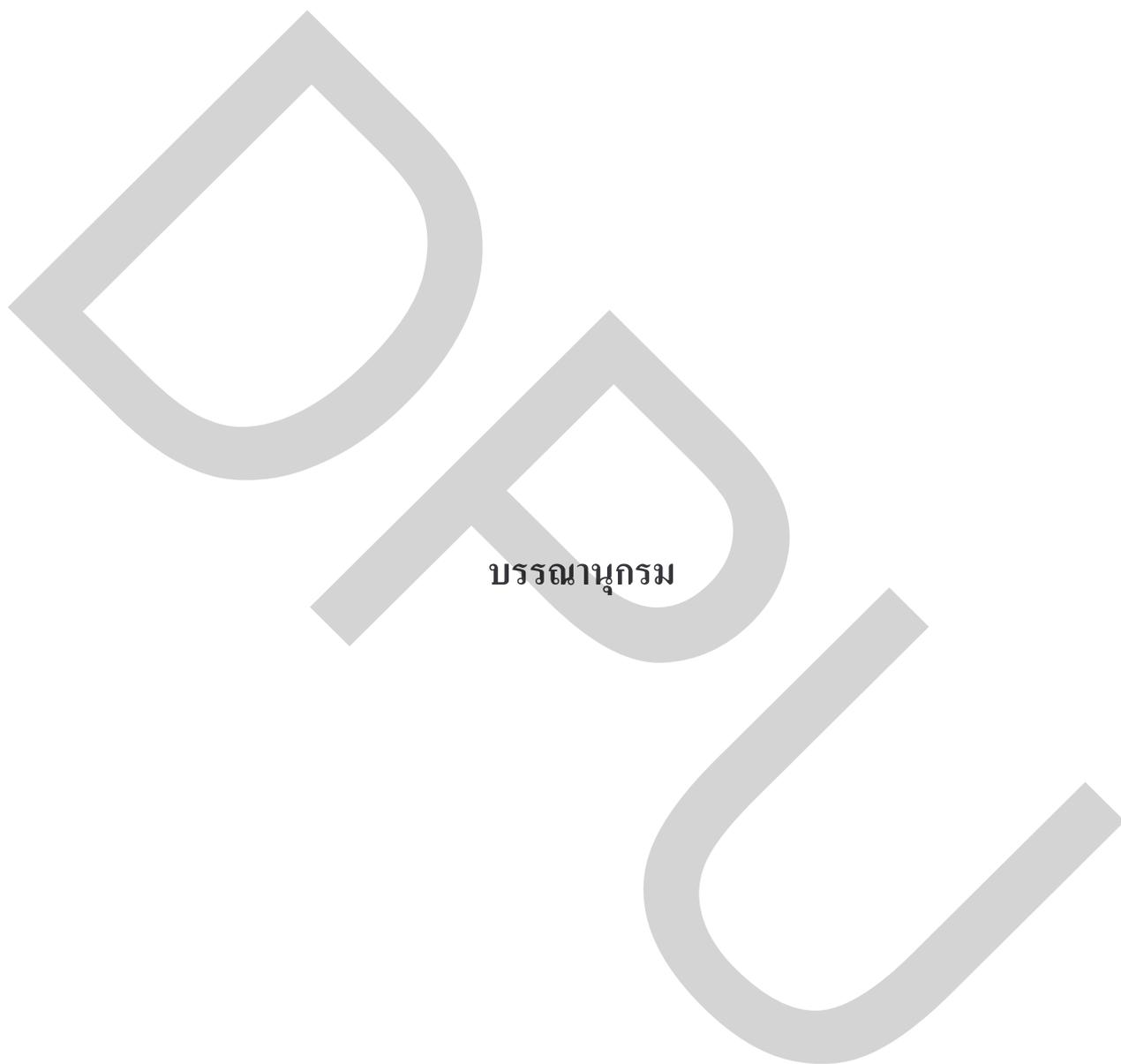
5.3.1 สามารถนำไปใช้งานได้จริงกับโทรศัพท์เคลื่อนที่และอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาที่มีย่านความถี่ใช้งานตรงกับที่นำเสนอ อีกทั้งสามารถรองรับการใช้งานระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายของประเทศไทยในอนาคตได้ อาทิเช่น เครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูง (WiMAX) และเครือข่าย CDMA ของบริษัทเอกชนรายอื่นๆ ฯลฯ

5.3.2 สามารถนำหลักการที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบที่นำเสนอนี้ไปใช้งานเพื่อออกแบบและสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีโครงสร้างใหม่แบบอื่นที่สามารถรองรับการใช้งานระบบสื่อสารไร้สาย WiMAX ที่ย่านความถี่ 3.3 - 3.7 GHz และ 5.25 - 5.85 GHz นอกเหนือจากย่านความถี่ 2.5 GHz ที่นำเสนอได้

5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

5.4.1 จากการออกแบบและสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบขึ้นมาใช้งานจริงแล้ว พบว่า ย่านความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบ 800 - 900 MHz เป็นย่านความถี่ที่วงจรทำงานและตอบสนองแบบชันมาก ควรจะปรับจูนเพิ่มเติมเพื่อให้ค่า S_{11} ของย่านความถี่ต่ำผ่านแถบเป็นรูปตัว U เพื่อให้การใช้งานในทางปฏิบัตินั้นดียิ่งขึ้น

5.4.2 เนื่องจากระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายที่ถูกใช้งานในปัจจุบันและในอนาคตของประเทศไทยยังคงจะมีอัตราการเติบโตที่สูงขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งแต่ละระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายมีการใช้งานย่านความถี่ที่แตกต่างกัน จึงทำให้ผู้วิจัยคาดหวังเป็นอย่างยิ่งและขอเสนอแนะว่า มีโอกาสที่จะนำหลักการออกแบบและสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบในงานวิจัยฉบับนี้ไปออกแบบและปรับปรุงเพื่อให้ได้โครงสร้างใหม่ที่สามารถรองรับการใช้งาน ณ ย่านความถี่อื่นๆ ของระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายของประเทศไทยในอนาคตได้ เช่น เครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูง (WiMAX) ที่ย่านความถี่ 3.3 - 3.7 GHz และ 5.25 - 5.85 GHz นอกเหนือจากย่านความถี่ 2.5 GHz ที่นำเสนอและเครือข่าย CDMA ของบริษัทเอกชนรายอื่นๆ นอกเหนือจาก บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน)



บรรณานุกรม

ภาษาไทย

หนังสือ

ประยูทธ อัครเอกผดาลัย. 2552. การออกแบบวงจรไมโครเวฟ (Microwave Circuit Design).
กรุงเทพฯ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ภาษาต่างประเทศ

BOOKS

David M. Pozar. 1998. **Microwave Engineering**. (2nd Edition). New York: John Wiley & Son.

ARTICLES

C. Laohapensaeng, C. Free, and K.M. Lum. (2005, March). "Printed strip monopole antenna with the parasitic elements on the circular ground plane." **IWAT 2005**. pp. 371 – 374.

C.-Y. Hsu, H.-R. Chuang, and C.-Y. Chen. (2009). "Compact microstrip UWB dual-band bandpass filter with tunable rejection band." **J. of Electromagn. Waves and Appl.** pp. 617 - 626.

H.-Y. Anita Yim and K.-K. Michael Cheng. (2005, June). "Novel dual-band planar resonator and admittance inverter for filter design and applications." **IEEE MTT-S Int' 2005**. 4 pages.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

ว่าที่ร้อยตรี วรชัย ศรีสมุดคำ

ประวัติการศึกษา

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

ครู แผนกวิชาอิเล็กทรอนิกส์และเทคนิคคอมพิวเตอร์
วิทยาลัยเทคนิคธัญบุรี