

การพัฒนางจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างบนไมโครสตริปโดยใช้ระนาบกราวด์มีรอยและสตัป[†]

Development of Wideband Microstrip Bandpass Filters Using DGS and Stub

ณัฐพงศ์ บุตรธนู¹, นิวัตร อังควิษฐพันธ์^{1*}, ศราวุธ ชัยมูล²

Nuttapong Bootthanu¹, Niwat Angkawisittpan^{1*}, Sarawuth Chaimool²

¹หน่วยปฏิบัติการวิจัยแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงคำนวณและระบบเชิงแสง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง
อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 123 หมู่ 16 ถนนมิตรภาพ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง
จังหวัดขอนแก่น 40002

¹Research Unit for Computational Electromagnetics and Optical Systems (CEMOS),

Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai, Maha Sarakham 44150, Thailand.

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Nai-Muang, Muang District,
Khon Kaen 40002, Thailand.

*Corresponding author. Tel.: +668 1661 5995, E-mail: niwat.a@msu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนางจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างด้วยระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดียวพับแขนและสตัป ระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดียวพับแขนทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.1 GHz และ 3.3 GHz ตามลำดับ วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดียวพับแขนและสตัปมีผลการวัดทดสอบวงจรจริงได้ความถี่กลางที่ 2.89 GHz แบนด์วิดท์กว้าง 64.70 % ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} เท่ากับ -3 dB และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} เท่ากับ -16 dB และสามารถลดขนาดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความถี่ฮาร์โมนิกส์ในช่วงความถี่ 4.5 GHz ถึง 8.0 GHz ถึงระดับ -15 dB ซึ่งพบว่าการจำลองการทำงานและการวัดทดสอบวงจรจริง มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

คำสำคัญ: วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้าง โครงสร้างกราวด์มีรอย ไมโครสตริป สตัป

ABSTRACT

This research paper proposed the development of wideband microstrip bandpass filters using defected ground structure (DGS) with folded spurline structure and stub. DGS with folded spurline structure provided the resonant frequencies at 2.1 GHz and 3.3 GHz, respectively. From the measured results of the proposed filters, it obtained the center

frequency of 2.89 GHz with a wide bandwidth of 64.70 %, the transmission coefficients S_{21} of -3 dB and reflection coefficients S_{11} of -16 dB. The transmission coefficients S_{21} were reduced to -15 dB at the stopband of 4.5 - 8.0 GHz. The simulated results and experimental results were in good agreement.

Keywords: Wideband bandpass filters, Defected ground structure, Microstrip, Stub

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้า และระบบการสื่อสารแบบไร้สายมีความจำเป็นต่อมนุษย์ และการเจริญเติบโตทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบอินเทอร์เน็ต เป็นต้น [1-3] ส่วนประกอบหนึ่งของระบบสื่อสารที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย คือ วงจรกรองผ่านแถบความถี่ ลักษณะของวงจรที่มีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ ออกแบบง่าย ราคาถูก ขนาดเล็กกะทัดรัด วงจรมีความสูญเสียต่ำ การตอบสนองความถี่ที่ดี รวมถึงวงจรอยู่ในระนาบเดียวกัน [4-6] การสื่อสารของวงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างเป็นความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย เช่น การสื่อสารบลูทูธ เหมาะสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์หนึ่งไปยังอีกอุปกรณ์หนึ่งโดยไม่ใช้สายสำหรับการรับ-ส่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น ภาพนิ่ง ภาพเคลื่อนไหว และเสียง เป็นต้น [7] การสื่อสารย่านไมโครเวฟที่ผ่านมามีประสิทธิภาพสูงจะมีข้อกำหนดของวงจรกรองความถี่กับสายอากาศ เพราะในสายอากาศเป็นส่วนที่รับสัญญาณ และมีแถบความถี่ที่ไม่ต้องการ จึงจำเป็นต้องใช้วงจรกรองผ่านแถบความถี่คัดกรองก่อน [8-9] วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างมีการออกแบบอยู่หลายเทคนิค โดยเฉพาะเทคนิคโครงสร้างกราวด์มีรอย (Defected ground structure: DGS) [10] เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมนำมาออกแบบมากกว่าเทคนิคอื่น ๆ เพราะสามารถเพิ่มพารามิเตอร์เพื่อลดขนาดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความถี่ฮาร์มอนิกส์ได้

วรรณกรรมที่ทบทวนดังต่อไปนี้ทราบได้ว่า วงจรกรองผ่านแถบความถี่โมดคู่สองความถี่ โดยการโครงสร้างโมดเป็นแบบคู่ขนานกันทำการต่อลงกราวด์ที่ปลายสายของสแต็บทั้งสองข้างร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างสี่เหลี่ยม เนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบคู่ขนานทำให้ขนาดของวงจรมีขนาดใหญ่ [11] ต่อมา มีการนำเสนอการออกแบบวงจรโครงสร้างวงแหวนสามโมด สำหรับวงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างไมโครสตริป ผลลัพธ์คือ วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้าง แต่ช่วงนอกความถี่ใช้งานยังไม่สามารถลดขนาดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความถี่ฮาร์มอนิกส์ได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอการออกแบบวงจรสองวงจรตัวต่อเรียงกันทำให้วงจรนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น [12] ต่อมา มีการนำเสนองจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างบนพื้นฐานสี่โมดโครงสร้างวงแหวน และเชื่อมต่อโครงสร้างตัวยูทางด้านอินพุตและเอาต์พุต เพื่อลดขนาดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความถี่ฮาร์มอนิกส์ การเพิ่มโครงสร้างทางด้านอินพุตและเอาต์พุต ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ขึ้น [13] ต่อมา มีการนำเสนองจรกรองผ่านแถบความถี่โมดคู่สองความถี่โครงสร้างระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างที่เล็ก แต่แบนด์วิดท์แคบ [14] ต่อมา มีการนำเสนองจรกรองผ่านแถบความถี่โมดคู่สองความถี่ ออกแบบวงจรสี่โมดโครงสร้างเป็นแบบคู่ขนานกันทำการต่อลงกราวด์ที่ปลายสายของสแต็บทั้งสองข้างร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างสี่เหลี่ยม เนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบคู่ขนานทำให้ขนาดของ

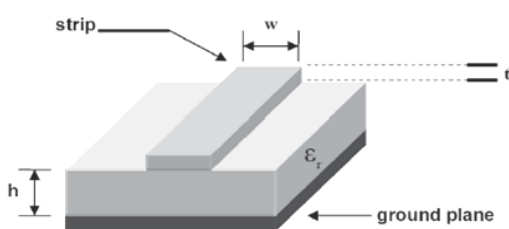
วงจรมีขนาดใหญ่ [15] ต่อมา มีการนำเสนอ วงจรกรองผ่านแถบความถี่ โครงสร้างวงแหวน ร่วมกับ ระบายกราวด์ มีรอยตรงข้ามกับพอร์ตอินพุต และ เอาต์พุต การทำระบายกราวด์ มีรอยทำให้ วงจรมีขนาดเล็ก และ โครงสร้างวงแหวน ทำให้แบนด์วิดท์ กว้าง [16] ต่อมา มีการนำเสนอ การออกแบบ จำลอง วงจรกรองผ่านแถบความถี่ หลายความถี่ โครงสร้าง ฟิน ทีวี ร่วมกับ ระบายกราวด์ มีรอย โครงสร้าง ตัว ยู สามารถลดขนาดของวงจร และ ประยุกต์ใช้งาน ใน ย่านความถี่ C Band คือ 4.0 GHz ถึง 8.0 GHz [17]

จากการ ทบทวนวรรณกรรม ที่ผ่าน มา แล้ว ทำให้ทราบ ถึง ข้อดี ข้อด้อย ของ วงจรกรองผ่านแถบความถี่ ที่ออกแบบ วงจร ด้วย เทคนิค โครงสร้าง ระบายกราวด์ มีรอย ทำให้ ใน บทความ นี้ นำ ข้อดี ข้อด้อย ของ วงจร นำ มา พัฒนา เพื่อ เพิ่ม ประสิทธิภาพ ของ วงจร โดย พัฒนา วงจร โครงสร้าง สลับ ร่วมกับ ระบายกราวด์ มีรอย โครงสร้าง เดียว พับ แฉก บน พื้นฐาน วงจร โมดูล ผลลัพธ์ คือ มี ช่วง แบนด์วิดท์ ที่ กว้าง และ ลดขนาด ค่า สัมประสิทธิ์ การส่งผ่าน ที่ ช่วง ความถี่ ฮาร์โมนิกส์ และ ขนาด ของ วงจรมี ขนาด เล็ก กะทัดรัด

2. การพัฒนา วงจรกรองผ่านแถบความถี่

2.1 สายนำสัญญาณ ไมโครสตริป

เป็นสายนำสัญญาณ ที่ นิยม ใช้งาน มาก สำหรับ การพัฒนา และ ออกแบบ วงจรกรองความถี่ สายอากาศ วงจรขยายสัญญาณ วงจรออสซิลเลเตอร์ และ วงจร มิกเซอร์ เป็นต้น [18-20] สายนำสัญญาณ ไมโครสตริป มี โครงสร้าง บน แผ่น วงจรพิมพ์ ดัง ภาพ ที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างสายนำสัญญาณ ไมโครสตริป [21]

จาก ภาพ ที่ 1 โครงสร้างสายนำสัญญาณ ไมโครสตริป มี ค่า ไดอิเล็กทริก เท่ากับ ϵ_r วัสดุฐานรอง เท่ากับ h แผ่นทองแดง ด้านบน คือ สายนำสัญญาณ ด้านล่าง คือ ระบายกราวด์ เท่ากับ t ความกว้างของสายนำสัญญาณ เท่ากับ w หาได้จาก สมการ ที่ 1-2

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{เมื่อ } \frac{w}{h} \geq 1 \quad (1)$$

$$Z_o = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left\{ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.677 \ln \left(\frac{w}{h} + 1.414 \right) \right\}^{-1} \quad (2)$$

เมื่อ η คือ ค่า อิมพีแดนซ์ ของ คลื่น ใน ท่อ นำ คลื่น มี ค่า เท่ากับ 120π ϵ_{eff} คือ ค่า คง ที่ ไดอิเล็กทริก ประสิทธิภาพ Z_o คือ ค่า อิมพีแดนซ์ ของ สายนำสัญญาณ ไมโครสตริป มี ค่า เท่ากับ 50Ω และ λ_g คือ ความยาวคลื่น ใน ท่อ นำ คลื่น (m) λ_0 คือ ความยาวคลื่น ใน อากาศ (m) สามารถ หา ได้ จาก สมการ ที่ 3-4 เมื่อ c คือ ความเร็ว แสง มี ค่า เท่ากับ 3×10^8 m/s f คือ ความถี่ (Hz)

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (3)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4)$$

2.2 โครงสร้าง ระบายกราวด์ มีรอย

การ เจาะ ลวดลาย ลง ใน ระบายกราวด์ หรือ ทำ ให้ ระบายกราวด์ มี รอย (DGS) บน แผ่น วงจรพิมพ์ โลหะ ของ แผ่น วงจร จะ เปลี่ยน เป็น ผลกระทบ ของ ตัวเก็บประจุ และ ตัวเหนี่ยวนำ ของ รูปแบบ สายนำสัญญาณ ไมโครสตริป บน วงจรไฟฟ้า และการกระจาย ของ กระแส บน ระบายกราวด์ ผลลัพธ์ คือ DGS จะ แสดง คุณสมบัติ คลื่น ที่ เข้า และ ลดขนาด ของ สัญญาณ ใน วงจร ไมโครเวฟ [22] เนื่อง ด้วย โครงสร้าง เดียว พับ แฉก มี ข้อดี คือ สามารถ หยุด แถบ ความถี่ ใน ช่วง นอก ความถี่ ใช้งาน สามารถ ลด ค่า

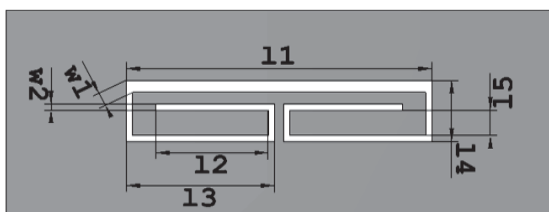
สัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ดี จึงนำมาพัฒนางจร โดยการวิเคราะห์ผล คือป้อนอิมพีแดนซ์ 50Ω เข้าไปในสายนำสัญญาณ (Transmission line: TL) ทางด้านอินพุต และเอาต์พุตพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านวัสดุฐานรองรับบริเวณสายนำสัญญาณระหว่าง DGS โครงสร้างเดียวพบแขนเกิดการเรโซแนนซ์ขึ้นสองโหมด (Dual-mode) คือโหมดคู่และโหมดคี่ [23] ดังรูปที่ 2 มีค่าไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 2.6 ความหนาของแผ่นทองแดง (t) เท่ากับ 0.017 mm. และความสูงของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 1 mm. มีค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 1 สามารถเขียนวงจรสมมูลของ DGS ดังภาพที่ 3 สมการความถี่เรโซแนนซ์ของโหมดคู่ (Even mode) และโหมดคี่ (Odd mode) ดังสมการที่ 5 – 6

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของโครงสร้างระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดียวพบแขน

พารามิเตอร์	ขนาด	พารามิเตอร์	ขนาด
w1	1 mm	l3	9.3 mm
w2	0.4 mm	l4	4.3 mm
l1	20 mm	l5	1.7 mm
l2	7.2 mm		

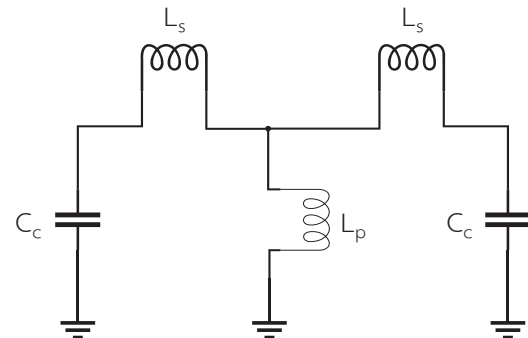
$$f_{\text{even}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + 2L_p)C_c}} \quad (5)$$

$$f_{\text{odd}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_c}} \quad (6)$$



ภาพที่ 2 โครงสร้างระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดียวพบแขน

จากภาพที่ 2 เกิดความถี่เรโซแนนซ์ขึ้นสองโหมดที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.1 GHz และ 3.3 GHz ตามลำดับจากนั้นทำการปรับความยาว l_2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพความสัมพันธ์การเรโซแนนซ์ ดังตารางที่ 2

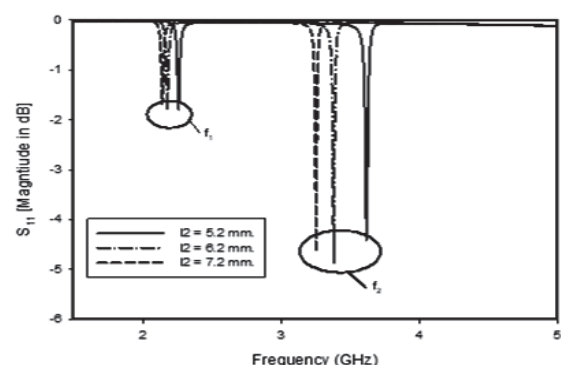


ภาพที่ 3 วงจรสมมูลโครงสร้างระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดียวพบแขน

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์การเรโซแนนซ์ของวงจร

l_2	f_2
5.2 mm	3.8 GHz
6.2 mm	3.5 GHz
7.2 mm	3.3 GHz

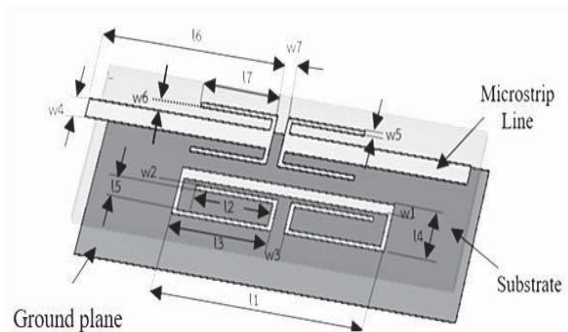
แสดงให้เห็นว่าเมื่อ l_2 ยาวขึ้นทำให้ความถี่ f_2 ลดลงและ l_2 ลดลงทำให้ความถี่ f_2 เพิ่มขึ้นโดยมีผลการจำลองการเกิดเรโซแนนซ์วงจรที่มีการปรับความยาว l_2 ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลตอบสนองของ S-Parameters จากการจำลองของโครงสร้างระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดียวพบแขนที่มีการปรับความยาว l_2

2.3 โครงสร้างสตัป

วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโครงสร้างสตัปร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดือยพับแบน ดังภาพที่ 5 มีค่าไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 2.6 แผ่นทองแดงมีความหนา (t) เท่ากับ 0.017 mm. และความสูงของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 1 mm. มีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3



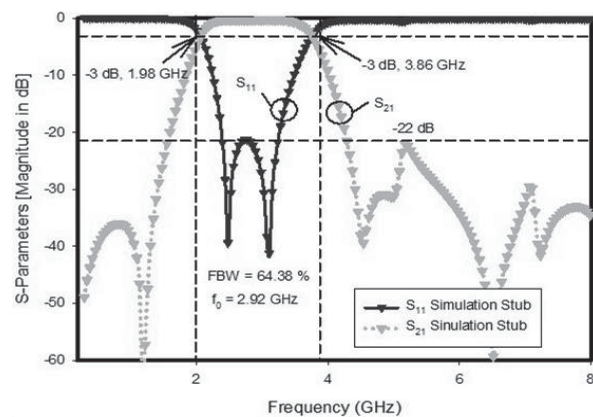
ภาพที่ 5 วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโครงสร้างสตัปร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดือยพับแบน

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโครงสร้างสตัปร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดือยพับแบน

พารามิเตอร์	ขนาด	พารามิเตอร์	ขนาด
w1	0.8 mm	l1	19.6 mm
w2	0.4 mm	l2	8.2 mm
w3	0.6 mm	l3	9.3 mm
w4	1.7 mm	l4	4.3 mm
w5	0.4 mm	l5	1.7 mm
w6	1 mm	l6	17 mm
w7	1 mm	l7	7 mm

การทำงานของวงจร w1 ทำหน้าที่ควบคุมโมดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} โมดที่ 1 เกิดขึ้น

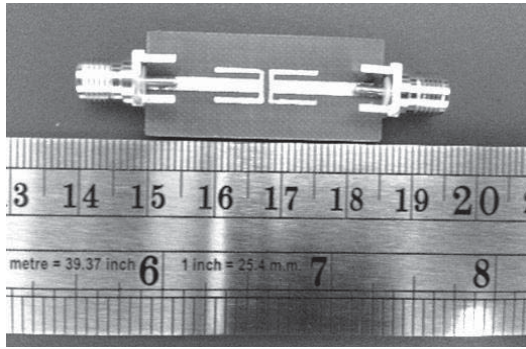
ที่ -40 dB ที่ความถี่ 2.47 GHz โมดที่ 2 เกิดขึ้นที่ -43 dB ที่ความถี่ 3.11 GHz และ l5 ทำหน้าที่ควบคุมแบนด์วิดท์ให้กว้างขึ้นหรือแคบลง เมื่อ l5 มีความยาวมากขึ้น แบนด์วิดท์จะแคบลง เมื่อ l5 มีความยาวลดลง แบนด์วิดท์จะกว้างมากขึ้น วงจรนี้มีแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 1.98 GHz ถึง 3.86 GHz ความถี่กลางที่ 2.92 GHz แบนด์วิดท์กว้าง (FBW) 64.38 % ในช่วงนอกความถี่ใช้งาน 4.5 GHz ถึง 8.0 GHz สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความถี่ฮาร์มอนิกส์ได้ถึงระดับ -22 dB ดังภาพที่ 6



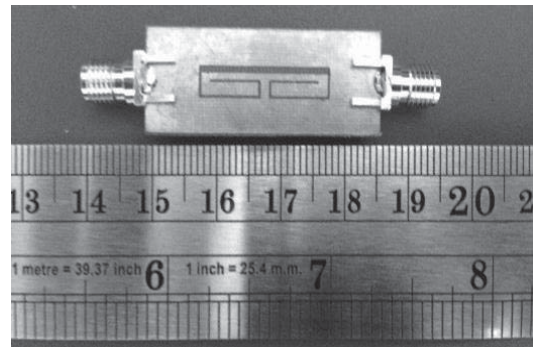
ภาพที่ 6 ผลตอบสนองของ S-Parameters จากการจำลองของวงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโครงสร้างสตัปร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดือยพับแบน

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

เมื่อจำลองผลการทำางานวงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโครงสร้างสตัปร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดือยพับแบน ขั้นตอนถัดไปทำการสร้างวงจรจริงจากวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์ Arlon AD260A มีค่าไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 2.6 แผ่นทองแดงมีความหนา (t) เท่ากับ 0.017 mm. และความสูงของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 1 mm. ดังภาพที่ 7



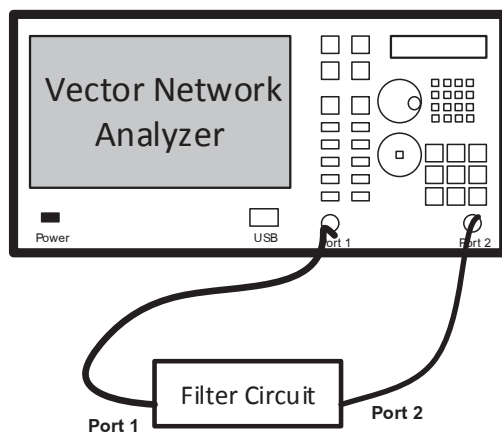
(ก) โครงสร้างด้านบน



(ข) โครงสร้างด้านล่าง (ระนาบกราวด์)

ภาพที่ 7 วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโครงสร้างสลับร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดียวพับแขน

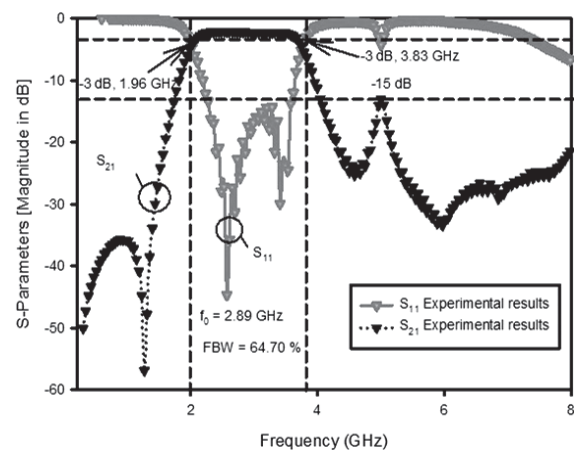
จากภาพที่ 7 นำวงจรที่สร้างขึ้นไปวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ยี่ห้อ Agilent Keysight รุ่น E5071C ดังภาพที่ 8 ผลลัพธ์คือมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} เท่ากับ -3 dB และค่าการค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11}



ภาพที่ 8 การวัดวงจรด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

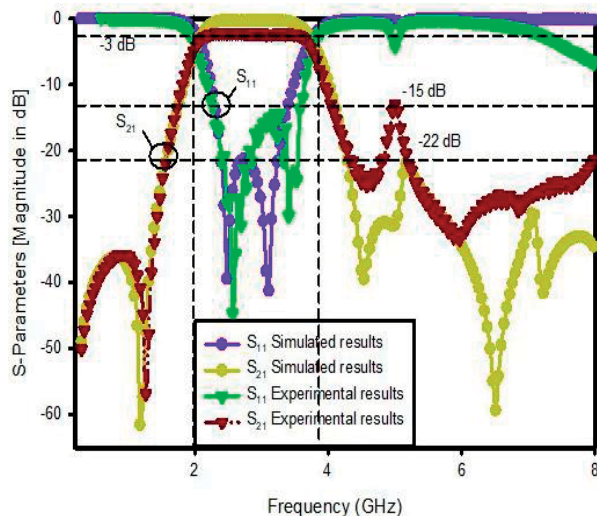
ขั้นตอนถัดไป เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองวงจรกับผลการทดสอบวัดวงจรจริง ผลลัพธ์คือผลการจำลองวงจรกับผลการทดสอบวัดวงจรจริงมี

เท่ากับ -16 dB มีแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 1.96 GHz ถึง 3.83 GHz ความถี่กลางที่ 2.89 GHz แบนด์วิดท์กว้าง (FBW) 64.70 % ในช่วงนอกความถี่ใช้งาน 4.5 GHz ถึง 8.0 GHz สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความถี่ฮาร์มอนิกส์ได้ถึงระดับ -15 dB ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ผลการทดสอบวงจรจริงจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

ความสอดคล้องกันความกว้างของแบนด์วิดท์ (FBW) ต่างกัน 0.32 % ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบผลการทดสอบวัดวงจรจริงกับผลการจำลองของวงจร

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการจำลองวงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโครงสร้างสแต็คร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดือยพับแบน ความถี่กลางที่ 2.92 GHz แบนด์วิดท์กว้าง (FBW) 64.38% สำหรับผลการทดสอบวัดวงจรจริง ความถี่กลางที่ 2.89 GHz แบนด์วิดท์กว้าง (FBW) 64.70% ระหว่างผลการจำลองของวงจรกับผลการทดสอบวัดวงจรจริงมีความกว้างของแบนด์วิดท์ (FBW) ต่างกันอยู่ 0.32% ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีขนาดของวงจรมีขนาดเล็กกะทัดรัดวงจรที่สร้างขึ้นมานี้มีประสิทธิภาพ จากการเปรียบเทียบงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4 และการพัฒนาในอนาคตสามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการออกแบบในช่วงความถี่อื่นๆ และนำไปประยุกต์กับวงจรกรองหยุดแถบความถี่ในย่านความถี่ C Band 4 GHz ถึง 8 GHz เป็นต้น

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบคุณสมบัติงานวิจัยที่ผ่านมา

f_c (GHz)	FBW (%)	Size	Out of Band (dB)	Ref.
1.49	56.1	$(0.5\lambda_g)^2$	-20	[7]
1.45	57.9	$(0.8\lambda_g)^2$	-10	[15]
2.54	5.3	$(0.8\lambda_g)^2$	-15	[16]
2.45	32	$(0.68\lambda_g)^2$	-16	[23]
2.27	63.4	$(0.5\lambda_g)^2$	-22	[23]
2.89	64.70	$(0.49\lambda_g)^2$	-15	เทคนิคที่ นำเสนอ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยแม่เหล็กไฟฟ้า เชิงคำนวณ และระบบเชิงแสง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และเครื่องมือในการทำงานวิจัย

6. อ้างอิง

- [1] พิรวัจน์ มีสุข, กวินชัย ต้องตรงทรัพย์, ธนวัต ม่วงโคกสูง และคณะ. การทดสอบการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. 2560; 11:62-68.
- [2] วีระศักดิ์ ไชยชาญ, ศักราข ทองนอก, เพียรดี อ่อนยิ่ง และคณะ. การศึกษาและออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดแกนแนวตั้งสำหรับที่อัตราเร็วลมต่ำ. วารสารวิจัย มทร. กรุงเทพ. 2560; 11:17-25.

- [3] Singh L., Dr. Singhal PK.. Design and analysis of hairpin line bandpass filter. I.J.A.R.E.C.E. 2013; 2:228-230.
- [4] Hong JS. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. 2nd Ed. New Jersey:Wiley; 2011.
- [5] Pozar DM. Microwave Engineering. 2nd Ed. New York:Wiley; 1998.
- [6] Mattaei GL., Young L., Jones EMT. Microwave Filters Impedance-Matching Network and Coupling Structures. Norwood. MA:Artech House; 1980.
- [7] Ahmadi A., Makki SV., Lalbakhsh A., et al. A Novel Dual-Mode Wideband Bandpass Filter. ACES Journal September 2014; 29:735-742.
- [8] Gunjal SR., Pawase R.S., Labade RP. Design and analysis of microstrip hairpin bandpass filter for ISM band. I.J.A.R.E.E.I.E. 2016; 5:5529-5532.
- [9] Darwis F., Permana D. Design and simulation of 456 MHz Bandpass Filter for Radar system. Proc. 6th National Radar Seminar and International Conference on Radar Antenna Microwave Electronics and Telecommunications (ICRAMET); Bali; 2012; 68-72.
- [10] Boutejdar A., Omar A., Burte EP. et al. An Improvement of Defected Ground Structure Lowpass/Bandpass Filters Using H-Slot Resonators and Coupling Matrix Method. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications 2011; 10:193-195.
- [11] El-Shaarawy BH., Coccetti F. Compact Bandpass Ring Resonator Filter With Enhanced Wide-Band Rejection Characteristics Using Defected Ground Structures. IEEE Microwave and Wireless Components Letters August 2008; 18:500-502.
- [12] Srisathit K., Worapishet A., Surakamponorn W. Design of Triple-Mode Ring Resonator for Wideband Microstrip Bandpass Filters. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques November 2010; 58:2867-2877.
- [13] Fan J., Zhan D., Jin C., et al. Wideband Microstrip Bandpass Filter Based on Quadruple Mode Ring Resonator. IEEE Microwave and Wireless Components Letters 2012; 22:348-350.
- [14] Liu H., Li Sh., Li YS., et al. Dual-mode dual-band bandpass filters design using open-loop slotline resonators. IET Microw, Antennas Propag 2013; 7:1027-1034.
- [15] Jin Xu, Wen Wu. Compact and Sharp Skirts Microstrip Dual-Mode Dual-Band Bandpass Filter Using a Single Quadruple-Mode Resonator (QMR). IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 2013; 61:1104-1113.

- [16] Chen D., Zhu L., Bu H., et al. Differential bandpass filter on dual-mode ring resonator with slotline feeding scheme. Electronics Letters 17th 2015; 51:1512–1514.
- [17] Misra A., Kumar M. Design Simulation and Analysis of Hairpin Filter using Defected Ground Structures. IJSRT 2018; 4:261-264.
- [18] Ludwig R., Bretchko P. RF Circuit Design Theory and Applications. Prentice Hall. New Jersey; 2000.
- [19] Kinayman N., Aksun Ml. Modern Microwave Circuits. Artech House. Boston; 2005.
- [20] Gupta KC., Garg R., Bahl I., et al. Microstrip Line and Slotlines. Seconed Edition Artch House. Boston; 1996.
- [21] จักรพันธ์ ออบมา, นิวัตร อังควิชิษฐ์พันธ์. การลดสัญญาณแทรกข้ามในสายส่งแบบไมโครสตริปความถี่ย่านไมโครเวฟ. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ มอ. 2559; 9:118-130.
- [22] Peg B. Compact Quad-Mode Bandpass Filter Based on Quad-Mode DGS Resonator. IEEE Microwave and Wireless Components Letters 2016; 26:234-236.
- [23] Peg B. Wideband Bandpass Filter with High Selectivity Based on Dual-Mode DGS Resonator. Microwave and Optical Technology Letter 2016; 58:2300-2303.