

การศึกษาคุณสมบัติของวงจรวงแคบในท่อนำคลื่นด้วยวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์

The Study of Characteristics of the Waveguide Iris by using Printed Circuit Board

พินิจ เนื่องภิรมย์^{1*} กิจจา ไชยทนต์¹ นัฐพงษ์ สิทธิกัน² ธนวัฒน์ ปันห่าง² และสมศักดิ์ อรรถทิมากุล³

¹ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

² สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

³ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Pinit Nuangpirom^{1*} Kitchar Chaitanu¹ Nuttapong Sidtigon², Thanawat Panhang² and Somsak Akatimagool³

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

² Department of Technical Education and Technology, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

³ Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

* ผู้รับผิดชอบบทความ: elecnpnt@mutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-8955-52266

Received: 18 May 2020, Revised: 28 May 2020, Accepted: 31 May 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรวงแคบในท่อนำคลื่นที่มีโครงสร้างตามมาตรฐาน WR340 (86mm x 43mm x 182mm) ที่มีการป้อนสัญญาณในท่อนำคลื่นด้วยสายอากาศแบบโมโนโพลที่เชื่อมต่อสัญญาณด้วยหัวต่อแบบ SMA วงจรวงแคบที่นำเสนอออกแบบบนวัสดุประเภทแผ่นวงจรพิมพ์ ชนิด FR4 ที่มีค่า ϵ_r เท่ากับ 4.4 ผลการวิจัยพบว่า 1) กรณีวงจรวงแคบตัวเหนี่ยวนำที่สร้างด้วยวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์ ให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ในลักษณะของวงจรวงความถี่สูงผ่าน ที่ความถี่ตัดเท่ากับ 2.44 GHz ที่ขนาด d/a เท่ากับ 0.67 2) กรณีวงจรวงแคบตัวเก็บประจุ ที่มีขนาด d/b เท่ากับ 0.075 พบว่าให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ในลักษณะของวงจรวงความถี่ต่ำผ่าน ที่ความถี่ตัด 2.30 GHz และ 3) กรณีวงจรวงแคบตัวเหนี่ยวนำขนานตัวเก็บประจุ พบว่าให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ในลักษณะวงจรวงความถี่แถบผ่านในช่วงความถี่ 2.26 GHz ถึง 2.50 GHz ที่ขนาด d/a เท่ากับ 0.72 และ d/b เท่ากับ 0.11 โดยภาพรวมพบว่าผลการทำงานของวงจรถูกนำเสนอเป็นไปตามหลักการทางทฤษฎีและสอดคล้องกันกับที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลอง

คำสำคัญ วงจรวงแคบ ท่อนำคลื่น แผ่นวงจรพิมพ์

Abstract

In this paper, the Iris circuit in the rectangular waveguide is designed and implemented. The dimension of rectangular waveguide is designed at WR340 standard (86mm x 43mm x 182mm). The signal in waveguide is fed by monopole antenna that connect to SMA (Subminiature version A) connector. The Iris circuits are designed on print circuit board, FR4 substrate with $\epsilon_r = 4.4$. The results of the research showed that 1) the inductive Iris circuit acts as a high pass filter with 2.44 GHz of cutoff frequency at $d/a = 0.67$, 2) the capacitive Iris circuit acts as a low pass filter with 2.30 GHz of cutoff frequency at $d/b = 0.075$ and 3) the parallel of the inductive iris circuit and the capacitive iris circuit act as a band pass filter, supporting responses in range of 2.26-2.50 GHz of

operating frequency. The results are consistent with the theoretical methods as well as commercial simulation program.

Keywords: Iris circuits, Waveguide, Printed Circuit Board

1. บทนำ

ท่อนำคลื่นเป็นสายส่งชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญในระบบสื่อสาร โดยเฉพาะการสื่อสารที่มีการส่งสัญญาณกำลังสูง มีต้องการการสูญเสียเล็กน้อย อย่างเช่นระบบสื่อสารดาวเทียมที่มีการรับ-ส่งสัญญาณจากสถานีส่งบนพื้นโลก ไปยังดาวเทียมที่มีการโคจร อยู่ในวงโคจรค้างฟ้า [1] การประยุกต์ใช้งานท่อนำคลื่นนอกเหนือจากการใช้งานในลักษณะของสายส่งสัญญาณ ยังสามารถพัฒนาในรูปแบบของวงจรรายอากาศ [2] ที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในลักษณะของทิศทางและประยุกต์ใช้ในรูปแบบของวงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3]-[5].

วงจรรองความถี่ คือวงจรมีให้สัญญาณในช่วงที่ต้องการผ่านไปได้ แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรรองความถี่สูงผ่าน วงจรรองความถี่แถบผ่าน และวงจรรองความถี่แถบหยุด [6] การออกแบบและสร้างวงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่น มีการพัฒนาไปอย่างหลากหลาย เช่นการออกแบบวงจรรองความถี่ที่ใช้ทฤษฎีการประมาณค่า แล้วนำมาที่ได้ไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลอง และสร้างเป็นของจริงเพื่อทดสอบต่อไป [7] กระบวนการพัฒนางวงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่น มีขั้นตอนการสร้างที่ต้องอาศัยความแม่นยำ และต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาสูง เช่น การตัดและสร้างลวดลายบนแท่งอลูมิเนียมด้วยเทคโนโลยีของเลเซอร์ จึงส่งผลให้เกิดกระบวนการที่มีขั้นตอนซับซ้อน และต้นทุนที่สูงต่อการออกแบบและการพัฒนาเป็นชิ้นงาน

ดังนั้นในบทความวิจัยนี้ จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้วัสดุประเภทแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีราคาถูก และสามารถสร้างวงจรรองความถี่ได้ง่ายด้วยวิธีการที่หลากหลาย สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่น และเพิ่มเป็นทางเลือกสำหรับประยุกต์ใช้กับวงจรไมโครเวฟอื่นๆได้อย่างหลากหลาย

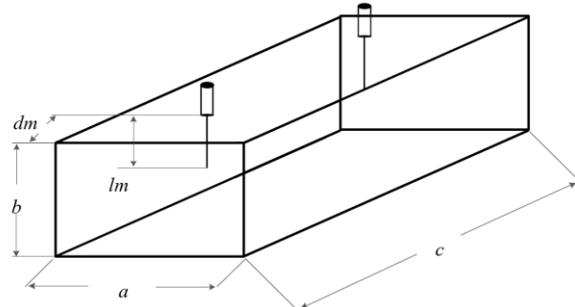
2. การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยสำหรับการศึกษาวัดคุณสมบัติแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีผลต่อการทำงานในท่อนำคลื่น ในรูปแบบของวงจรรวมในตัวเหนียว และตัวเก็บประจุ เพื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรรองความถี่ได้ มีการดำเนินการดังนี้

2.1 โครงสร้างท่อนำคลื่น

การออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นสำหรับประยุกต์ใช้เป็นสายส่งสัญญาณและรับการป้อนพลังงานจากแหล่งจ่ายเพื่อให้คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางกระทบกับ

วงจรรองความถี่ที่นำเสนอด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ในงานวิจัยนี้ กำหนดช่วงความถี่ตามมาตรฐานท่อนำคลื่น WR340 ย่านความถี่ 1.736 GHz ถึง 3.417 GHz ซึ่งกำหนดขนาดความกว้าง (a) เท่ากับ 86 mm ความสูง (b) เท่ากับ 43 mm แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างท่อนำคลื่น

การออกแบบเพื่อหาความยาวของท่อนำคลื่นใช้วิธีการคำนวณตามค่าความยาวคลื่นของท่อนำคลื่น (λ_g) ที่กำหนดความถี่ทดสอบ $f_0 = 2.4GHz$ มีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

$$\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_c)^2} \tag{1}$$

$$\text{เมื่อ } \lambda_0 = c / f_0 = 125\text{mm} \tag{2}$$

$$\text{และ } \lambda_c = 2 / \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2} = 172 \text{ mm} \tag{3}$$

แทนค่าตัวแปร λ_0 และ λ_c ลงในสมการที่ (1) จะได้

$$\lambda_g = 0.125 / \sqrt{1 - (0.125 / 0.172)^2} = 182\text{mm} \tag{4}$$

เมื่อ λ_0 คือ ความยาวคลื่นที่ความถี่หลัก

λ_c คือ ความยาวคลื่นในโหมด TE₁₀

f_0 คือ ความถี่ตัดในโหมดพื้นฐาน กำหนดที่ 2.4GHz

m, n คือ ตัวเลขแสดงค่าของโหมด TE₁₀ กำหนด $m = 1$

และ $n = 0$

c คือค่าความเร็วของแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

a คือ ความกว้างของท่อนำคลื่น

b คือ ความสูงของท่อนำคลื่น

ดังนั้น ค่าความยาวของท่อนำคลื่น

$$c = \lambda_g = 182\text{mm} \tag{5}$$

2.2 สายอากาศโมโนโพล

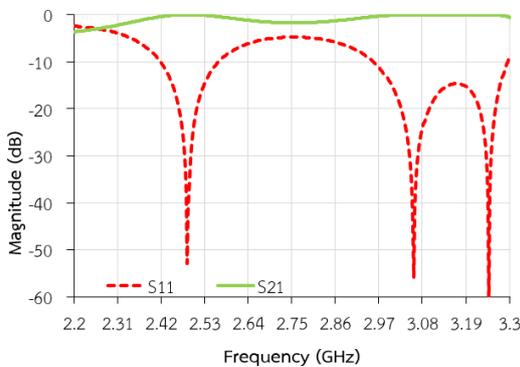
สายอากาศโมโนโพลออกแบบให้เชื่อมต่อกับหัวต่อแบบ SMA เพื่อรับพลังงานจากจุดป้อนสัญญาณ เกิดการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศภายในสายส่งสัญญาณที่เป็นท่อนำคลื่น เพื่อให้เกิดการเดินทางของคลื่นไปกระทบตัวกลางที่เป็นวงจรร่องแคบสำหรับวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรร่องแคบ การคำนวณหาความยาวของสายอากาศโมโนโพล (l_m) ดังสมการที่ (6)

$$l_m = \frac{\lambda_0}{4} = \frac{125}{4} = 31.25 \text{ mm} \quad (6)$$

ตำแหน่งการวางสายอากาศในท่อนำคลื่น (d_m) คำนวณได้ดังนี้

$$d_m = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{182 \text{ mm}}{4} = 45.5 \text{ mm} \quad (7)$$

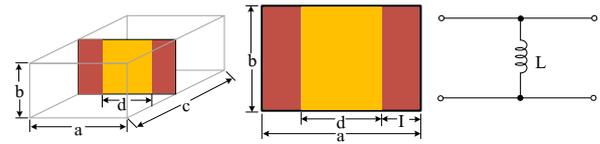
นำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ออกแบบได้ ไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ที่ช่วงความถี่ 2.2 GHz ถึง 3.3 GHz เพื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความถี่ ผลที่ได้พบว่าท่อนำคลื่นมีความถี่ตัดในการทำงานที่ ความถี่ 2.28 GHz ถึง แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของท่อนำคลื่น

2.3 วงจรร่องแคบ

วงจรร่องแคบหรือไอริส (Iris) มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะบาง ๆ ขนาดความหนาน้อยกว่าค่าความยาวคลื่นที่ใช้งานมาก ๆ วางขวางที่ผนังด้านในของท่อนำคลื่น การวางตัวของไอริสมีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน และรูปแบบการวาง แต่ที่นิยมในปัจจุบันมากที่สุดได้แก่ การวางแผ่นโลหะติดที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่น ในลักษณะขนานกับสนามไฟฟ้า (E) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านและเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยวงจรร่องแคบทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเป็นวงจรร่องแคบตัวเหนี่ยวนำต่อแบบขนานนั่นเอง แสดงดังรูปที่ 3 [6]

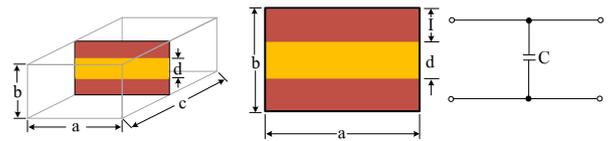


ก) มุมมองโดยรวม ข) ภาคตัดขวาง ค) วงจรรวม
รูปที่ 3 วงจรร่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

สมการสำหรับหาค่า Inductive Reactance [6] ที่อาศัยความสัมพันธ์ของความกว้างไดอิเล็กทริก (d) ต่อค่าความกว้างของท่อนำคลื่น (a) จากรูปที่ 3 ข) เขียนได้ดังนี้

$$X_L = Z_0 \frac{2a}{\lambda_g} \left(\frac{\pi d}{2a} \right)^4 \left[1 + 12 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{\pi d}{2a} \right)^4 \right] \quad (8)$$

รูปที่ 4 แสดงวงจรร่องแคบ ที่มีลักษณะการวางตัวในแนวขนานกับความกว้าง (a) ส่งผลให้เกิดวงจรร่องแคบทางไฟฟ้าในลักษณะของตัวเก็บประจุ



ก) มุมมองโดยรวม ข) ภาคตัดขวาง ค) วงจรรวม
รูปที่ 4 วงจรร่องแคบตัวเก็บประจุ

สมการสำหรับหาค่า Capacitive Susceptance เขียนได้ดังนี้

$$B_C = Y_0 \frac{4b}{\lambda_g} \left\{ \ln \left(\csc \frac{\pi d}{2b} \right) + \frac{Q_2 \cos^4 \frac{\pi d}{2b}}{1 + Q_2 \sin^4 \frac{\pi d}{2b}} + \frac{1}{16} \left(\frac{b}{\lambda_g} \right)^2 \left(1 - 3 \sin^2 \frac{\pi d}{2b} \right)^2 \cos^4 \frac{\pi d}{2b} \right\} \quad (9)$$

เมื่อ $Q_n = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{2b}{n\lambda_g} \right)^2}} - 1$

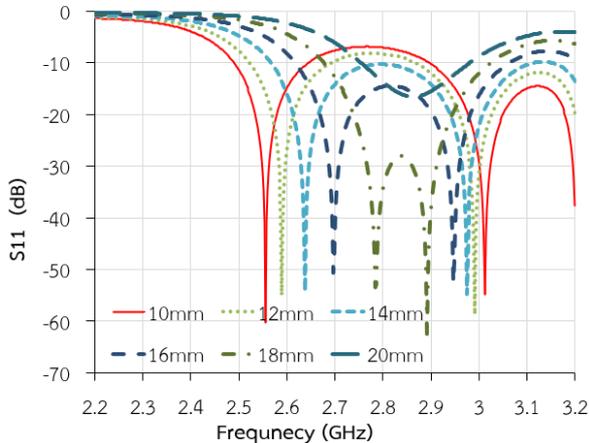
$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}}$$

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

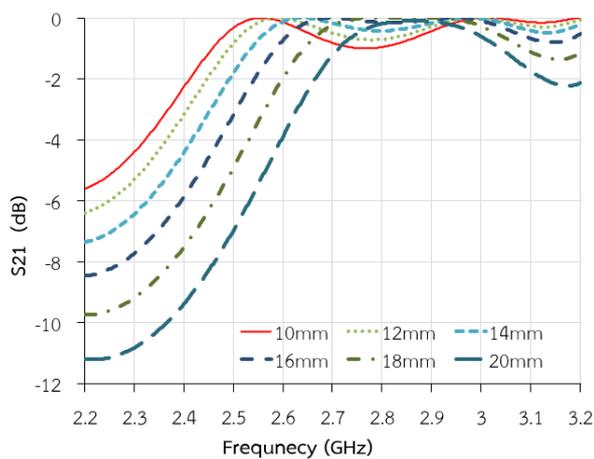
2.4 วงจรร่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

การศึกษาคุณสมบัติวงจรร่องแคบตัวเหนี่ยวนำบนวัสดุประเภทแผ่นวงจรรวมพีซีชนิด FR4 ที่มีความหนาเท่ากับ

1.6mm มีโครงสร้างดังรูปที่ 3 โดยกำหนดขนาดกว้างตัวนำ (a) เท่ากับ 86 mm ความสูงของตัวนำ (b) เท่ากับ 43 mm



รูปที่ 5 ค่า S11 ของวงจรถ่วงแคบตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 6 ค่า S21 ของวงจรถ่วงแคบตัวเหนี่ยวนำ

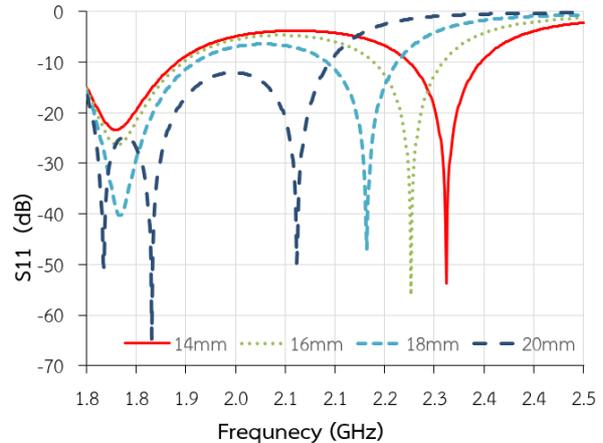
และค่าความกว้างของวัสดุชั้นเสตรท (d) ใช้การปรับเปลี่ยนค่าตั้งแต่ 10 mm ถึง 20 mm ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6

รูปที่ 5 แสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S11) ของวงจรถ่วงแคบตัวเหนี่ยวนำ ที่มีการกำหนดค่าความกว้างของพื้นที่ที่ตัวนำต่อข้าง (l) ตั้งแต่ 10 mm ถึง 20 mm โดยเพิ่มขนาดครึ่งละ 2 mm ผลการจำลองพบว่าค่าความถี่ตัดของวงจรถ่วงแคบตัวเหนี่ยวนำมีการแปรผันตรงกับค่าความกว้างของแถบตัวนำ (l) ที่มีการเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) ดังแสดงในรูปที่ 6 ที่ค่าความถี่ตัดมีการเพิ่มขึ้นตามค่าของความกว้างแถบตัวนำ (l)

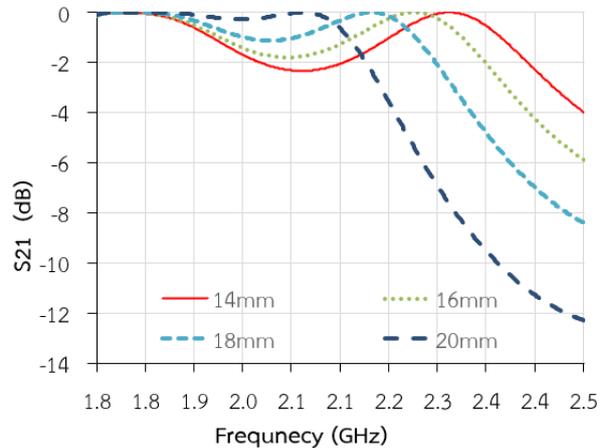
2.5 วงจรถ่วงแคบตัวเก็บประจุ

วงจรถ่วงแคบตัวเก็บประจุ แสดงดังรูปที่ 4 ที่มีการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมเชิงพาณิชย์ ที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.75 GHz ถึง 2.5 GHz กำหนดขนาดความกว้างของแถบตัวนำ (l) ตั้งแต่ 14 mm ถึง 20 mm โดยเพิ่มค่าขึ้นครึ่งละ 2 mm ผลการจำลองพบว่าขนาดความกว้างของแถบ

ตัวนำ (l) ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความถี่ตัดของลดลงในลักษณะของการแปรผกผัน แสดงผลดังรูปที่ 7 และ 8



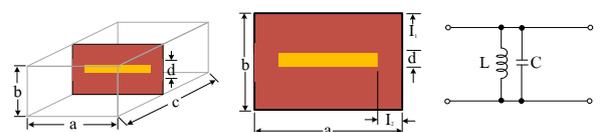
รูปที่ 7 ค่า S11 ของวงจรถ่วงแคบตัวเก็บประจุ



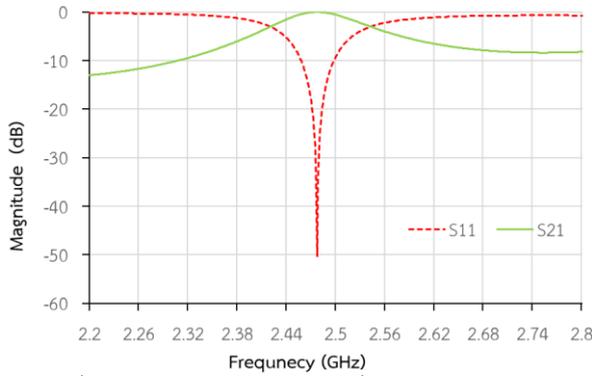
รูปที่ 8 ค่า S21 ของวงจรถ่วงแคบตัวเก็บประจุ

2.6 วงจรถ่วงแคบตัวเก็บประจุขนาดตัวเหนี่ยวนำ

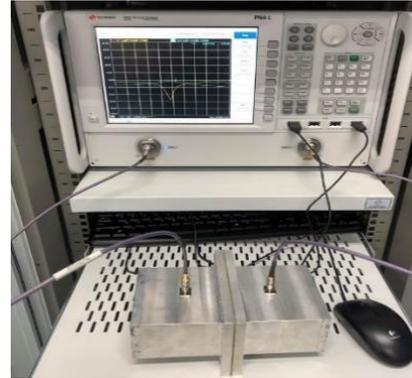
วงจรถ่วงแคบตัวเก็บประจุขนาดตัวเหนี่ยวนำมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 9 เป็นการประยุกต์ใช้หลักการของวงจรถ่วงแคบตัวเหนี่ยวนำและวงจรถ่วงแคบตัวเก็บประจุวางในลักษณะของการขนานกัน โดยกำหนดขนาดความกว้างของตัวนำ l_1 เท่ากับ 12mm และความกว้างของตัวนำ l_2 เท่ากับ 20 mm ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์พบว่าวงจรถ่วงแคบตัวเก็บประจุให้ผลการตอบสนองในลักษณะของวงจรถ่วงแคบความถี่ผ่าน ในช่วงความถี่ 2.42 GHz ถึง 2.55 GHz ซึ่งเป็นไปตามหลักการทางทฤษฎีของรูปแบบการวางวงจรถ่วงแคบดังกล่าว [6] แสดงดังรูปที่ 10



(ก) มุมมองโดยรวม (ข) ภาควัดตัดขวาง (ค) วงจรสมมูลรูปที่ 9 วงจรถ่วงแคบตัวเหนี่ยวนำขนาดตัวเก็บประจุ



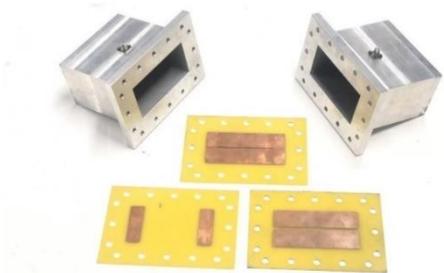
รูปที่ 10 การตอบสนองต่อความถี่ของวงจร LC ขนาน



รูปที่ 12 วงจรช่องแคบที่ทดสอบในท่อนำคลื่น

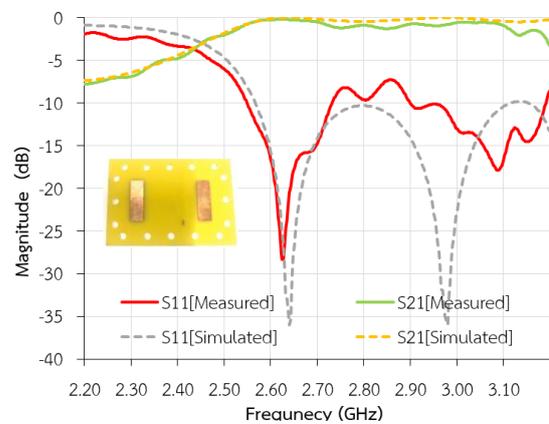
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

การศึกษาคุณสมบัติของวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่นด้วยการประยุกต์ใช้วัสดุแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) เพื่อเพิ่มทางเลือกในการพัฒนางจรไมโครเวฟในท่อนำคลื่น ให้มีวิธีการที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น และสะดวกต่อการออกแบบ ใช้ต้นทุนต่ำและง่ายต่อการผลิต ผลการดำเนิน ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างท่อนำคลื่น ตามมาตรฐาน WR340 ที่มีขนาดความกว้าง (a) เท่ากับ 86 mm ความสูง (b) เท่ากับ 43 mm และความยาว (c) เท่ากับ 182 mm (พิจารณารูปที่ 1) โดยใช้วัสดุแบบดั้งเดิม (อลูมิเนียม) เพื่อใช้เป็นท่อนำคลื่นสำหรับทดสอบวงจรช่องแคบ (Iris) ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ (แสดงดังรูปที่ 11) การบ่อนสัญญาณทดสอบด้วยสายอากาศโมนิโพล ที่ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.4GHz มีขนาดความยาวของสายอากาศเท่ากับ 31.25 mm เชื่อมต่อสัญญาณด้วยขั้วต่อแบบ SMA วงจรช่องแคบที่นำเสนอมีทั้งหมด 3 วงจร ได้แก่ วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ และวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุนานตัวเหนี่ยวนำ ออกแบบและหาค่าที่ดีที่สุดด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ สร้างบนวัสดุประเภทแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ที่มีค่าความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 1.6 mm และมีค่า ϵ_r เท่ากับ 4.4 จากนั้นทำการวัดและวิเคราะห์สัญญาณด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ดังแสดงในรูปที่12 เปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ ผลการดำเนินการที่ได้ มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 11 วงจรช่องแคบที่ทดสอบในท่อนำคลื่น

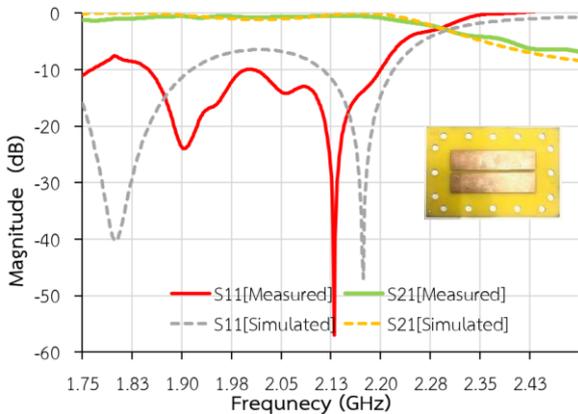
ผลการวิเคราะห์วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำที่นำเสนอที่มีค่าขนาดความกว้างของแถบตัวนำ $l = 14$ mm โดยพิจารณารูปที่ 3 ประกอบ หรือคิดเป็นอัตราส่วนของไดอิเล็กตริกต่อขนาดความกว้าง $d/a = 0.67$ ผลการวัดทดสอบวงจรด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ พบว่าวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำที่นำเสนอให้ผลการตอบสนองในลักษณะของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ที่ความถี่ตัดเท่ากับ 2.44 GHz สอดคล้องกันกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองที่มีความถี่ตัดเท่ากับ 2.46 GHz ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 การตอบสนองต่อความถี่วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

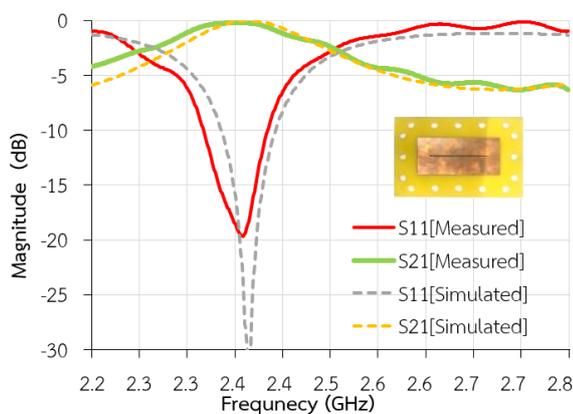
รูปที่ 14 แสดงผลการวิเคราะห์วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ ที่มีค่าขนาดความกว้างของแถบตัวนำ (l) เท่ากับ 20 mm (พิจารณารูปที่ 4 ประกอบ) หรือคิดเป็นอัตราส่วนของไดอิเล็กตริกต่อขนาดความสูง $d/b = 0.075$ ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ที่กำหนดความถี่ทดสอบในช่วง 1.75 GHz ถึง 2.45 GHz ผลการทดสอบพบว่าวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุที่นำเสนอให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ในลักษณะของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ที่ความถี่ตัดเท่ากับ 2.30 GHz ในขณะที่ค่าที่วิเคราะห์ได้ด้วยโปรแกรมจำลอง มีความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 2.31 GHz ถือว่ามีความสอดคล้องกันกับผลที่วัดได้ และให้การตอบสนอง

ต่อความถี่เป็นไปตามหลักการทางทฤษฎี ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเล็กน้อยเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการผลิตที่มีขนาดของช่องว่างเล็กกว่าที่ออกแบบ



รูปที่ 14 การตอบสนองต่อความถี่ของวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ

การวิเคราะห์และทดสอบวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำขนานตัวเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 15 ใช้คุณสมบัติของวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุและวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำในลักษณะของการวางแบบขนาน มีค่าขนานความกว้างของแถบตัวนำ $l_1 = 12$ mm และ $l_2 = 19$ mm คิดเป็นค่า $d/a = 0.72$ และค่า $d/b = 0.11$ โดยพิจารณาจากรูปที่ 9 ประกอบ ผลการวิเคราะห์ห้วงจรที่นำเสนอด้วยเครื่องวิเคราะห์โคร่งข่ายพบว่า วงจรให้ผลการตอบสนองในลักษณะของวงจรกรองความถี่แถบผ่าน มีการทำงานที่ระดับ -3 เดซิเบล ในช่วงความถี่ 2.26GHz ถึง 2.50GHz ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองมีช่วงการตอบสนองความถี่ตั้งแต่ 2.30 GHz ถึง 2.51 GHz อย่างไรก็ตามผลการเปรียบด้วยวิธีการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีถือว่ามีความสอดคล้องกัน



รูปที่ 15 การตอบสนองต่อความถี่วงจร LC ขนาน

4. บทสรุป

บทความวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีราคาถูกและง่ายต่อการสร้างมาใช้เป็นวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่น เพื่อศึกษาผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรที่ได้ออกแบบตามหลักการทางทฤษฎี ที่แบ่งออกเป็นวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ และวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุขนานตัวเหนี่ยวนำ ผลการวิจัยพบว่า วัสดุประเภทแผ่นวงจรพิมพ์สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับพัฒนาวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่นได้ เป็นไปตามหลักการทางทฤษฎี [6] และสอดคล้องกันกับผลที่วิเคราะห์ได้ด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรไมโครเวฟอื่น ๆ ในท่อนำคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Shengxian Li, Junmei Fu and Xuda Wu, Analysis of High-Power Rectangular Waveguide Filter with Capacitive Coupling Iris for Satellite, in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2009, pp.1-4.
- [2] Chieh, J.-C.S., et al, Tapered Slot Waveguide Antenna for Ku-Band Phased Array Applications, International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, July 2015.
- [3] S.Soo Park, et al., "Design of 40 GHz-band Iris-Type Waveguide Bandpass Filter," International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol.24, pp 941-951. June 2003.
- [4] Y. Zhai, et al. "The Design of an Iris Waveguide Filter at 35.75 GHz," in Millimeter Waves Global Symposium on, 2008, pp.348-350.
- [5] G. Prigent, et al. "Design of Waveguide Bandpass Filter in The X-Frequency Band," International Journal of Microwave Journal, Vol.7, No.1 pp.1-16, Jan.2008.
- [6] N.Marcuvitz, "Waveguide Handbook," Short Run Press Ltd., London, UK, 1986.
- [7] Shengxian Li, Junmei Fu and Xuda Wu, "Analysis of High-Power Rectangular Waveguide Filter with Capacitive Coupling Iris for Satellite," in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2009, pp.1-4.