

การออกแบบวงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบ
แบบสายส่งเชื่อมต่อกู่ขนานไมโครสตริปที่ชดเชยด้วยสายส่งแบบขั้น

**A Design of Microstrip Branch-Line Coupler with Bandstop Filter
Based on SITLs Compensated Parallel Coupled Lines**

สมกวร ศรีสวัสดิ์ (Somkuan Srisawat)* ดร.นิวัตร อังควิชยัฐพันธ์ (Dr.Niwat Angkawisitpan)^{1**}

(Received: January 30, 2019; Revised: March 18, 2019; Accepted: March 23, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพสายส่งเชื่อมต่อบรานซ์ไลน์ ด้วยการใส่แทรกวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อกู่ขนานไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น เพื่อลดผลตอบสนองความถี่ปลอมที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 และสามารถลดขนาดพื้นที่ของวงจรได้ การออกแบบวงจรกรองความถี่หยุดแถบได้ใช้สมการคำนวณค่าตัวแปรของวงจร สำหรับการพิสูจน์สมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ ทำได้ด้วยการสร้างวงจบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับแบบนำเสนอที่ความถี่ทำงาน 0.9 กิกะเฮิร์ตซ์ที่นิยมใช้งาน ซึ่งพบว่าวงจรที่นำเสนอมีสมรรถนะเหนือกว่าวงจบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม และสามารถลดผลตอบสนองปลอมที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ได้น้อยกว่า -38.40 เดซิเบลและค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่า -38.29 เดซิเบลด้วย

ABSTRACT

This paper presented the improvement of Branch Line Coupler using the Bandstop Filter based on microstrip parallel coupled lines for the second harmonic suppression and the size minimization. To design the bandstop filter for the proposed coupler, equations were applied to determine variables for the proposed coupler. For validation of the performance of the proposed coupler, conventional coupler and the proposed coupler were fabricated and tested at the popular operating frequency of 0.9 GHz. From the measured results, it was shown that the proposed coupler exhibited the better performance. The second harmonic could be suppressed. It was less than -38.40 dB. Also, the return loss was less than -38.29 dB.

คำสำคัญ: วงจรกรองความถี่หยุดแถบ บรานซ์ไลน์ระงับความถี่ปลอมที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 2

Keywords: Bandstop filter, Branch line suppression, Branch line coupler

¹Correspondent author: niwat.a@msu.ac.th

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หน่วยปฏิบัติการวิจัยแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงคำนวณและระบบเชิงแสง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



บทนำ

บรานซ์ไลน์คัปเปอเรอร์หรือควอเตรเจอร์ไฮบริด เป็นอุปกรณ์แบ่ง/รวมกำลังงานประเภท 4 พอร์ต ใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายย่านความถี่วิทยุและไมโครเวฟ โครงสร้างของวงจรประกอบด้วยสายส่ง 2 คู่ ที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสองค่าคือ 50 โอห์ม และ 35.35 โอห์ม ตามลำดับ มีความยาวทางไฟฟ้า 90 องศา และมีผลต่างเฟสระหว่างสัญญาณเอาต์พุต 90 องศา จึงทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านไมโครเวฟได้หลากหลาย เช่น วงจรเลื่อนเฟส วงจรมิกเซอร์ การเพิ่มสมรรถนะวงจรขยายสัญญาณ วงจรออสซิลเลเตอร์ในเครื่องรับส่งวิทยุระบบดิจิทัล แบบสองเอาต์พุตที่มีผลต่างเฟส 90 องศา เป็นต้น

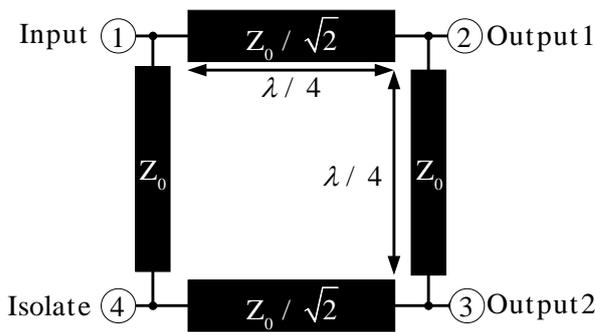
วงจรสายส่งบรานซ์ไลน์ไมโครสตริปแบบดั้งเดิม [1] เป็นวงจรมีประสิทธิภาพในการทำงานคืออยู่แล้ว แต่มีข้อด้อยคือวงจรมีพื้นที่ขนาดใหญ่ และมีสัญญาณปลอมเทียมนี่เกิดจากองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 จากสาเหตุดังกล่าวจึงได้มีงานวิจัยหลายงานที่นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงสมรรถนะวงจรสายส่งบรานซ์ไลน์ในแนวทางของการลดขนาดวงจร และลดขนาดของสัญญาณปลอมเทียมนี่เกิดจากองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิก เช่น การใช้เทคนิคสายส่งแบบชะลอความเร็วคลื่น [2] ด้วยการเชื่อมต่อสายส่งอิมพีแดนซ์แบบสลับค่าสูงและต่ำ ขนานภายในทั้ง 4 ด้านของสายส่งในวงจรบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการทำงานของวงจรดีขึ้น พื้นที่ของวงจรมีขนาดกะทัดรัด แต่มีข้อจำกัดในเรื่องการปรับค่าวงจร เนื่องจากการเพิ่มส่วนต่อขนานภายในวงจรและระยะห่างของช่องว่างระหว่างสายส่งอิมพีแดนซ์แบบสูง-ต่ำ มีขนาดเล็กมาก เทคนิคต่อมาเป็นการนำสายส่งสลับแบบเปิดปลายสายมาเชื่อมต่อกับสายส่งในวงจรบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม [3] รวมทั้งการเชื่อมต่อตัวคาปาซิเตอร์รูปก้างปลาขนานกับพอร์ตภายในทั้งสี่ด้าน [4] แต่ก็มีข้อจำกัดเรื่องการสร้างวงจรและการปรับค่า เพราะพื้นที่ภายในวงจรมีช่องว่างระยะแคบๆ เกิดขึ้นระหว่างวงจรกับส่วนที่เชื่อมต่อขนาน เทคนิคถัดมาเป็นการใส่แทรกสายส่งค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ลงในวงจรสายส่งบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม เพื่อลดขนาดวงจร [5] การต่อสายส่งสลับแบบเปิดปลายสายรูปร่างตัวที ขนานตรงกึ่งกลางของสายส่งแบบดั้งเดิมทั้งสี่ส่วน ซึ่งสามารถลดทอนสัญญาณปลอมเทียมนี่ได้ในพิสัยกว้างในย่านความถี่ที่สูงขึ้น [6] และเทคนิคที่น่าสนใจอีกเทคนิคหนึ่งคือ การใส่แทรกสายส่งที่มีพฤติกรรมเป็นวงจรรองความถี่หยุดแถบ [7] เพื่อลดทอนองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกอันดับสูงซึ่งสามารถลดทอนได้น้อยกว่า -20 เดซิเบล

จากบทความวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นบทความวิจัยที่เน้นการเพิ่มสมรรถนะของวงจรด้วย การลดขนาดพื้นที่ และการลดขนาดสัญญาณปลอมเทียมนี่ของวงจร ที่เกิดจากองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว สัญญาณปลอมเทียมนี่ที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของวงจรในระบบสื่อสารความถี่วิทยุมากที่สุด ก็คือสัญญาณปลอมเทียมนี่เกิดจากองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 อีกประเด็นที่สำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา ก็คือความยุ่งยากในการปรับโครงสร้างของวงจรในขั้นตอนของการสร้างลายวงจรพิมพ์เพื่อให้วงจรทำงานตามที่ออกแบบในเทคนิคที่กล่าวมานั้นการออกแบบค่อนข้างยุ่งยากและใช้เวลา เพราะไม่มีสมการสำเร็จรูปอย่างง่ายในการออกแบบ ดังนั้นในบทความนี้แนะนำเทคนิคอย่างง่าย ในการออกแบบและสร้างสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ ด้วยเทคนิคการใส่แทรกวงจรรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป เพื่อลดขนาดวงจรและขนาดสัญญาณปลอมเทียมนี่จากความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรสายส่งบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม พบว่าวงจรที่แนะนำมีขนาดพื้นที่ วงจรลดลง 8 เปอร์เซ็นต์และสามารถลดทอนขนาดสัญญาณปลอมเทียมนี่ได้น้อยกว่า -38.40 เดซิเบล ในขณะที่ค่าอัตราการแยกโคโคและการสูญเสียย้อนกลับที่พอร์ตอินพุตของวงจรที่วัดได้ มีค่าน้อยกว่า -33.78 และ -38.29 เดซิเบล ตามลำดับ

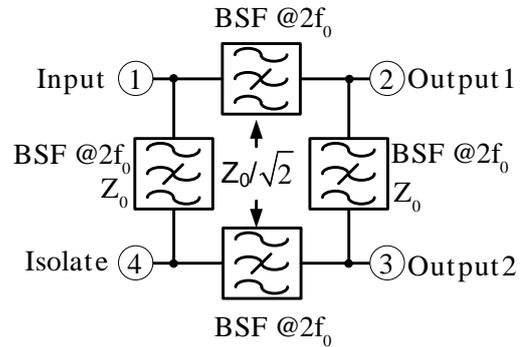
วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ออกแบบและสร้างวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ ด้วยการใส่แทรกวงจรกรองความถี่แบบหยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปที่ชดเชยด้วยสายส่งแบบขึ้น
2. ลดขนาดพื้นที่วงจบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม ที่ความถี่ทำงาน 0.9 กิกะเฮิรตซ์และระดับความถี่ปลอมเทียมฮาร์โมนิกอันดับที่ 2

วิธีการวิจัย



(ก)



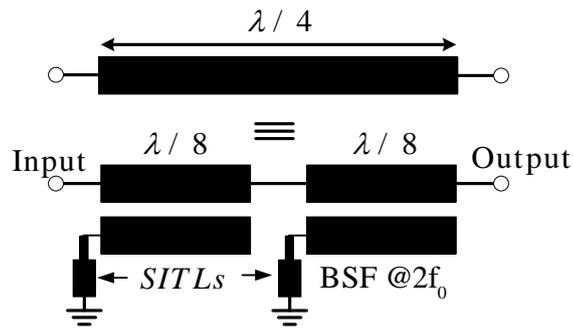
(ข)

ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างสายส่ง (ก) วงจรสายส่งบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม และ (ข) วงจรสายส่งบรานซ์ไลน์แบบนำเสนอ

ทฤษฎีสายส่งบรานซ์ไลน์

1. พื้นฐานวงจบบรานซ์ไลน์

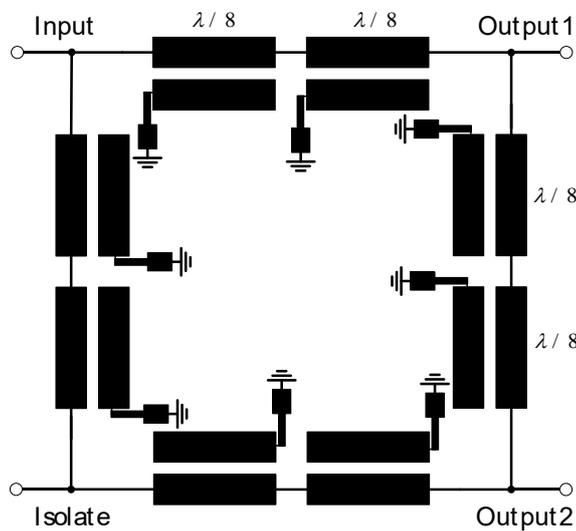
โครงสร้างวงจรสายส่งแบบบรานซ์ไลน์ ประกอบด้วยสายส่งจำนวนสองคู่ที่ประกอบไปด้วย สายส่งคู่แรกวางตัวในแนวตั้ง มีค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะ Z_0 เท่ากับ 50 โอห์ม ส่วนสายส่งคู่ที่สอง วางตัวในแนวนอน มีค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะเท่ากับ $Z_0/\sqrt{2}$ หรือ 35.35 โอห์ม ในระบบ 50 โอห์ม แสดงดังภาพที่ 1 (ก) โดยสายส่งแต่ละเส้นมีค่าความยาวทางไฟฟ้าเท่ากับ 90 องศา ($\theta = \pi/2$) วงจรสายส่งแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์เป็นวงจรที่ใช้แบ่งหรือรวมกำลังงาน โดยมีพอร์ต 1 เป็นพอร์ตอินพุต พอร์ตหมายเลข 2 และ 3 เป็นพอร์ตเอาต์พุต ที่มีมุมต่างเฟสระหว่างสัญญาณเอาต์พุต $\Theta = \angle S_{31} - \angle S_{21}$ เท่ากับ 90 องศา มีพอร์ตหมายเลข 4 เป็นพอร์ตแยกโคด ในภาพที่ 1 (ข) เป็นแนวคิดของวงจบบรานซ์ไลน์แบบนำเสนอ โดยการใส่แทรกวงจรกรองความถี่หยุดแถบแทนที่สายส่งแบบธรรมดา ในภาพที่ 1 (ก) โดยวงจรกรองความถี่หยุดแถบสังเคราะห์ขึ้นมาจากสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ที่ต่อชดเชยด้วยสายส่งแบบขึ้นบันไดหนึ่งชุดแบบลัดปลายสายลงกราวด์แสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 วงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อกู่ขนานไมโครสตริปซัดเซดด้วย SiTLs

2. วงจรบรานซ์ไลน์แบบใส่แทรกด้วยวงจรกรองความถี่แบบหยุดแถบ (BSFs)

วงจรบรานซ์ไลน์ที่นำเสนอในบทความนี้แสดงในภาพที่ 3 ประกอบไปด้วยสายส่งที่ดัดแปลงจากสายส่งเชื่อมต่อกู่ขนาน ที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ โมดคู่และโมดคี่ Z_{oe}, Z_{oo} ที่ต่างกัน 2 ชุด มีความยาวทางไฟฟ้า θ_0 เท่ากับ $\pi/4$ ตามลำดับ แต่ละชุดประกอบไปด้วยสายส่งเชื่อมต่อกู่ขนาน 2 ท่อน วางอยู่ในแนวตั้งและแนวนอนที่พอร์ตเชื่อมต่อของสายส่งมีการเชื่อมต่อกู่ขนานขึ้นบันไดลงกราด เพื่อให้มีฟังก์ชันการถ่ายโอนเป็นแบบวงจรกรองความถี่หยุดแถบ และ เนื่องจากวงจรสายส่งแต่ละท่อนมีความยาวทางไฟฟ้าเป็น $\pi/4$ ดังนั้นวงจรสายส่งแต่ละท่อนจึงมีพฤติกรรมเป็นวงจรกรองความถี่หยุดแถบที่ความถี่ $2f_0$ ทั้งนี้เพื่อให้งจรสายส่งแบบบรานซ์ไลน์ที่สังเคราะห์ขึ้น มีสมรรถนะในการกีดความถี่ปลอมเทียมที่เกิดจากองค์ประกอบความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 2 แต่คุณสมบัติด้านอื่นๆ ยังคงรักษาคุณสมบัติของวงจรสายส่งบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมไว้



ภาพที่ 3 วงจรสายส่งบรานซ์ไลน์แบบใส่แทรกวงจรกรองความถี่หยุดแถบที่นำเสนอ

3. การออกแบบสายส่งแบบขั้น

สายส่งแบบขั้นในภาพที่ 4 สร้างจากสายส่งสองท่อนต่ออนุกรมกัน มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเป็น Z_a และ Z_b ตามลำดับ ความยาวเชิงมุมเป็น θ_a และ θ_b พิจารณาสมการอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายส่งท่อน b เมื่อด้านหนึ่ง

เชื่อมต่อกับโหลด $Z_L = Z_0$ และท่อน a ที่ปลายด้านหนึ่งต่อกับโหลดที่ค่าเท่ากับ $Z_L = Z_B$ สมการอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายส่งแบบขึ้นแต่ละท่อนจะหาได้จากสมการ

$$Z_{in}(a) = \frac{Z_a(Z_{in}(b) + jZ_a \tan Q_a)}{Z_a + jZ_{in}(b) \tan Q_a} \tag{1}$$

$$Z_{in}(b) = \frac{Z_b(Z_0 + jZ_b \tan Q_b)}{Z_b + jZ_0 \tan Q_b} \tag{2}$$

ในภาพที่ 5 เป็นการนำสายส่งแบบขึ้นมาหาค่าไดเรกทีวิตีของสายส่งเชื่อมต่อกับขั้วขาน ด้วยการเชื่อมต่อระหว่างพอร์ตเชื่อมต่อลงกราวด์ เพื่อลดขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสัญญาณระหว่างพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 3 หรือ S_{31} เพื่อให้ขนาดของ S_{31} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ความถี่ทำงาน จะต้องนำสายส่งแบบขึ้นที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรทางไฟฟ้า ($Z_0, Z_{0e}, Z_{0o}, \mathcal{E}_{effe}, \mathcal{E}_{effo}$) ที่มีค่าดังสมการที่ (3) มาเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ 2 ของสายส่งเชื่อมต่อกับขั้วขาน

$$Z_A(f_0) = - \frac{j(Z_{0o}^2 Z_{0e} \sin Q_0 - Z_{0e}^2 Z_{0o} \sin Q_e) + 2Z_0 Z_b + Z_0 Z_a}{Z_a + Z_b} \tag{3}$$

$$= Z_{in}(a)$$

และจากค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งแบบขึ้นที่นำมาเชื่อมต่อกับขั้วขานทางไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อกับขั้วขาน จะต้องมีการลดค่าลงจากนั้นหาค่าเมตริกซ์ของสายส่งเชื่อมต่อกับขั้วขานที่เชื่อมต่อกับอนุกรมสายส่งแบบขึ้นที่พอร์ตที่ 2 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$q_s(f_0) = \frac{1}{Q} \cot^{-1} \frac{\mathcal{E}_{effo} \mathcal{E}_{effe} (Z_A(f_0) - Z_0)}{Z_{0o}} \tag{4}$$

แรงดัน กระแส และค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจ่าย 4 พอร์ต ดังสมการที่ (5) ถึง (8)

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + Z_{13}I_3 + Z_{14}I_4 \tag{5}$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + (Z_{22} + Z_s)I_2 + Z_{23}I_3 + Z_{24}I_4 \tag{6}$$

$$V_3 = Z_{31}I_1 + Z_{32}I_2 + Z_{33}I_3 + Z_{34}I_4 \tag{7}$$

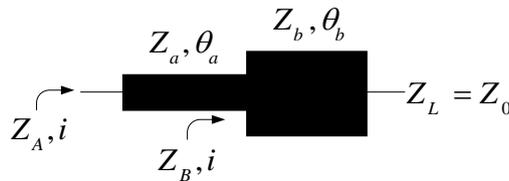
$$V_4 = Z_{41}I_1 + Z_{42}I_2 + Z_{43}I_3 + Z_{44}I_4 \tag{8}$$



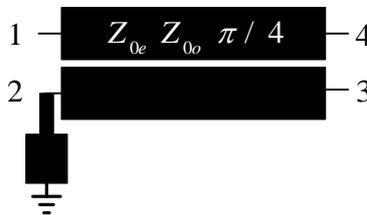
จากเงื่อนไขเริ่มต้น $V_2 = 0$ และ $I_3 = 0$ ทำการแปลงวงจรจ่ายไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อกับจำนวนจาก 4 พอร์ตเป็น 2 พอร์ต จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กระแส และค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจ่าย 2 พอร์ต ดังสมการที่ (9) และ (10)

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{11} + Z_S} & Z_{14} - \frac{Z_{12}Z_{13}}{Z_{11} + Z_S} \\ Z_{14} - \frac{Z_{12}Z_{13}}{Z_{11} + Z_S} & Z_{11} - \frac{Z_{13}^2}{Z_{11} + Z_S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_4 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11T} & Z_{12T} \\ Z_{21T} & Z_{22T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_4 \end{bmatrix} \tag{10}$$



ภาพที่ 4 สายส่งแบบขั้นสองส่วนที่ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของสายส่งเชื่อมต่อกับจำนวน



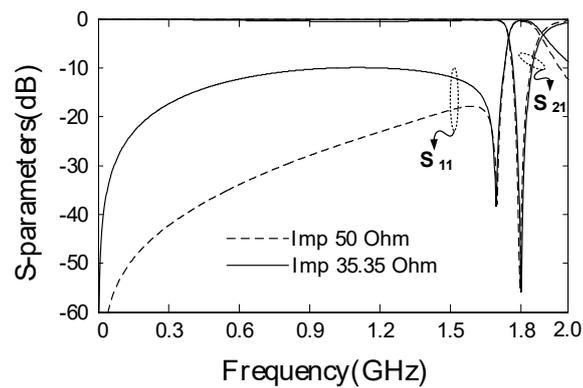
ภาพที่ 5 วงจรรองรับความถี่หยุดแถบที่สังเคราะห์จากสายส่งเชื่อมต่อกับจำนวน

จากสมการอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ในสมการที่ (9) และ (10) สามารถนำไปแทนค่าหาสมการสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับทางด้านอินพุต และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของวงจรจ่ายไฟฟ้าแบบ 2 พอร์ต ได้ดังสมการที่ (11) และ (12) [8]

$$S_{11} = \frac{(Z_{11T} - Z_0) - Z_{12T}^2}{(Z_{11T} + Z_0) - Z_{12T}^2} \tag{11}$$

$$S_{21} = \frac{2Z_0 Z_{12T}}{(Z_{11T} + Z_0) - Z_{12T}^2} \tag{12}$$

จากนั้นนำแนวคิดทางทฤษฎีและสมการต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์วงจรกรองความถี่หยุดแถบจากสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน โดยทำการสังเคราะห์วงจรกรองความถี่หยุดแถบจากสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 50 โอห์ม และ 35.35 โอห์ม สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานทั้ง 2 เส้น จะมีอิมพีแดนซ์โมดคู่และโมดคี่เป็น $Z_{0e1} = 69.37$ โอห์ม $Z_{0o1} = 36.03$ โอห์ม และ $Z_{0e2} = 49.05$ โอห์ม $Z_{0o2} = 25.48$ โอห์ม ตามลำดับ เมื่อนำตัวแปรเหล่านี้ไปคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งแบบขึ้น ที่จะนำมาเชื่อมต่อกับสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน และขนาดของมุมทางไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานที่จะต้องลดลง และมีค่า $Z_{A1}(f_0) = j23.41$ โอห์ม $\theta_{S1}(f_0) = 0.45\pi$ และ $Z_{A2}(f_0) = j16.70$ โอห์ม $\theta_{S2}(f_0) = 0.47\pi$ ตามลำดับ

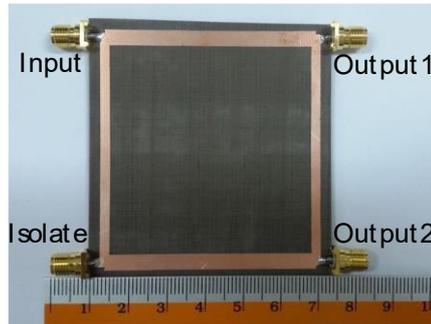


ภาพที่ 6 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรเรโซเนเตอร์แบบหยุดแถบความถี่ที่ความถี่ $2f_0$ ที่นำเสนอ

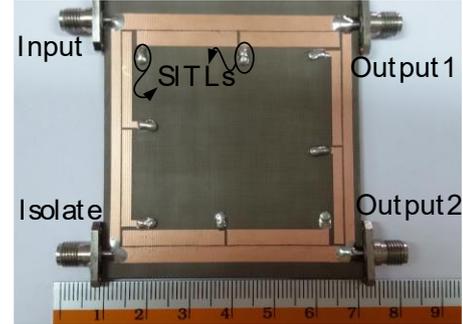
จากการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่หยุดแถบที่สังเคราะห์ขึ้นมา จะได้กราฟผลตอบสนองความถี่และการสูญเสียย้อนกลับทางพอร์ตอินพุต แสดงดังภาพที่ 6 ในการนำไปออกแบบวงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานช์ไลน์ที่มีความถี่ 0.9 กิกะเฮิรตซ์ และต้องการให้มีการลดลงของผลตอบสนองความถี่ที่ความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 2 น้อยกว่า -38 เดซิเบล ดังนั้นในการออกแบบวงจรกรองความถี่หยุดแถบที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน สายส่งดังกล่าวจะต้องมีความยาว $\lambda/8$ ที่ความถี่กลางของวงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานช์ไลน์

ผลการวิจัย

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอ งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างวงจรบรานช์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงสมรรถนะด้วยการใส่แทรกวงจรกรองความถี่หยุดแถบ ที่สังเคราะห์จากสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน ไมโครสตริปมาทำการเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในภาพที่ 7 (ก) และ (ข) บนแผ่นวงจรพิมพ์รุ่น AD260 ของบริษัทอาร์ลอน ซึ่งมีตัวแปรในการออกแบบคือ $\epsilon_r = 2.6, h = 1mm, \tan \delta = 0.0017$ ความถี่ทำงานของวงจรคือ 0.9 กิกะเฮิรตซ์ ในการสังเคราะห์วงจรกรองความถี่หยุดแถบขึ้นมาแทนที่สายส่งแต่ละเส้น ในวงจรบรานช์ไลน์จะใช้สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานที่มีค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อแรงดัน -10 เดซิเบล ทั้งในกลุ่มของสายส่งในแนวตั้งที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 50 โอห์ม และคู่ของสายส่งในแนวนอนที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 35.35 โอห์ม ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์โมดคู่และโมดคี่ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานทั้ง 2 คู่ ที่ต้องใช้ในการออกแบบวงจรจึงมีค่า $Z_{oc} = 69.37$ โอห์ม $Z_{oo} = 36.03$ โอห์มสำหรับคู่ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานในระบบ 50 โอห์ม และ $Z_{oc} = 49.05$ โอห์ม $Z_{oo} = 25.48$ โอห์ม สำหรับคู่ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานในระบบ 35.35 โอห์ม ตามลำดับ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 7 วงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์ (ก) แบบดั้งเดิม (ข) แบบใส่แทรกวงจรรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่ง เชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

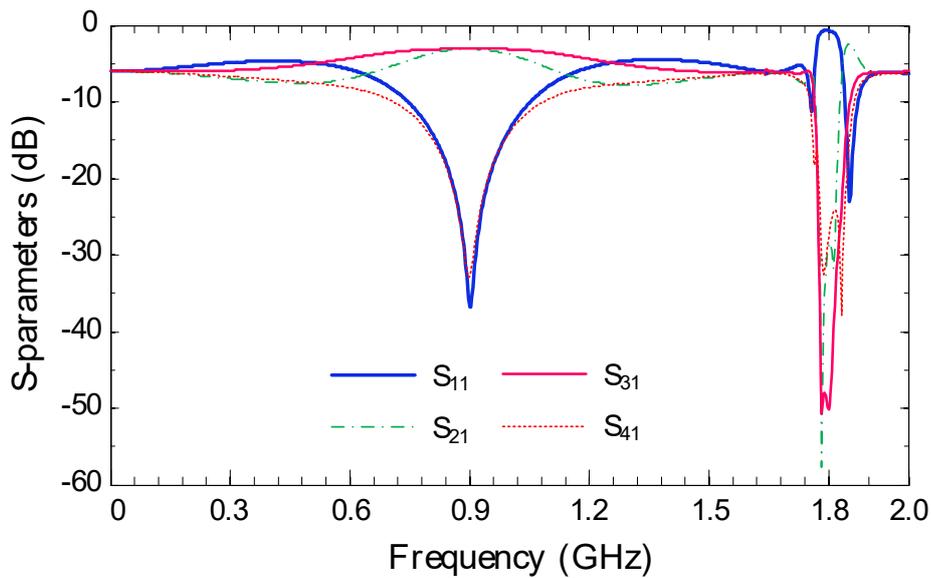
ในส่วนของการออกแบบสายส่งแบบขั้นที่กำหนดให้ $Z_a > Z_b$ จากค่าตัวแปรทางไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน ทั้ง 2 คู่ที่กล่าวถึงไปแล้วนั้น เมื่อนำไปออกแบบ [9] จะได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและความยาวทางไฟฟ้าของแต่ละท่อน ในแต่ละชุดคือ $Z_{a1} = 90$ โอห์ม $Z_{b1} = 75$ โอห์ม และ $\theta_1 = 8$ องศา สำหรับระบบ 50 โอห์ม ส่วนในระบบ 35.35 โอห์ม จะมีค่า $Z_{a2} = 90$ โอห์ม $Z_{b2} = 68$ โอห์ม และ $\theta_2 = 6$ องศา ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแบบดั้งเดิม และแบบที่นำเสนอด้วยโปรแกรม Sonnet™ จะได้ผลการจำลองแสดงในภาพที่ 8 และผลการวัดเปรียบเทียบสมรรถนะแสดงในภาพที่ 9

ตารางที่ 1 ตัวแปรทางไฟฟ้าของวงจรที่ใช้ในการออกแบบ

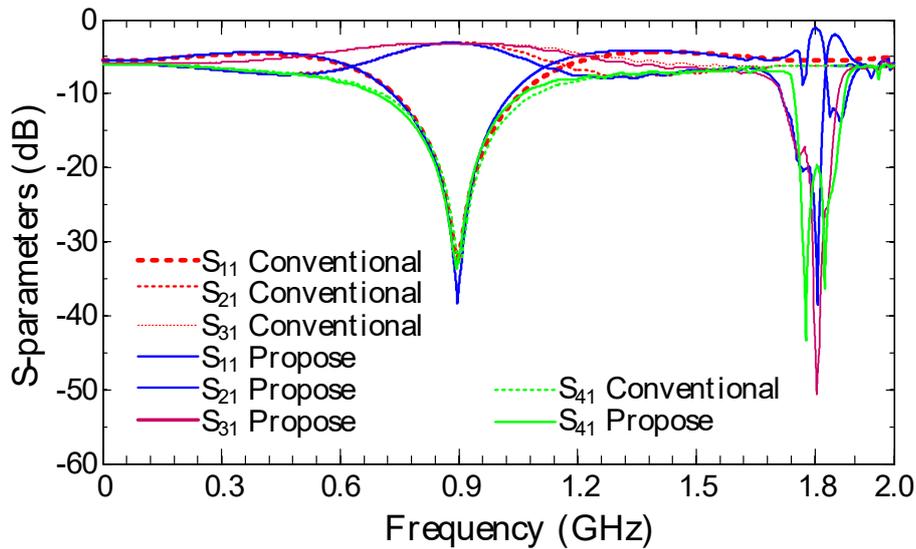
Sections	Z_{oc} (โอห์ม)	Z_{oo} (โอห์ม)	$\theta_s (f_0)$
Coupled line			
50 โอห์ม	69.37	36.03	0.45π
35.35 โอห์ม	49.05	25.48	0.47π
SITLs	Z_a, Z_b (โอห์ม)	θ_a, θ_b	
50 โอห์ม	90, 75	8°	
35.35 โอห์ม	90, 68	6°	

ตารางที่ 2 ผลการวัดตัวแปรของวงจบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบที่นำเสนอ

S-parameters		dB
Conventional	S_{21}, S_{31}	-3.0, -3.26
	S_{11}, S_{41}	-32.39, -32.8
Proposed	S_{21}, S_{31}	-3.12, -3.20
	S_{11}, S_{41}	-38.29, -33.78



ภาพที่ 8 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอ



ภาพที่ 9 ผลการวัดของวงจรแบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอ

จากนั้นนำวงจรแบ่งกำลังงานทั้ง 2 วงจร ไปวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทางไฟฟ้า รุ่น E5711B ยี่ห้อ Keysight โดยทำการปรับเทียบเครื่องมือในช่วงความถี่ 0.1 ถึง 2.0 กิกะเฮิรตซ์ แล้วทำการเก็บข้อมูลผ่านพอร์ต USB จากนั้นทำการประมวลผลและแสดงผลด้วยโปรแกรม Sonnet™ และ Matlab® เมื่อเปรียบเทียบการทำงานของวงจรโบราณซ์ไลน์แบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ พบว่าวงจรแบบดั้งเดิมไม่มีการลดผลตอบสนองความถี่ที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 แต่วงจรที่นำเสนอมีความสามารถในการลดผลตอบสนองปลอมที่ความถี่ $2f_0$ ในส่วนของค่า S_{21} , S_{31} น้อยกว่า -38.4 และ -50.5 เดซิเบล การที่ขนาดของ $S_{31} < S_{21}$ เพราะสัญญาณที่ผ่านไปยังพอร์ต 3 ไหลผ่านวงจรกรองความถี่หยุดแถบ 4 วงจร ในขณะที่สัญญาณที่ไหลไปยังพอร์ต 2 มีการไหลผ่านวงจรกรองความถี่หยุดแถบเพียงแค่ 2 วงจร โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} , S_{31} บริเวณความถี่ทำงานมีค่าใกล้เคียงกัน รวมไปถึงค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ของพอร์ตอินพุตและอัตราการแยกโคด S_{41}



ตารางที่ 3 ตัวแปรทางกายภาพของวงจรที่ใช้ในการออกแบบ

Sections	w, s, l (มิลลิเมตร)	$\theta_s(f_0)$
#CPL 50 โอห์ม	2.23, 0.17, 29.21	0.45 π
#CPL 35.35 โอห์ม	3.59, 0.07, 28.88	0.47 π
SITLs	w_a, l_a (มิลลิเมตร)	w_b, l_b (มิลลิเมตร)
50 โอห์ม	0.9, 3.92	1.6, 3.86
35.35 โอห์ม	0.92, 5.2	1.35, 5.17

ผลการวัดค่าตัวพารามิเตอร์แบบเอส (S_{xx}) ของวงจรแบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอ แสดงในตารางที่ 2 ส่วนขนาดพื้นที่ของวงจรแบบดั้งเดิมมีขนาด $65.1 \times 64.8 \text{ mm}^2$ และวงจรแบบนำเสนอมีขนาดเท่ากับ $63.5 \times 61.3 \text{ mm}^2$ ซึ่งมีขนาดลดลงราว 8 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าตัวแปรทางกายภาพค่าต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างวงจรแสดงในตารางที่ 3

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

สายส่งเชื่อมต่อกันที่ขดเคี้ยวการเชื่อมต่อสายส่งแบบขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มสมรรถนะของวงจรบนชิปไลน์ได้ด้วยการสังเคราะห์ให้เป็นวงจรข่ายไฟฟ้าแบบ 2 พอร์ต ที่มีพฤติกรรมเป็นวงจรกรองความถี่หยุดแถบ เมื่อนำไปแทนที่สายส่งแบบธรรมดา เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการลดผลตอบสนองความถี่ปลอมที่ความถี่สองเท่าของความถี่ทำงานและสามารถลดขนาดพื้นที่ของวงจรได้ การพิสูจน์สมรรถนะของวงจรและเทคนิคที่นำเสนอที่ความถี่ทำงาน 0.9 กิกะเฮิรตซ์ พบว่าวงจรบนชิปไลน์ที่นำเสนอสามารถลดผลตอบสนองปลอมที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ได้น้อยกว่า -38.40 เดซิเบล และค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่า -38.29 เดซิเบล ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

1. Pozar DM. Microwave engineering. 2nd ed. Edition-John Wiley; 1998.
2. Wang J, Wang B-Z, Guo Y-X, Ong L, Xiao S. A compact slow-wave microstrip branch-line coupler with high performance. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2007; 17(7): 501-503.
3. Mondal P, Chakrabarty A. Design of miniaturised branch-line and rat-race hybrid couplers with harmonics suppression. IET microwaves, antennas & propagation. 2009; 3(1): 109-116.
4. Tsai K-Y, Yang H-S, Chen J-H, Chen Y-JE. A miniaturized 3 dB branch-line hybrid coupler with harmonics suppression. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2011; 21(10): 537-539.
5. Kim J, Yook JG. A Miniaturized 3 dB 90 hybrid coupler using coupled-line section with spurious rejection. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2014; 24(11): 766-768.
6. Kumar KVP, Karthikeyan S. Miniaturised quadrature hybrid coupler using modified t-shaped transmission line for wide-range harmonic suppression. IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2016; 10(14): 1522-1527.
7. Zong B, Wang G, Zhang C, Wang Y. Miniaturised branch-line coupler with ultra-wide high suppression stopband. Electronics Letters. 2014; 50(19): 1365-1367.
8. Zhu L, Sun S, Li R. Microwave bandpass filters for wideband communications. John Wiley & Sons; 2011.
9. Kumpang S, Phromloungsri R, Chongcheawchamnan M, Krairiksh M, Robertson D. Design and application of microstrip parallelcoupled lines employing step-impedance transmission-line compensation. IET microwaves, antennas & propagation. 2009; 3(3): 410-415.