โปรแกรมจำลองวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นสำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรม
Simulation Program of Waveguide Bandpass Filter for Engineering Education

ศรัณย์ ณรงค์กูล[1], ณัฐพงษ์ อินทรวิเศษ[2], สมศักดิ์ อรรคทิมากูล[2]

[1]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

[2]คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

sarunskru@gmail.com nattakwan@gmail.com ssa@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอโปรแกรมจำลองวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นสำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรม โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นทำงานภายใต้ฟังก์ชัน GUI ของโปรแกรม MATLAB® การออกแบบวงจรกรองความถี่อาศัยทฤษฎีการประมาณค่าแบบ Chebyshev และใช้เทคนิควิธีการแปลงค่าแบบ k-inverter เพื่อหาขนาดความกว้างของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำที่ผู้ใช้งานสามารถกำหนดขนาดของท่อนำคลื่น แถบความถี่ จำนวนอันดับ และค่า Ripple ได้ตามความต้องการ จากนั้นทดสอบการทำงานในช่วงความถี่ 9.6 – 9.9 GHz โดยใช้โปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ ผลการวิจัยพบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นให้ผลที่สอดคล้องกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ ที่สามารถนำไปสร้างชิ้นงานจริงและใช้เป็นวงจรต้นแบบเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ท่อนำคลื่น วงจรกรองผ่านแถบความถี่ วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

Abstract

This research presents a simulation program of waveguide bandpass filter for engineering education. The simulator was developed using the GUI function of MATLAB®, the band pass filter based was designed using the Chebychev approximation theory and the k-inverter technique to calculate the width of inductive iris that the users can determine the waveguide dimension, frequency bandwidth, number of order and ripple. Then, the simulation program was evaluated in frequency range response at 9.6-9.9 GHz by commercial electromagnetic simulator. The research results shown that the frequency response of waveguide BPF are consistent to commercial simulator that can implement to be used effectively as a prototype circuit in research and engineering education.

Keyword: Waveguide, Band Pass Filter, Inductive Iris

1. บทนำ

ท่อนำคลื่นมีบทบาทสำคัญในการประยุกต์ใช้งานด้านระบบสื่อสารทางด้านไมโครเวฟ การเชื่อมต่อของท่อนำคลื่นและระบบไมโครเวฟจะต้องส่งผ่านพลังงานโดยอาศัยโครงสร้างการคับปลิ้งของวงจรช่องแคบ การเชื่อมต่อทางด้านขาเข้าและขาออก การลดค่าการสูญเสียการส่งผ่านพลังงานระหว่างท่อนำคลื่นและระบบไมโครเวฟให้มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบวงจรช่องแคบ [1] ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่เป็นส่วนสำคัญที่ถูกใช้งานในระบบของการสื่อสารผ่านดาวเทียม ระบบเรดาร์ ระบบเครื่องส่งและเครื่องรับ โดยผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่นี้จะยอมให้ช่วงความถี่ที่กำหนดสามารถผ่านไปได้ ซึ่งในระยะเวลามากกว่า 10 ปีที่ผ่านมามีนักวิจัยจำนวนมากได้พัฒนาวงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้วงจรช่องแคบมาอย่างต่อเนื่องจนถึงทุกวันนี้

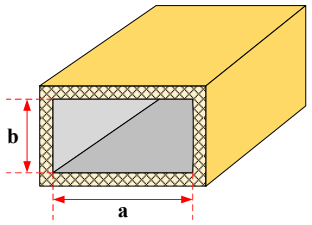
สำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรมไมโครเวฟได้ให้ความสำคัญในเรื่องการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ทั้งในวงจรไมโครสตริปและในท่อนำคลื่น สำหรับในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการใช้วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำในท่อนำคลื่นเท่านั้น ซึ่งนักวิจัยส่วนใหญ่จะรออกแบบโดยใช้โปรแกรมจำลองเชิงพานิชย์เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้งาน ซึ่งการคำนวณหาขนาดโครงสร้างและระยะห่างของวงจรช่องแคบจำเป็นต้องใช้ความรู้และความเข้าใจในทฤษฎีพื้นฐานของท่อนำคลื่นซึ่งพบว่ามีขั้นตอนที่ค่อนยากยุ่งยากและมีความซับซ้อน นอกจากนี้การออกแบบวงจรโดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Try and Error) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้แต่ใช้เวลาค่อนข้างมากในการออกแบบเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองทางความถี่ที่ดีที่สุด และต้องใช้ประสบการณ์และความถนัดของนักวิจัยจึงจะสามารถสร้างวงจรจริงที่มีประสิทธิภาพได้

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาโปรแกรมออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นโดยใช้ช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ฟังก์ชัน GUI ของ MATLAB® ซึ่งโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการลดขั้นตอนความยุ่งยากของการคำนวณ โดยกำหนดขนาดและโครงสร้างของวงจรช่องแคบและท่อนำคลื่นได้ตามความต้องการและสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ท่อนำคลื่น

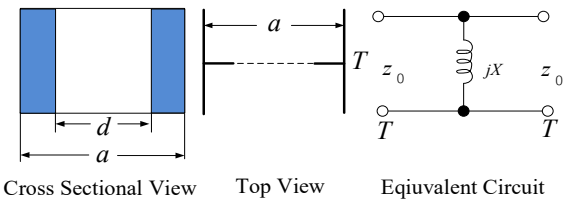
ท่อนำคลื่นเป็นสายส่งสัญญาณชนิดหนึ่งที่ใช้ในการส่งคลื่นไมโครเวฟที่สามารถส่งผ่านพลังงานได้ดีกว่าการใช้แผ่นวงจรพิมพ์ โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นท่อกลม หรือท่อเหลี่ยม แล้วแต่ความสะดวกในการใช้งาน ส่วนใหญ่จะทำมาจากทองแดงหรืออะลูมิเนียม ด้านในฉาบด้วยเงินเพื่อให้เป็นตัวนำที่ดีแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของท่อนำคลื่น

2.2 วงจรช่องแคบ [2]

วงจรช่องแคบหรือไอริส (Iris) มีลักษณะเป็นการนำแผ่นโลหะบางๆ ขนาดความหนาน้อยกว่าค่าความยาวคลื่นที่ใช้งานมากๆ มีสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ต่ำโดยวางที่ผนังด้านในของท่อนำคลื่นในลักษณะขนานกับสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านและเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductive Iris) เปรียบเทียบได้เป็นวงจรตัวเหนี่ยวนำต่อแบบขนานแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 วงจรช่องแคบในท่อนำคลื่น

2.3 วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น [3]

การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในงานวิจัยนี้จะอาศัยทฤษฎีการประมาณค่าแบบ Chebyshev ที่สามารถเริ่มจาก

 DOI:10.14416/c.fte.2017.11.054

การเลือกความถี่กลางที่ต้องการ ที่มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่น โดยสามารถกำหนดความถี่คือ ความถี่กลาง ความถี่ด้านล่าง และความถี่ตัดด้านสูงของแถบความถี่ผ่านซึ่งสมการที่ใช้ในการออกแบบมีดังนี้

สมการความยาวคลื่นในการกำหนดช่วงความถี่ที่ผ่านสามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$l_{g0} = \frac{l_{g1} + l_{g2}}{2} + \frac{1}{p}\left[\frac{l_{g1}\cos\left(\frac{pl_{g2}}{2l_{g1}}\right) + l_{g2}\cos\left(\frac{pl_{g1}}{2l_{g2}}\right)}{\sin\left(\frac{pl_{g2}}{2l_{g1}}\right) + \sin\left(\frac{pl_{g1}}{2l_{g2}}\right)}\right] \quad (1)$$

โดยที่ l_{g1}, l_{g2} สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$l_{g1} = \frac{l_{01}}{\sqrt{1-\left(w_c / w_{f1}\right)}} \quad (2)$$

$$l_{g2} = \frac{l_{02}}{\sqrt{1-\left(w_c / w_{f2}\right)}} \quad (3)$$

เมื่อ a สามารถหาได้จาก

$$a = \left[\frac{l_{g0}}{l_{g1}}\sin\left(\frac{pl_{g0}}{l_{g1}}\right)\right]^{-1} \quad (4)$$

การหาค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละอันดับของวงจรโดยที่ค่า N เท่ากับจำนวนอันดับซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$Z_r = \frac{2a}{h}\left[\frac{(2r-1)}{2N}\right] \quad (5)$$

การแปลงค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้ K-inverter โดยใช้สมการที่ (6)

$$K_r = \frac{\sqrt{h^2 + \sin^2(rp/N)}}{h} \quad (6)$$

เมื่อ h หาได้โดย

$$h = \sinh\left[\frac{1}{N}\sinh^{-1}\left(\frac{1}{e}\right)\right] \quad (7)$$

การหาค่า Susceptances ของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ (8) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์และค่าของการแปลงโดยใช้ K-inverterสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$B_{r,r+1} = \frac{\sqrt{Z_r Z_{r+1}}}{K_{r,r+1}} - \frac{K_{r,r+1}}{\sqrt{Z_r Z_{r+1}}} \quad (8)$$

การหาค่าความยาวเฟสระหว่างช่องแคบตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ภายในของท่อนำคลื่นได้จากโดยใช้สมการที่ (9)

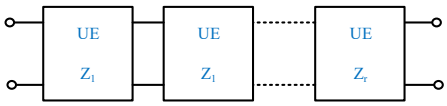
$$y_r = p - \frac{1}{2}\left[\cot^{-1}\left(\frac{B_{r+1,r}}{2}\right) + \cot^{-1}\left(\frac{B_{r,r-1}}{2}\right)\right] \quad (9)$$

การคำนวณค่าของระยะห่างระหว่างช่องแคบ สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (10)

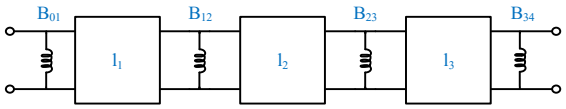
$$l_r = \frac{y_r}{p}\frac{l_{g0}}{2} \quad (10)$$

สำหรับการหาค่าความกว้างของช่องแคบ [4] สามารถวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ของค่า Susceptances ของวงจรช่องแคบแต่ละตัวที่วางเรียงลำดับภายในท่อนำคลื่น โดยจำเป็นต้องพิจารณาในการปรับปรุงค่ารีแอคแตนซ์ที่สัมพันธ์กันกับความถี่และค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้งานสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (11)

$$B_i = \frac{l_{g0}}{a}\cot^2\left(\frac{pd}{2a}\right) \quad (11)$$



ภาพที่ 3 วงจรเทียบเคียงแสดงความสัมพันธ์ของการแปลงค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้ K-inverter



ภาพที่ 4 วงจรเทียบเคียงของวงจรกรองผ่านแถบความถี่

3. การออกแบบโปรแกรมจำลอง

การออกแบบโปรแกรมมีลำดับขั้นตอนขั้นตอนดังนี้

1) กำหนดค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ขนาดโครงสร้างของท่อนำคลื่น ความถี่ใช้งาน จำนวนอันดับของวงจร และค่า Ripple

2) คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองความถี่

3) แปลงค่าอิมพีแดนซ์ให้อยู่ในรูปของ K-inverter

4) คำนวณค่า susceptances ของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

5) คำนวณค่าของระยะห่างระหว่างช่องแคบ

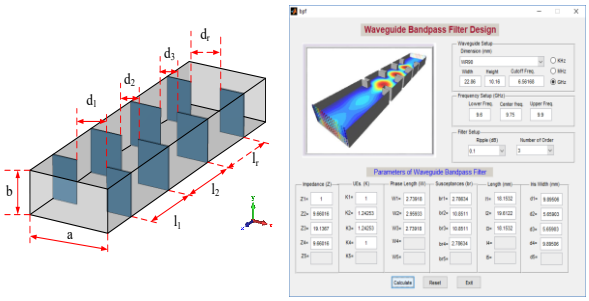
6) คำนวณหาค่าความกว้างของช่องแคบ

 DOI:10.14416/c.fte.2017.11.054

จากนั้นทำการทดสอบโปรแกรมโดยใช้ขนาดของท่อนำคลื่นตามมาตรฐาน WR90 ออกแบบวงจรที่มีความถี่กลางที่ 9.75 GHz ความกว้างของแถบความที่ 300 MHz จำนวนอันดับเท่ากับ 3 และค่าของ Ripple เท่ากับ 0.1 dB ทำให้ได้ค่าพามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 1 โดยลักษณะรูปร่างและขนาดโครงสร้างของท่อนำคลื่นที่โปรแกรมสามารถคำนวณได้แสดงดังภาพที่ 5 (ก) และหน้าต่างใช้งานโปรแกรมสามารถแสดงดังภาพที่ 5 (ข)

ตารางที่ 1 ค่าขนาดของวงจรที่ได้จากการคำนวณ

ค่าพารามิเตอร์	ความยาว (มิลลิเมตร)
Waveguide width (a)	22.86
Waveguide high (b)	10.16
Iris thickness	0.25
Iris width (d1)	9.90
Iris width (d2)	5.66
Iris width (d3)	5.66
Iris width (d4)	9.90
Resonator (l1)	18.15
Resonator (l2)	19.61
Resonator (l3)	18.15

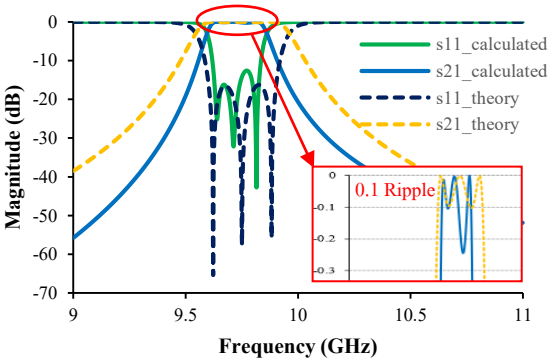


(ก) (ข)

ภาพที่ 5 ขนาดโครงสร้างและหน้าต่างของการใช้งานโปรแกรม

4. ผลการวิจัย

จากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นโดยใช้วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำวางอยู่ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดข้างต้น จากนั้นได้นำค่าที่ได้ออกแบบไปทำการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมจำลองการทำงานของ CST Microwave Studio® โดยเปรียบเทียบกับผลตอบสนองทางทฤษฎีพบว่าแถบความถี่มีค่าเท่ากับ 350 MHz และ 310 MHz ภายในแถบความถี่ผ่านเกิดความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกมีค่าเท่ากับ 0.1 dB และ 0.25 dB ตามลำดับ และมีการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับสูงสุดมีค่าประมาณ 57 dB และ 31 dB ตามลำดับดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่

5. สรุปผลการวิจัย

บทความวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอโปรแกรมจำลองวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นสำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรม ซึ่งได้ออกแบบด้วยฟังก์ชัน GUI ของ MATLAB® และทดสอบการทำงานด้วยการเปรียบเทียบผลตอบสนองด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ให้ผลที่สอดคล้องกับการออกแบบ แต่พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเนื่องจากความแตกต่างของขนาดโครงสร้างวงจรที่มีการเลือกใช้ค่าที่แตกต่างกัน โดยในการสร้างชิ้นงานจริงจะมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามผลของงานวิจัยนี้สามารถช่วยลดเวลาในการคำนวณ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประกอบการเรียนการสอนด้านวิศวกรรมไมโครเวฟได้ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนาและประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบวงจรไมโครเวฟได้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] L. Xu, H. Wang, J. Li and B. Li, "Windows simulator: An advanced three-dimensional finite-element S-parameter-simulation tool for microwave tubes," 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Beijing, 2015, pp. 1-2.

[2] I. C. Hunter, Theory and Design of Microwave Filters, London, U.K:IEE Press: SIAM, 2001.

[3] N. Marcuvitz, Waveguide Handbook. Short RunPress Ltd; London, UK, 1986.

[4] David M. Pozar, Microwave Engineering. John Wiley & Son, New York, 1998.