

วงจรกรองความถี่ผ่านแถบแบนด์กว้างด้วยเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ขั้น บนโครงสร้างไมโครสตริป

A Wideband Bandpass Filter with Stepped Impedance Resonator on Microstrip

วิชัย ครองกิจศิริ¹ พัชรี้ ครองกิจศิริ^{2,*} และ สุขุม จุฬาทูรศิริระรัตน¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

²สาขาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

เลขที่ 199 หมู่ 3 ถนนพังโคน-วาริชภูมิ ต.พังโคน อ.พังโคน จ.สกลนคร 47160 โทรศัพท์ 086-457-2852

E-mail: pacharee_kr@hotmail.com, wichai.kr@gmail.com

Wichai Krongkitsiri¹, Pacharee Krongkitsiri^{2,*} and Sukhum Jurajaturasiraratana¹

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial and Technology,

Rajamangala University of Technology ISAN Sakon-Nakhon Campus

²Department of Science and Mathematics, Faculty of Industrial and Technology,

Rajamangala University of Technology ISAN Sakon-Nakhon Campus

199 M.3 Pangkhon District, Sakon-Nakhon Province 47160, Thailand. Tel. (66)086-457-2852

E-mail: pacharee_kr@hotmail.com, wichai.kr@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวงจรกรองความถี่ผ่านแถบกว้างโดยใช้เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ขั้น ที่การเชื่อมต่อแบบคู่ขนาน และมีการลดขนาดของตัวโครงสร้างโดยการนำมาพับ นอกจากนี้ยังมีการกำจัดความถี่ปลอมเทียมด้วยการใช้สลับแบบเปิดวงจร โดยเรโซเนเตอร์ที่ใช้งานนี้จะมีความสมมาตรกัน โดยมีความถี่กลางในการออกแบบอยู่ที่ 4.5 GHz สำหรับผลการวัดและทดสอบจะมีค่าการสูญเสียใส่แทรกอยู่ที่ 0.2 dB และค่าการสูญเสียย้อนกลับมากกว่า 15 dB นอกจากนี้ผลตอบสนองความถี่มีแบนด์วิธที่กว้างประมาณ 5GHz และกดความถี่ปลอมเทียมในช่วงนอกแบนด์ได้ถึงความถี่ 17 GHz ซึ่งวงจรกรองความถี่ผ่านแถบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในช่วงการสื่อสารไร้สายระยะสั้น การสื่อสารที่ต้องการใช้แบนด์วิธกว้าง และอื่นๆ

คำสำคัญ: เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ขั้น กรองผ่านแถบกว้าง ความถี่ปลอมเทียม

Abstract

This paper proposes a folded stepped impedance resonator filter with a parallel-coupled structure for size reduction and improved spurious suppression using by the open circuit stub in the stopband. The design concept is demonstrated by using four SIR resonators with the fundamental frequency f_0 of 4.5 GHz. For a comprehensive treatment of the filter with open stub, the spurious response can be suppressed. The measured result is in good agreement with the simulated expectation with a 0.2 dB insertion loss and more than 15 dB return loss. Moreover, this filter has a 5 GHz wide range frequency bandwidth response and wide range of the upper stopband is better than 15 dB rejection level and extended from 10 up to 17 GHz. As a result, the proposed filter is quite useful for applications in short rang wireless communication systems.

Keywords: stepped impedance resonator, wideband bandpass filter, spurious suppression

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารได้รับความสนใจและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งภาคอุตสาหกรรม และระบบงานสื่อสารที่เกี่ยวข้องในชีวิตประจำวัน เช่นการนำเอาระบบแจ้งพิกัดภาคพื้นดิน (GPS) โครงข่ายการสื่อสารท้องถิ่นไร้สาย (WLAN) รวมถึงระบบโครงข่ายโทรศัพท์ (Mobile cellular) ซึ่งในระบบการทำงานของเครื่องมือสื่อสารดังกล่าว จะมีภาครับส่วนหน้า (Front-end) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญโดยจะประกอบไปด้วยส่วนของวงจรกรองความถี่ผ่านแถบ ที่มีลักษณะแบนราบ ขนาดเล็กและให้ประสิทธิภาพการทำงานสูง

ในการศึกษาวิจัยและออกแบบทั่วไปของวงจรกรองความถี่ผ่านแถบจะพิจารณาอยู่ 3 ส่วนหลัก กล่าวคือ ส่วนแรกจะเป็นจุดส่งผ่านศูนย์ (Transmission zero) ซึ่งจุดส่งผ่านศูนย์นี้จะอยู่ในตำแหน่งของช่วงผ่านแถบของวงจรกรองความถี่ [1,2] เพื่อที่จะแยกช่วงความถี่ผ่านแถบของแคว้นช่วงความถี่ออกจากกันอย่างชัดเจน ส่วนที่สองคือการเชื่อมต่อกันของแต่ละเรโซเนเตอร์ กล่าวคือในวงจรกรองความถี่ผ่านแถบ จะประกอบไปด้วยเรโซเนเตอร์จำนวนหลายตัว ซึ่งแต่ละตัวจะถูกออกแบบให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างกัน เพื่อให้การออกแบบวงจรสามารถตอบสนองได้หลายช่วงความถี่ดังเช่น [3-6] อย่างไรก็ตามจากการออกแบบดังกล่าวจะทำให้ขนาดโดยรวมของวงจรกรองความถี่มีขนาดใหญ่ขึ้น ตามจำนวนเรโซเนเตอร์ที่ใช้งาน ซึ่งจะต้องหาวิธีการลดขนาดโดยรวมของวงจรให้เล็กลง ในส่วนที่สาม เป็นส่วนที่น่าสนใจอย่างมากคือการออกแบบให้แต่ละเรโซเนเตอร์มีโหมดของการเรโซแนนซ์มากที่สุดสำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านแถบกว้างยิ่ง เพื่อจะได้ค่าการสูญเสียใส่แทรกในช่วงผ่านแถบราบเรียบ สามารถทำได้โดยใช้เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ขึ้น, สตับโหลดเรโซเนเตอร์หรือ มัลติโหมดเรโซเนเตอร์ ดังปรากฏใน [7-9] ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้มีข้อจำกัดในการออกแบบและพารามิเตอร์ต่างๆของวงจร ซึ่งทำให้ยากต่อการปรับแต่งความถี่เรโซแนนซ์ของโหมดที่อิสระจากกัน และจะทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ด้วยมือมีการออกแบบวงจรให้สามารถตอบสนองได้หลายช่วงความถี่ ในการออกแบบวงจร

กรองความถี่ผ่านแถบกว้างยังมีจุดที่น่าสนใจในการพิจารณาการออกแบบจากปัญหาที่ผ่านมาคือ การทำให้วงจรมีขนาดเล็ก มีซับซ้อนในการออกแบบและสร้างชิ้นงาน และสามารถกำจัดความถี่ปลอมเทียมในช่วงแถบหยุดได้มากที่สุด ดังเช่น [10] ได้นำเสนอการออกแบบเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ชั้นที่มีการเชื่อมต่อด้วยสลับตัวจริง จำนวน 2 ตัว และใช้การเชื่อมต่อยุ่ร่วมกัน (Mutual coupling) ระหว่างเรโซเนเตอร์ซึ่งผลที่ได้ทำให้ผลตอบสนองความถี่ช่วงผ่านแถบเกิดจุดส่งผ่านศูนย์ และค่าความชันของกราฟสูงชัน นอกจากนี้ [11] ได้นำเสนอการใช้เรโซเนเตอร์วงแหวน เพื่อสร้างวงจรกรองความถี่ผ่านแถบแบบสมมูลที่มีขนาดเล็ก จากผลการวัดของชิ้นงานพบว่าแบนด์วิธของช่วงผ่านแถบแคบมาก และการกำจัดสัญญาณปลอมเทียมของช่วงความถี่ผ่านแถบยังไม่ดีเท่าที่ควร ต่างกันกับการออกแบบวงจรกรองความถี่ใน [12-14] ซึ่งได้วงจรกรองความถี่ผ่านแถบแบนด์กว้างภายใต้การทำงานของโหมดที่ต่างกัน

สำหรับในการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านแถบกว้างในงานวิจัยนี้นั้นเป็นการนำเสนอวิธีการออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบชั้น ที่สามารถสร้างได้ง่าย โดยใช้เรโซเนเตอร์จำนวน 2 ตัว ที่มีการเชื่อมต่อแบบขนานในด้านอิมพีแดนซ์สูง เพื่อให้ได้แบนด์วิธในแบนด์กว้าง และมีจุดการส่งผ่านศูนย์ (transmission zeros) ทั้งสองด้านของช่วงผ่านแถบ นอกจากนี้ใช้สลับแบบเปิดวงจรเพื่อกำจัดความถี่ปลอมเทียมในช่วงนอกแถบความถี่ ซึ่งกระบวนการออกแบบและจำลองงานทั้งหมด ดำเนินการด้วยโปรแกรมจำลองงาน IE3D

2. ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบ

การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบกว้างบนโครงสร้างไมโครสตริปด้วยเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ชั้น ได้ออกแบบให้ใช้งานอยู่ในช่วงความถี่ผ่านแถบแบนด์กว้าง (Wideband)

2.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ

เพื่อกำหนดคุณลักษณะของวงจรกรองผ่านแถบที่ต้องการ โดยในการออกแบบนี้มีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

แบนด์วิธขนาด	4 GHz
ค่าการสูญเสียของช่วงความถี่ผ่าน (S_{21})	ไม่เกิน -3 dB
ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	50 โอห์ม
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11})	-25 dB (อย่างน้อย)
ขนาดของการกระเพื่อม	ไม่เกิน 0.2 dB
ความถี่กลาง	4.5 GHz

จากพารามิเตอร์ที่กำหนด นำมาหาค่าองค์ประกอบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ ที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านแถบโดยใช้โปรแกรม MGrid version 11.50 ซึ่งเรโซเนเตอร์ที่ออกแบบใช้งานเป็นแบบ UIR (Uniform impedance resonator) มีลักษณะเป็นแบบเส้นตรง จากนั้นจึงนำมาพับเพื่อลดขนาดของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และ (ข)



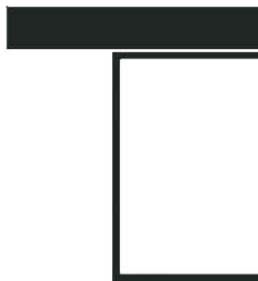
(ก)



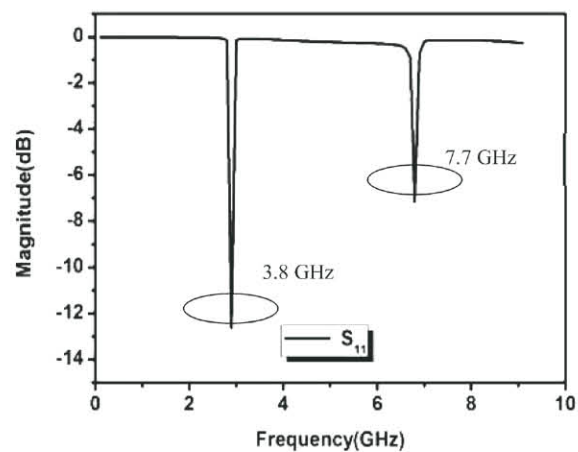
(ข)

รูปที่ 1 (ก) เรโซเนเตอร์แบบตรง (ข) เรโซเนเตอร์ที่ทำการพับ

หลังจากนั้นทำการทดสอบผลการตอบสนองทางความถี่ของเรโซเนเตอร์โดยการกระตุ้นด้วยรูปที่ 2 (ก) และจะได้ผลตอบสนองทางความถี่ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ในรูปที่ 2 (ข) โดยความถี่มูลฐานที่ได้ 3.8 GHz และมีความถี่ฮาร์โมนิก 7.7 GHz เกิดขึ้นตามลำดับ



(ก)



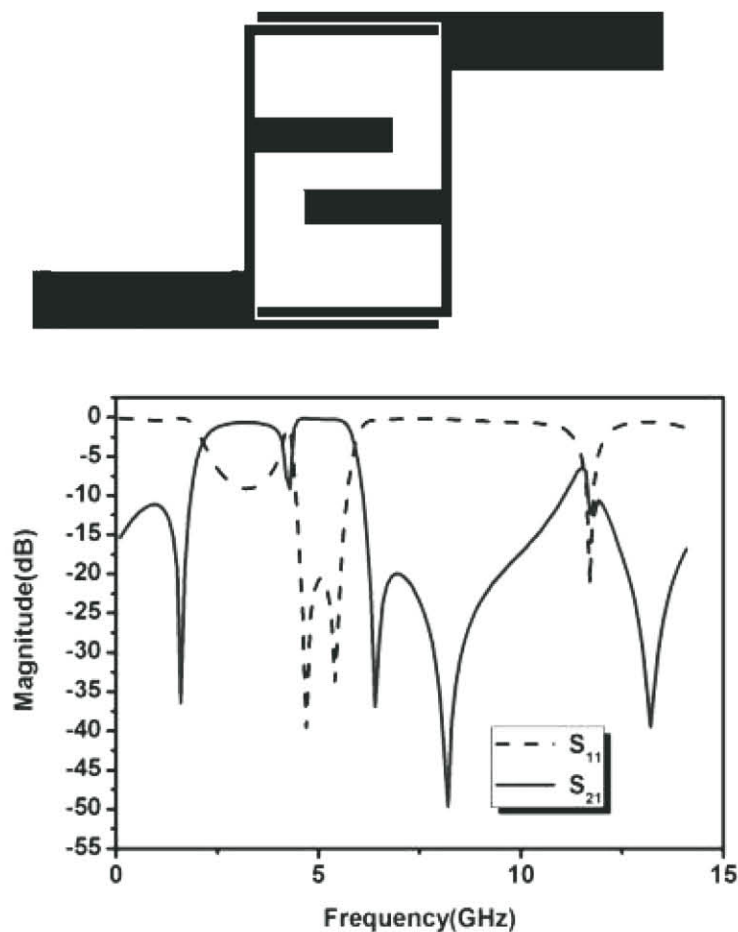
(ข)

รูปที่ 2 (ก) การจัดวางพอร์ตเพื่อใช้กระตุ้นหาผลตอบสนองทางความถี่

(ข) ผลตอบสนองจากการกระตุ้นเรโซเนเตอร์

จากที่นำเรโซเนเตอร์มาพับและเพิ่มสลับแบบเปิดวงจร ทำการเชื่อมต่อวงจรและทำการทดลองต่อพอร์ต ในลักษณะ 90 องศา เพื่อทดสอบหาผลตอบสนองทางความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3 จากกราฟที่จะเห็นรูปร่างของช่วงผ่านแถบ และความถี่ปริ่มเต็มเกิดขึ้นมาด้วย ซึ่งขั้นตอนต่อไปจะทำการปรับแต่งขนาด รูปร่างของเรโซเนเตอร์ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองทางความถี่ตามที่กำหนดไว้ ในการปรับแต่งเรโซเนเตอร์เริ่มตั้งแต่ตำแหน่งการวางพอร์ต

โดยจะทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของพอร์ต ขนาดของเรโซเนเตอร์ ในแต่ละส่วน ดังรูปที่ 4 (ก) ซึ่งผลของการตอบสนองจากการกระตุ้นเรโซเนเตอร์พบว่า มีลักษณะแนวโน้มที่ดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 (ข)

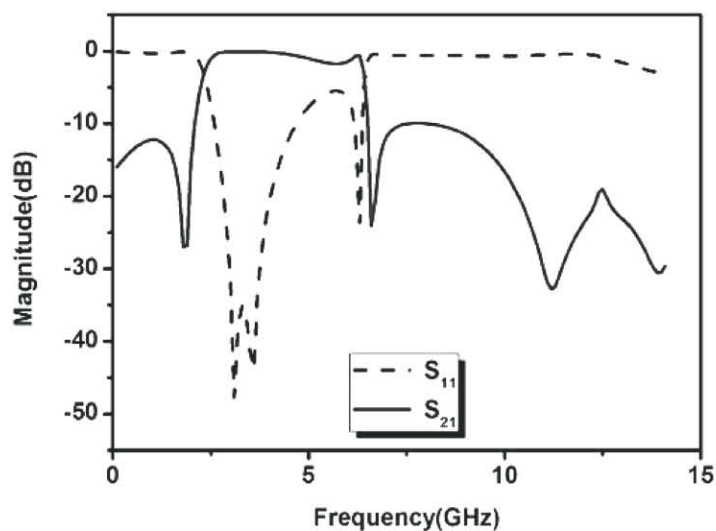


รูปที่ 3 เรโซเนเตอร์ที่ต่อสลับ โหลด, พอร์ต และผลตอบสนองจากการกระตุ้นเรโซเนเตอร์ด้วยโปรแกรม IE3D

ผลที่ได้จากการปรับขนาดรูปร่างของเรโซเนเตอร์จนเป็นลักษณะไม่สมมาตร ซึ่งความกว้างของเรโซเนเตอร์แต่ละส่วนไม่เท่ากันและอิมพีแดนซ์แบบขั้ว ส่งผลค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S₁₁) ลดลงในช่วงความถี่ประมาณ 3-4 GHz แต่ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S₁₁) ในช่วงความถี่ 5.2 GHz ยังมีค่าสูงอยู่ส่งผลให้ค่าการสูญเสียใส่แทรกมีขนาดของการกระเพื่อมเพิ่มขึ้นจึงต้องมีการปรับแต่งเรโซเนเตอร์ ส่วนขนาดของความถี่ปลอมเทียมมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการใส่สลับเปิดวงจรที่ตำแหน่งนี้มีผลต่อการกด หรือกำจัดความถี่ปลอมเทียมลงไปได้ เพียงแต่ต้องปรับแต่งขนาดของสลับให้มีความเหมาะสมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด ดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงการกระจายสนามเวกเตอร์และกระแสที่เกิดขึ้นบน โครงสร้างของวงจรฟิลเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ



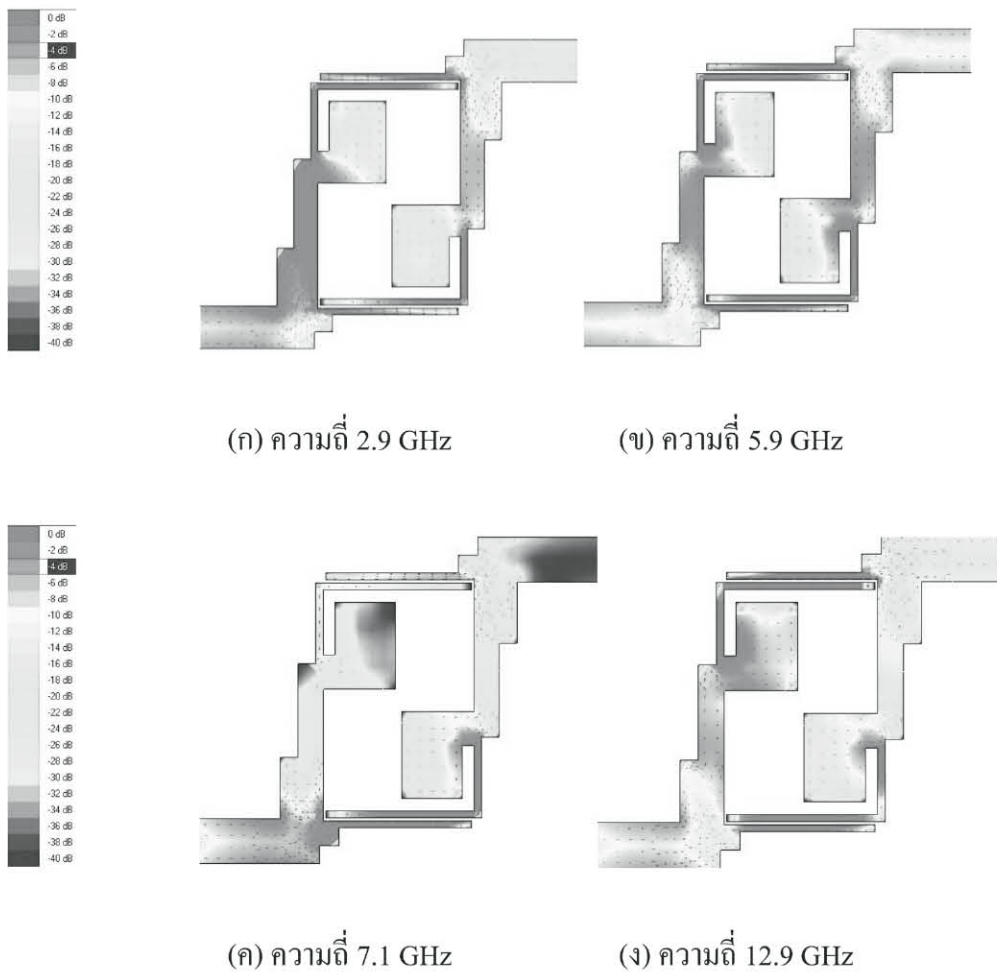
(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) อิมพีแดนซ์แบบขั้นและ (ข) ผลตอบสนองจากการกระตุ้นเรโซเนเตอร์ด้วยโปรแกรม IE3D

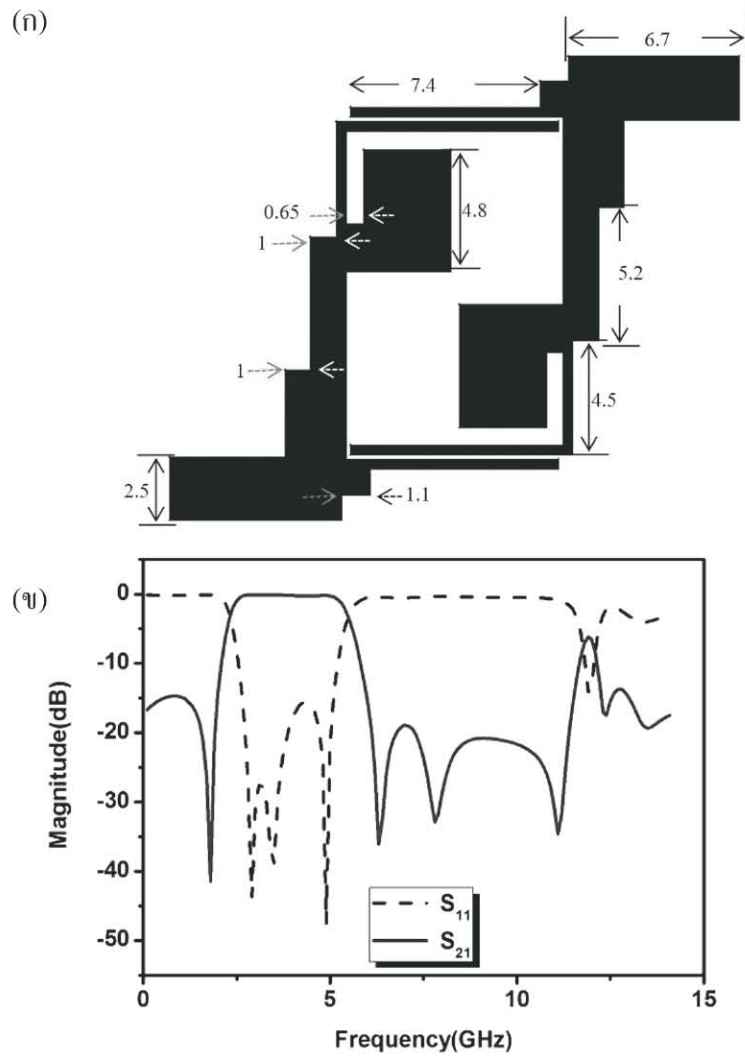
จากรูปที่ 5 (ก) ปริมาณความเข้มของกระแสจากพอร์ต 1 (ซ้ายมือ) เริ่มมีการเชื่อมต่อไปยังพอร์ต 2 (ขวามือ) ลักษณะดังกล่าวจะเกิดเป็นช่วงความถี่ผ่านแถบ ซึ่งค่าการสูญเสียใส่แทรกจะเริ่มดีขึ้นเรื่อยๆ สังเกตได้จากความเข้มของสนามบริเวณจุดเชื่อมต่อของเรโซเนเตอร์และบริเวณพอร์ต 1, 2 ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) ส่วนในรูปที่ 5 (ค) ที่จุดนี้ไม่มีการเชื่อมต่อของสนาม นั่นคือช่วงความถี่ผ่านแถบได้สิ้นสุดลง สังเกตได้จากปริมาณความเข้มของสนามบริเวณพอร์ต 2 นั้นบางมาก ลักษณะเช่นนี้แสดงถึงช่วงแถบหยุดที่เกิดขึ้น และจะเกิดมีความถี่ปลอมเทียมขึ้นมาอีกครั้งที่ความถี่ 12.9 GHz ในรูปที่ 5 (ง) แต่ปริมาณความเข้มสนามดังกล่าวไม่สูงมาก



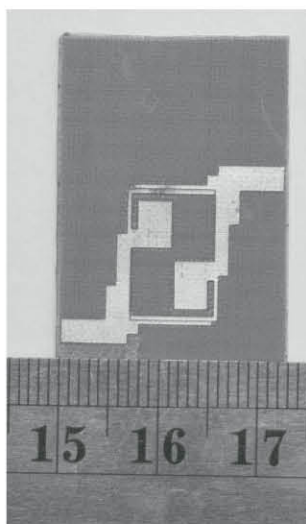
รูปที่ 5 การกระจายสนามเวกเตอร์และกระแสที่เกิดขึ้นบน โครงสร้างของวงจรฟิลเตอร์

3. การสร้างชิ้นงาน

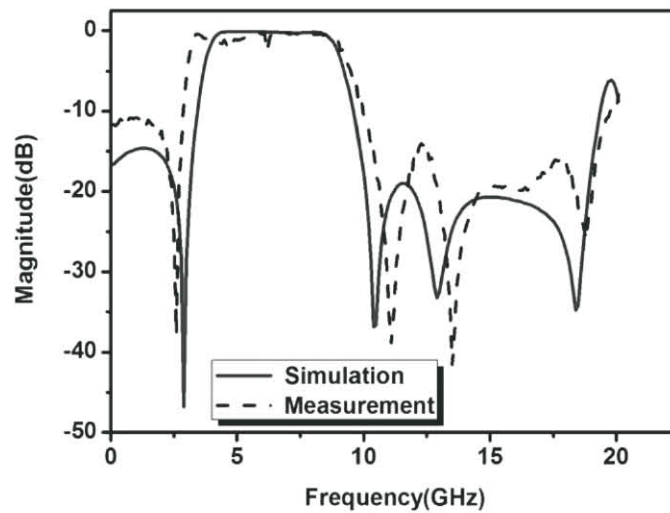
หลังจากที่ออกแบบและจำลองการทำงานจนได้ผลตอบแทนทางความถี่ที่ดีที่สุดแล้ว เราก็จะทำการสร้างชิ้นงาน โดยทำบนแผ่นวงจรพิมพ์ไมโครเวฟ Arlon/Diclad 880 มีค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ $\epsilon_r = 2.17$ ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย $\delta = 0.00009$ ความหนา 0.768 มิลลิเมตร ตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดในเบื้องต้นของการออกแบบ โดยการกัดด้วยเครื่องเซาะร่อง LPKF ตามขนาดตามรูปที่ 6 (ก) และได้ชิ้นงานดังรูปที่ 7 ซึ่งมีหน่วยความยาว มิลลิเมตร ผลการเปรียบเทียบการสูญเสียใส่แทรก (S21) และการสูญเสียย้อนกลับ (S11) แสดงดังรูปที่ 8 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



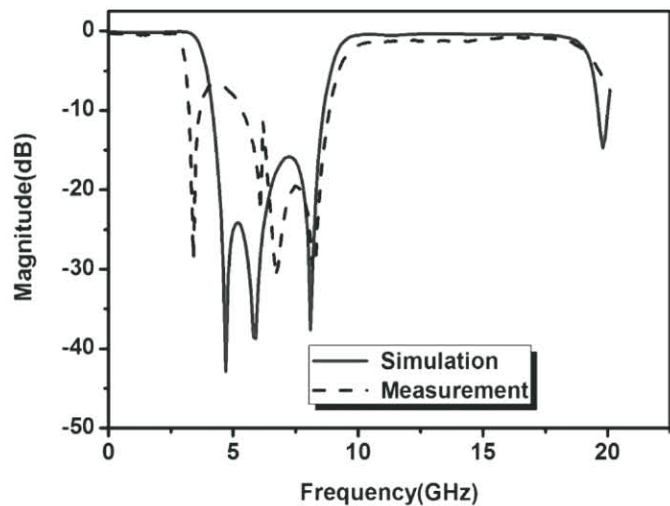
รูปที่ 6 (ก) ขนาดวงจรเรโซเนเตอร์ขั้นสุดท้าย และ (ข) ผลตอบสนองทางความถี่จากการจำลอง



รูปที่ 7 ชิ้นงานจริงของวงจรรองความถี่ผ่านแถบกว้างบนโครงสร้างไมโครสตริป



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบ (ก) การสูญเสียใส่แทรก (S_{21}) (ข) การสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})

5. สรุป

วงจรกรองความถี่ผ่านแถบกว้างโดยใช้เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ขั้นที่ไม่มีรูปแบบ มีการเชื่อมต่อแบบคู่ขนานเพื่อให้เกิดแบนด์แถบกว้าง และมีการลดขนาดของตัวโครงสร้างโดยการทำให้เป็นพับ นอกจากนี้ยังมีการกำจัดความถี่ปลอมเทียมโดยใช้สลับแบบเปิดวงจร โดยเรโซเนเตอร์ที่ใช้งานนี้จะมีความสมมาตรกัน โดยมีความถี่กลางในการออกแบบอยู่ที่ 4.5 GHz หลังจากได้มีการปรับแต่งตัวโครงสร้างของเรโซเนเตอร์ และโครงสร้างโดยรวมแล้ว เมื่อทำการสร้างและนำมาวัดทดสอบชิ้นงาน ปรากฏว่าความถี่กลางได้เลื่อนไปอยู่ที่ตำแหน่ง 5.2 GHz ซึ่งเป็นผลมาจากการพยายามปรับแต่งตัวโครงสร้างของเรโซเนเตอร์ เพื่อให้ได้ช่วงความถี่ผ่านแถบที่กว้าง และการกำจัดความถี่ปลอมเทียมได้ดี จนทำให้ ความยาวรวมของเรโซเนเตอร์ เปลี่ยนไป(ลดลง) สำหรับผลการวัดและทดสอบจะมีค่าการสูญเสียใส่แทรกอยู่ที่ 0.2 dB ถึง 2 dB และมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำ

กว่า 7 dB ถึง 20 dB ซึ่งค่าการสูญเสียย้อนกลับที่มีค่าต่ำกว่า 7 dB เป็นผลมาจากการสร้างชิ้นงานที่มีความคลาดของขนาดและระยะการเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์ นอกจากนี้มีแบนด์วิทประมาณ 5 GHz (3-8 GHz) และมีจุดการส่งผ่านศูนย์ ที่ความถี่ประมาณ 3 GHz และ 10 GHz ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากโครงสร้างเป็นการป้อนแบบศูนย์ (zero feed structure) นอกจากนี้ความถี่ปลอมเทียมสามารถกดความถี่ได้ต่ำกว่า -15 dB ตั้งความถี่ 10 GHz ไปจนถึง 17 GHz ซึ่งวงจรกรองความถี่ผ่านแถบกว้างนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในช่วงการสื่อสารไร้สายระยะสั้น, การสื่อสารที่ต้องการใช้แบนด์วิทกว้าง การสื่อสาร OFDM และอื่นๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] L.-Y. Ren, "Tri-band bandpass filters based on dual plane microstrip/DGS slot structure," IEEE Microw. Wireless. Compon. Lett., Vol.20, No.8, 2010, pp.429–431.
- [2] L.-Y. Ren, "Quad-band bandpass filter based on dual-plane microstrip/DGS slot structure," Electron. Lett., Vol 46, No 10, 2010, pp.691–692.
- [3] S. Zhang and L. Zhu, "Compact tri-band bandpass filter based on resonators with U-folded coupled-line," IEEE Microw. Wireless. Compon. Lett., Vol 23, No 5, 2013, pp.258–261.
- [4] S.-C. Lin, "Microstrip dual/quad-band filters with coupled lines and quasi-lumped impedance inverters based on parallel-path transmission," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol 59, No 8, 2011, pp.1937–1946.
- [5] C.-M. Cheng and C.-F. Yang, "Develop quad-band (1.57/2.45/3.5/5.2GHz) bandpass filters on the ceramic substrate," IEEE Microw. Wireless. Compon. Lett., Vol 20, No 5, 2010, pp.268–270.
- [6] X.-Y. Zhang, Q. Xue and B.J. Hu, "Planar tri-band bandpass filter with compact size," IEEE Microw. Wireless. Compon. Lett., Vol 20, No 5, 2010, pp.262–264.
- [7] W.-Y. Chen, M.-H. Weng and S.-J. Chang, "A new tri-band bandpass filter based on stub-loaded step-impedance resonator," IEEE Microw. Wireless. Compon. Lett., Vol 22, No 4, 2012, pp.179–181.
- [8] J. Xu, W. Wu and C. Miao, "Compact microstrip dual/tri-/quad-band bandpass filter using open stubs loaded shorted stepped-impedance resonator," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol 61, No 9, 2013, pp.3187–3199.
- [9] H.-W. Wu, G.-S. Chen and Y.-W. Chen, "New compact triple-passband bandpass filter using multi path-embedded stepped impedance resonators," IEEE Microw. Wireless. Compon. Lett., Vol 24, No 3, 2014, pp.158–160.

- [10] H.-W. Deng, Y.-J. Zhao, X.-S. Zhang, W. Chen and J.-K. Wang, "Compact and high selectivity dual-band dual-mode microstrip BPF with single stepped-impedance resonator," *Electron. Lett.*, Vol 47, No 5, 2011, pp.326–327.
- [11] P. Vélez, J. Naqui and A.F. Prieto, "Differential bandpass filter with common-mode suppression based on open split ring resonators and open complementary split ring resonators," *IEEE Microw. Wireless. Compon. Lett.*, Vol 23, No 1, 2013, pp.471–473.
- [12] X.H. Wu and Q.X. Chu, "Compact differential ultra-wideband bandpass filter with common-mode suppression," *IEEE Microw. Wireless. Compon. Lett.*, Vol 22, No 9, 2012, pp.456–458.
- [13] T.B. Lim and L. Zhu, "Differential-mode ultra-wideband bandpass filter on microstrip line," *Electron. Lett.*, Vol 45, No 55, 2009, pp.1124–1125.
- [14] T.B. Lim and L. Zhu, "Highly selective differential-mode wideband bandpass filter for UWB application," *IEEE Microw. Wireless. Compon. Lett.*, Vol 21, No 3, 2011, pp.133–135.