

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

บทความนี้นำเสนอการพัฒนางจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างด้วยระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดียวพับแบนและสตัป ระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดียวพับแบนทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.1 GHz และ 3.3 GHz ตามลำดับ วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดียวพับแบนและสตัปมีผลการวัดทดสอบวงจรจริงได้ความถี่กลางที่ 2.89 GHz แบนด์วิดท์กว้าง 64.70 % ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} เท่ากับ -3 dB และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} เท่ากับ -16 dB และสามารถลดขนาดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความถี่ฮาร์โมนิกในช่องความถี่ 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 โดยการโครงสร้างสี่โมดเป็นแบบคู่ขนานกันทำการต่อลงกราวด์ที่ปลายสายของสแต็บทั้งสองข้างร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างสี่เหลี่ยม 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

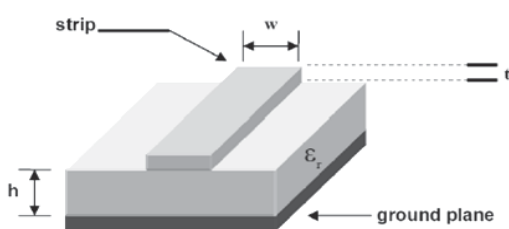
วงจรมีขนาดใหญ่ [15] ต่อมา มีการนำเสนอวงจรกรองผ่านแถบความถี่โครงสร้างวงแหวน ร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยตรงข้ามกับพอร์ตอินพุต และเอาต์พุต การทำระนาบกราวด์มีรอยทำให้วงจรมีขนาดเล็ก และโครงสร้างวงแหวนทำให้แบนด์วิดท์กว้าง [16] ต่อมา มีการนำเสนอการออกแบบจำลองวงจรกรองผ่านแถบความถี่หลายความถี่โครงสร้างพื้นผิวร่วมกับระนาบกราวด์ มีรอยโครงสร้างตัวยูสามารถลดขนาดของวงจรและประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ C Band คือ 4.0 GHz ถึง 8.0 GHz [17]

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาแล้วทำให้ทราบถึงข้อดีข้อด้อยของวงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่ออกแบบวงจรด้วยเทคนิคโครงสร้างระนาบกราวด์มีรอย ทำให้ในบทความนี้ นำข้อดีข้อด้อยของวงจรมานำมาพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจร โดยพัฒนาวงจรโครงสร้างสลับร่วมกับระนาบกราวด์ มีรอยโครงสร้างเดี่ยวพับแขน บนพื้นฐานวงจรโมดูลผลลัพธ์คือมีช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้าง และลดขนาดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความถี่ฮาร์โมนิกส์ และขนาดของวงจรมีขนาดเล็กกะทัดรัด

2. การพัฒนาวงจรกรองผ่านแถบความถี่

2.1 สายนำสัญญาณไมโครสตริป

เป็นสายนำสัญญาณที่นิยมใช้งานมาก สำหรับการ พัฒนา และออกแบบวงจรความถี่สายอากาศ วงจรขยายสัญญาณ วงจรออสซิลเลเตอร์ และวงจรมิกเซอร์ เป็นต้น [18-20] สายนำสัญญาณไมโครสตริปมีโครงสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป [21]

จากภาพที่ 1 โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริปมีค่าไดอิเล็กตริก เท่ากับ ϵ_r วัสดุฐานรอง เท่ากับ h แผ่นทองแดงด้านบน คือสายนำสัญญาณด้านล่าง คือระนาบกราวด์ เท่ากับ t ความกว้างของสายนำสัญญาณ เท่ากับ w หาได้จากสมการที่ 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 คือค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นในท่อนำคลื่น มีค่าเท่ากับ 120π ϵ_{eff} คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล Z_o คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณไมโครสตริป มีค่าเท่ากับ 50Ω และ λ_g คือความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (m) λ_0 คือความยาวคลื่นในอากาศ (m) สามารถหาได้จากสมการที่ 3-4 เมื่อ c คือความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s f คือความถี่ (Hz)

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

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

2.2 โครงสร้างระนาบกราวด์มีรอย

การเจาะลดขนาดลงในระนาบกราวด์ หรือทำให้ระนาบกราวด์มีรอย (DGS) บนแผ่นวงจรพิมพ์โลหะของแผ่นวงจรจะเปลี่ยนเป็นผลกระทบของตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำของรูปแบบสายนำสัญญาณไมโครสตริปบนวงจรไฟฟ้า และการกระจายของกระแสบนระนาบกราวด์ผลลัพธ์คือ DGS จะแสดงคุณลักษณะคลื่นที่เข้าและลดขนาดของสัญญาณในวงจรไมโครเวฟ [22] เนื่องด้วยโครงสร้างเดี่ยวพับแขน มีข้อดีคือสามารถหยุดแถบความถี่ในช่วงนอกความถี่ใช้งาน สามารถลดค่า

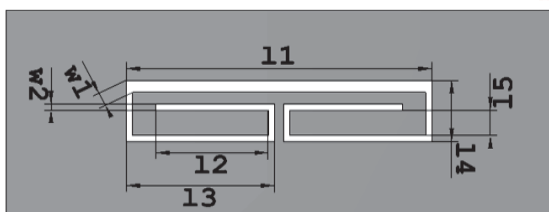
สัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ดี จึงนำมาพัฒนางจร โดยการวิเคราะห์ผล คือป้อนอิมพีแดนซ์ 50Ω เข้าไปในสายนำสัญญาณ (Transmission line: TL) ทางด้านอินพุต และเอาต์พุตพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านวัสดุฐานรองรับบริเวณสายนำสัญญาณระหว่าง DGS โครงสร้างเดียวพับแบนเกิด การเรโซแนนซ์ขึ้นสองโหมด (Dual-mode) คือโหมดคู่ และโหมดคี่ [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 พารามิเตอร์ของโครงสร้างระนาบกราวด์มีรอยโค้งโครงสร้างเดียวพับแบน

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		

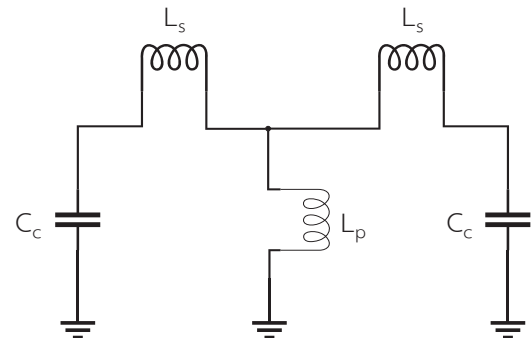
$$f_{\text{even}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + 2L_p)C_c}} \quad (5)$$

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



ภาพที่ 2 โครงสร้างระนาบกราวด์มีรอยโค้งโครงสร้างเดียวพับแบน

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

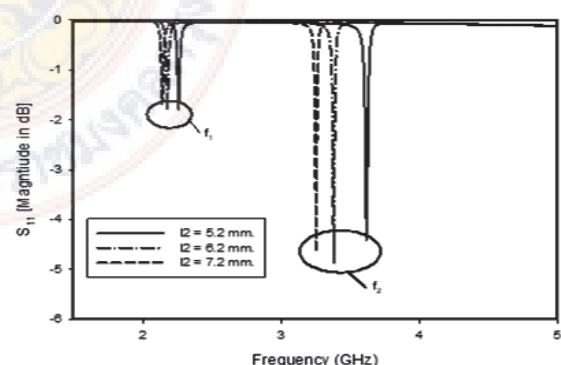


ภาพที่ 3 วงจรสมมูลโครงสร้างระนาบกราวด์มีรอยโค้งโครงสร้างเดียวพับแบน

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

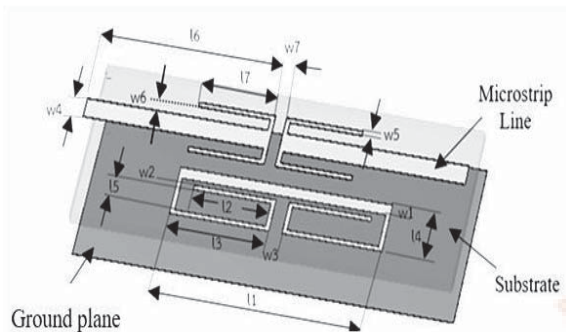
แสดงให้เห็นว่าเมื่อ l_2 ยาวขึ้นทำให้ความถี่ f_2 ลดลงและ l_2 ลดลงทำให้ความถี่ f_2 เพิ่มขึ้นโดยมีผลการจำลองการเกิดเรโซแนนซ์วงจรที่มีการปรับความยาว l_2 ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลตอบสนองของ S-Parameters จากการจำลองของโครงสร้างระนาบกราวด์มีรอยโค้งโครงสร้างเดียวพับแบนที่มีการปรับความยาว 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



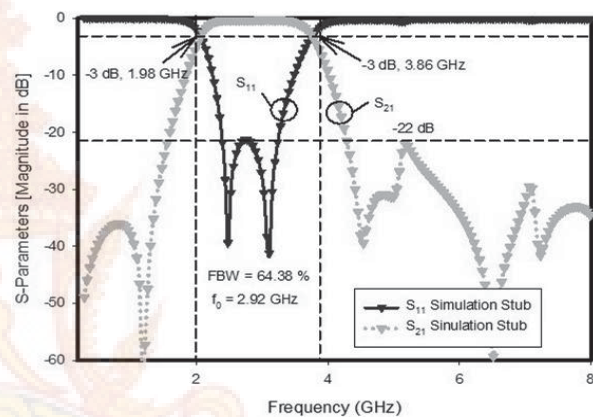
ภาพที่ 5 วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโครงสร้างสตัปร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดือยพับแบน

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

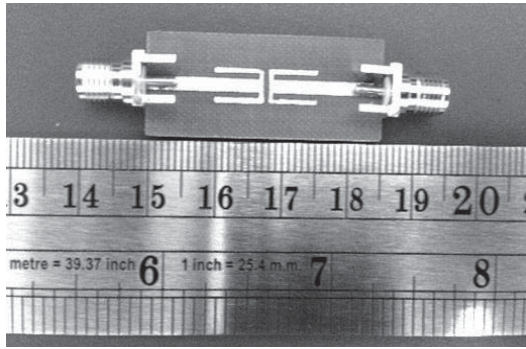
ที่ -40 dB ที่ความถี่ 2.47 GHz โมดที่ 2 เกิดขึ้นที่ -43 dB ที่ความถี่ 3.11 GHz และ l5 ทำหน้าที่ควบคุมแบนด์วิดท์ให้กว้างขึ้นหรือแคบลง เมื่อ l5 มีความยาวมากขึ้น แบนด์วิดท์จะแคบลง เมื่อ l5 มีความยาวลดลง แบนด์วิดท์จะกว้างมากขึ้น วงจรนี้มีแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 1.98 GHz ถึง 3.86 GHz ความถี่กลางที่ 2.92 GHz แบนด์วิดท์กว้าง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



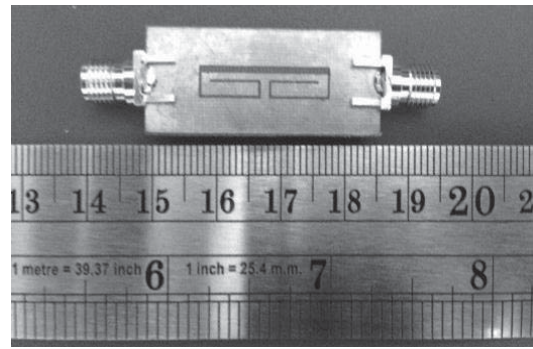
ภาพที่ 6 ผลตอบสนองของ S-Parameters จากการจำลองของวงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโครงสร้างสตัปร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดือยพับแบน

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

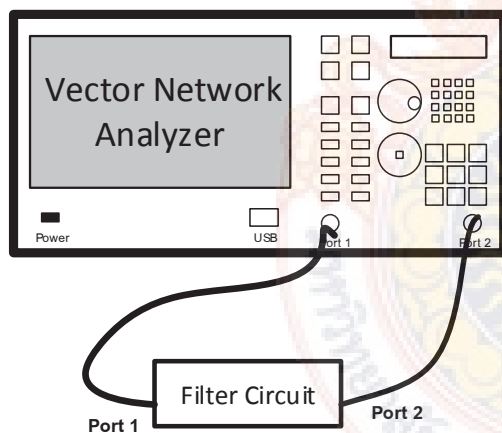


(ข) โครงสร้างด้านล่าง (ระนาบกราวด์)

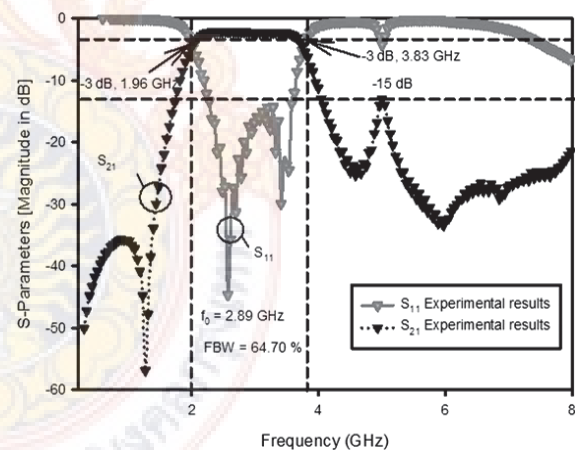
ภาพที่ 7 วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโครงสร้างสแต็คร่วมกับระนาบกราวด์มีรอยโครงสร้างเดียวพับแขน

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

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



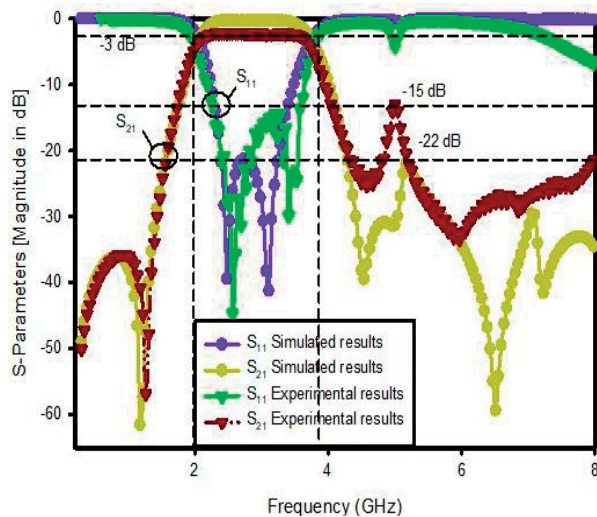
ภาพที่ 8 การวัดวงจรด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์



ภาพที่ 9 ผลการทดสอบวงจรจริงจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

ขั้นตอนถัดไป เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองวงจรกับผลการทดสอบวัดวงจรจริง ผลลัพธ์คือผลการจำลองวงจรกับผลการทดสอบวัดวงจรจริงมี

ความสอดคล้องกันความกว้างของแบนด์วิดท์ (FBW) ต่างกัน 0.32 % ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบผลการทดสอบวัดวงจร
จริงกับผลการจำลองของวงจร

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการจำลองวงจรกรองผ่านแถบความถี่
กว้างโครงสร้างสแต็คร่วมกับระนาบกราวด์มีรอย
โครงสร้างเดือยพับแขน ความถี่กลางที่ 2.92 GHz
แบนด์วิดท์กว้าง (FBW) 64.38% สำหรับผลการ
ทดสอบวัดวงจรจริง ความถี่กลางที่ 2.89 GHz
แบนด์วิดท์กว้าง (FBW) 64.70% ระหว่างผล
การจำลองของวงจรกับผลการทดสอบวัดวงจร
จริงมีความกว้างของแบนด์วิดท์ (FBW) ต่างกัน
อยู่ 0.32% ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกัน
เป็นอย่างดีขนาดของวงจรมีขนาดเล็กกะทัดรัด
วงจรที่สร้างขึ้นมานี้มีประสิทธิภาพ จากการ
เปรียบเทียบงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงดังตารางที่ 4
และการพัฒนาในอนาคตสามารถนำเทคนิคนี้ไป
ใช้ในการออกแบบในช่วงความถี่อื่นๆ และนำไป
ประยุกต์กับวงจรกรองหยุดแถบความถี่ในย่าน
ความถี่ 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

ขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยแม่เหล็ก
ไฟฟ้า เชิงคำนวณ และระบบเชิงแสง คณะวิศวกรรม
ศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และสาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ
อุดรธานี ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และเครื่องมือใน
การทำงานวิจัย

6. อ้างอิง

- [1] พิศวจน์ มีสุข, กวินชัย ต้องตรงทรัพย์,
ธนวัต ม่วงโคกสูง และคณะ. การทดสอบ
การผลิตพลังงานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็ก
ทริกโมดูล. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. 2560;
11:62-68.
- [2] วีระศักดิ์ ไชยชาญ, ศักราข ทองนอก,
เพียรดี อ่อนยิ่ง และคณะ. การศึกษาและ
ออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดแกนแนว
ตั้งสำหรับที่อัตราเร็วลมต่ำ. 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. Second Edition Artech House. Boston; 1996.
- [21] จักรพันธ์ ออบมา, นิวัตร อังควิชิฐพันธ์. 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.