

การพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับศึกษาและ วิเคราะห์วงจรกรองความถี่ภายในท่อนำคลื่นด้วยวิธีการวนรอบของคลื่น Development of Simulated Program for Study and Analysis of Wave Guided Filter Using Wave Iterative Method

ศรัณย์ ชูคดี¹ และ สมศักดิ์ อรรถคิมากุล^{2*}
Sarun chookadee¹ and Somsak Akatimakool^{2*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับศึกษาและวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ภายในท่อนำคลื่นโดยใช้วงจรช่องแคบ (Iris) ที่วางตัวในท่อนำคลื่นลักษณะต่างกัน ทำให้ความสมมูลทางไฟฟ้าเทียบได้กับตัวเหนี่ยวนำ (Inductive Iris) ตัวเก็บประจุ (Capacitive Iris) ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อขนานกัน (Resonant Iris) การวิเคราะห์จะใช้หลักการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับวิธีการคำนวณแบบวนรอบ (Wave Iterative Method) ซึ่งจะคำนวณหาค่าขนาดของคลื่นบนพื้นที่พิกเซลของวงจรช่องแคบ และโดเมนทางความถี่หรือโหมดที่แพร่กระจายในอากาศ โดยใช้รูปแบบของการแปลงสภาพของโหมด-พิกเซลอย่างรวดเร็ว (Fast Mode-Pixel Transform) ผู้วิจัยได้สร้างโปรแกรมจำลองเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาและวิเคราะห์เรียกว่าโปรแกรม WCD V. 1.03 (Waveguide Circuit Design Version 1.03) ที่แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วยส่วนรับข้อมูล ส่วนประมวลผล และส่วนแสดงผล โครงสร้างของโปรแกรมจะมีลักษณะเป็นหน้าต่างเมนูที่ทำงานภายใต้ฟังก์ชัน GUI (Graphic User Interface) ของโปรแกรม MATLAB[®] จากนั้นได้ทำการทดสอบผลการทำงาน

ของโปรแกรมจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองที่มีใช้งานในเชิงพาณิชย์ CST Microwave Studio[®] พบว่าการวิเคราะห์ค่าผลของการตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากโปรแกรมจำลองทั้งสองมีความสอดคล้องกัน และโปรแกรม WCD สามารถแสดงขนาดและรูปร่างของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในวงจรช่องแคบได้อย่างถูกต้อง

คำสำคัญ: โปรแกรมจำลอง WCD วิธีการวนรอบของคลื่น วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

Abstract

This research presents the development of simulated program for study and analysis of the wave guide filter with the iris circuits. The equivalent circuits of different iris circuits within the rectangular waveguide can be presented as inductive, capacitive and inductive-capacitive resonant circuit. The analysis based on the principles of electromagnetic wave propagation and Wave Iterative Method (WIM) to calculate the amplitude

¹ นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 ต่อ 2204, 3322, E-mail: ssa@kmutnb.ac.th

of wave in the pixel area and frequency domain. The alternating between bolt domains will use the Fast Mode-Pixel Transform (FFT). The created simulation program is called WCD 2010 V. 1.03 (Waveguide Circuit Design Version 1.03). This program is divided into three parts: input, output, and processing part. The input and output parts are displayed by GUI (Graphic User Interface) of MATLAB® software. The WCD simulated results were inconsistent with in the comparing with CST Microwave Studio® program that WCD can correctly show the electric and magnetic fields on the waveguide iris circuit.

Keywords: WCD Simulation, Wave Iterative Method, Waveguide Filter, Electromagnetic Field

1. บทนำ

ปัจจุบันการวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่ย่านไมโครเวฟมีความสำคัญต่อการใช้งานในระบบสื่อสารเป็นอย่างมากและเป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีที่มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นเป็นส่วนหนึ่งที่มีนักวิจัย [1]-[3] ให้ความสนใจในการวิเคราะห์และออกแบบเพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม สำหรับการวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ดังกล่าวมีอยู่หลายวิธี เช่น วิธี Mode Matching Method (MMM) [4] Smoothed Piecewise Linear model (SPWL) [5] Finite Differential Time Domain (FDTD) [6] Transmission Line Matrix (TLM) [7] Moment Method [8] เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดในการใช้งาน และความยุ่งยาก ซับซ้อนในการคำนวณที่แตกต่างกัน ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เหล่านี้มาสร้างเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่รู้จักกันทั่วไป ได้แก่ โปรแกรม CST Microwave Studio® โปรแกรม GWT (Guide Wave Technology) [9] ปัญหาสำคัญที่พบได้แก่ผู้ที่สนใจ

ส่วนใหญ่ไม่สามารถศึกษาและเข้าใจถึงรายละเอียดภายในโครงสร้างของโปรแกรมเหล่านั้นได้ ตลอดจนราคาของโปรแกรมที่สูงมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาออกแบบและพัฒนาวิธีการคำนวณแบบใหม่เพื่อสร้างเป็นโปรแกรมจำลองที่สามารถวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่ภายในท่อนำคลื่น โดยใช้ทฤษฎีของคลื่น (Wave Theory) ที่แพร่กระจายและเคลื่อนที่ไปมาซ้ำๆ กัน หรือแบบวนรอบ (Iterative Method) ภายในท่อนำคลื่น ที่สามารถคำนวณหาขนาดของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนกลับ และคลื่นส่งผ่านบนพื้นที่ของแผ่นตัวนำ หลังจากนั้นวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของโครงข่าย เพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรตัวนำภายในท่อนำคลื่น

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมจำลองด้วยวิธีการวนรอบของคลื่นที่สามารถออกแบบและวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น โดยแสดงผลการคำนวณในรูปแบบของสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สามารถใช้งานง่าย การคำนวณที่รวดเร็ว ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ต่างๆ เช่น โปรแกรม CST Microwave Studio® เป็นต้น ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมและเป็นแนวทางในการวิเคราะห์สำหรับให้นักวิจัยนำไปใช้ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่น จะประกอบไปด้วยโหมด TE และ TM ซึ่งเป็นการคำนวณที่หาค่าในรูปของโดเมนทางความถี่ (Frequency Domain) โดยอาศัยสมการการรวมแบบอนุกรม (Series Integration Equation) ในการคำนวณหาค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของข่ายงานสองขั้ว ซึ่งผลการตอบสนองทางความถี่ที่ได้จะแสดงถึงลักษณะของวงจรกรองความถี่แบบต่างๆ นั้นเอง แต่ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ทางตัวเลขที่ทำงานร่วมกันระหว่างโดเมนทางความถี่

(Frequency Domain) และโดเมนบนพื้นที่จริง (Real Domain) ซึ่งเป็นค่าขนาดของคลื่นที่ปรากฏบนผิวของตัวนำที่แบ่งออกเป็นพื้นที่ขนาดเล็กๆ หรือที่เรียกว่าพิกเซล (Pixel) เพื่อให้การคำนวณไม่ยุ่งยาก และสามารถแสดงผลได้อย่างรวดเร็ว โดยจะประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของวงจรกรองความถี่ต่างๆ ที่อยู่ภายในท่อนำคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 1

2.1 สมการคลื่น (Wave Equation)

กำหนดให้พื้นที่ใดๆ ที่มีคลื่นเคลื่อนที่ผ่าน สมการความสัมพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเทอมของค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{A} = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}} (\vec{E} + Z_0 \vec{H}) \quad (1)$$

$$\vec{B} = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}} (\vec{E} - Z_0 \vec{H}) \quad (2)$$

โดยที่ $\vec{A}$ คือคลื่นตกกระทบ และ $\vec{B}$ คือคลื่นสะท้อนกลับ $\vec{E}$ และ $\vec{H}$ แทนเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ และ Z_0 คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของคลื่น

สำหรับการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางภายในท่อนำคลื่นสามารถกำหนดขอบเขตในบริเวณรอบๆ วงจรตัวนำได้ดังนี้

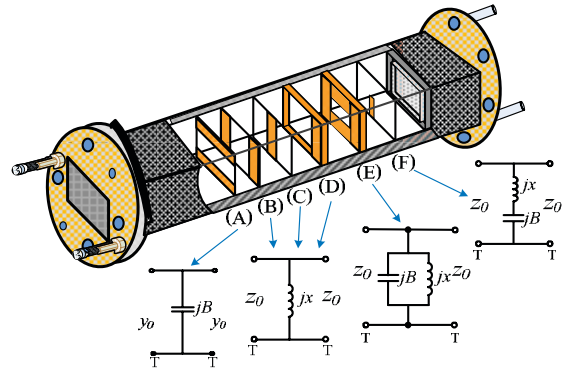
ก. กรณีของผนังไฟฟ้า (Electric Wall)

เป็นการกำหนดให้รอบๆ ตัวนำเป็นผนังไฟฟ้าที่วิเคราะห์ได้เป็นวงจรของตัวเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 2 จากรูปที่ 2 สมการของคลื่นตามขวางในท่อนำคลื่นที่มีผนังไฟฟ้า (Electric Wall) [10] สำหรับโหมด TE มีดังนี้

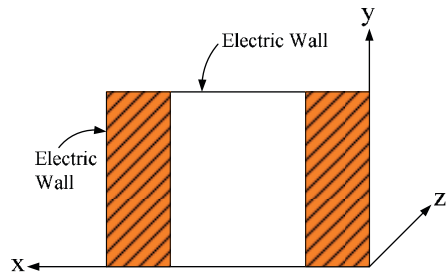
$$\vec{E}_{x(x,y)}^\alpha = K_x^\alpha \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (3)$$

$$\vec{E}_{y(x,y)}^\alpha = K_y^\alpha \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (4)$$

โดยที่ α คือสมการในรูปของโหมด TE และ K เป็นค่า



รูปที่ 1 โครงสร้างวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น



รูปที่ 2 ผนังไฟฟ้ารอบๆ ตัวนำ

คงที่ในทิศทางของแกน x และแกน y ดังนี้

$$K_x^{TE} = \frac{n\sqrt{\frac{2\tau}{ab}}}{b\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}, \quad K_x^{TM} = \frac{m\sqrt{\frac{2\tau}{ab}}}{a\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}$$

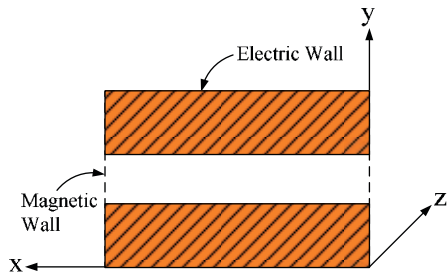
$$K_y^{TE} = \frac{-m\sqrt{\frac{2\tau}{ab}}}{a\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}, \quad K_y^{TM} = \frac{n\sqrt{\frac{2\tau}{ab}}}{b\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}$$

เมื่อกำหนดให้ $\tau=1$ โดยที่ $m,n=0$ และ $\tau=2$ โดยที่ $m,n \neq 0$

ข. กรณีของผนังไฟฟ้าและผนังแม่เหล็ก (Electric-magnetic Wall)

เป็นการกำหนดให้รอบๆ ตัวนำเป็นผนังไฟฟ้าและผนังแม่เหล็กที่วิเคราะห์ได้เป็นวงจรของตัวเก็บประจุ แสดงดังรูปที่ 3

สำหรับฟังก์ชันพื้นฐานของโหมด TM สมการของคลื่นที่มีผนังไฟฟ้าและผนังแม่เหล็ก [10] แสดงดังรูปที่ 3 มีดังนี้



รูปที่ 3 ผนังไฟฟ้าและผนังแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำ

$$\vec{E}_{x(x,y)}^\alpha = K_x^\alpha \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (5)$$

$$\vec{E}_{y(x,y)}^\alpha = K_y^\alpha \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (6)$$

โดยที่ α คือสมการในรูปของโหมด TM และ K เป็นค่าคงที่ในทิศทางของแกน x และแกน y ดังนี้

$$K_x^{TE} = \frac{n\sqrt{\frac{2\tau}{ab}}}{b\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}, \quad K_x^{TM} = \frac{m\sqrt{\frac{2\tau}{ab}}}{a\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}$$

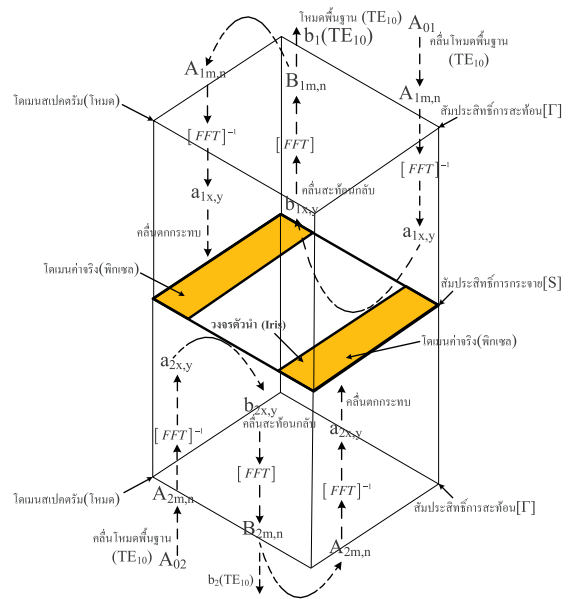
$$K_y^{TE} = \frac{m\sqrt{\frac{2\tau}{ab}}}{a\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}, \quad K_y^{TM} = \frac{-n\sqrt{\frac{2\tau}{ab}}}{b\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}$$

เมื่อกำหนดให้ $\tau = 1$ โดยที่ $m, n = 0$ และ $\tau = 2$ โดยที่ $m, n \neq 0$

3. วิธีการวนรอบของคลื่นในท่อนำคลื่น

หลักการของการคำนวณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายในท่อนำคลื่น โดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่น [11] จะมีกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะอาศัยการคำนวณขนาดและทิศทางของคลื่นตกกระทบ (Incident Wave) คลื่นสะท้อน (Reflected Wave) และคลื่นส่งผ่าน (Transmitted Wave) ที่แพร่กระจายผ่านวงจรช่องแคบ โดยที่วงจรช่องแคบจะคำนวณขนาดของคลื่นในโดเมนบนพื้นที่จริง (Real Domain)

สำหรับคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่เป็นอากาศว่าง จะคำนวณในโดเมนทางความถี่ (Frequency Domain)



รูปที่ 4 กระบวนการวนรอบของคลื่นในท่อนำคลื่น

โดยใช้การแปลงสภาพฟูเรียร์อย่างเร็วทางโหมด-พิกเซล (Fast Pixel-Mode Fourier Transform) ในการเปลี่ยนสภาพระหว่างโดเมนทั้งสอง ที่พบว่าคลื่นในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) จะสามารถเคลื่อนที่ผ่านจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ด้วยหลักการของการแผ่ซึ่งทางโหมดที่ทางเข้าและทางออกของท่อนำคลื่น สำหรับคลื่นในโหมดที่สูงกว่า ซึ่งเกิดจากการกระจายของคลื่นบนส่วนของแผ่นตัวนำ จะเกิดการแผ่กระจายสะท้อนไปมาอยู่ตลอดเวลาภายในท่อนำคลื่น ซึ่งส่งผลทำให้การคำนวณรวดเร็วมากยิ่งขึ้นและสามารถแสดงรูปคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏบนพื้นผิวของวงจรช่องแคบได้อีกด้วย

จากรูปที่ 4 กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของคลื่นในโหมดพื้นฐานเป็นดังนี้

$$A_{0i} = -\sqrt{\frac{2}{ab}} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (7)$$

เมื่อ A_{0i} คือ Initial incident wave ของโหมด TE_{10} ซึ่งเป็นค่าของแหล่งกำเนิดที่ป้อนเข้าไปยังท่อนำคลื่น

คลื่นสะท้อนกลับ (B_i) จากวงจรตัวนำหรือช่องแคบ (Iris) ในลำดับโหมดที่ n ในโดเมนบนพื้นที่จริงที่มีสัมประสิทธิ์

ของการสะท้อนของตัวนำ (S_m) และไดโวลีเกกตริก (S_i)

$$B_1^{(n)} = -S_M(A_1^{(n-1)} + A_1^{(0)}) + S_I A_2^{(n-1)} \quad (8)$$

$$B_2^{(n)} = S_I(A_1^{(n-1)} + A_1^{(0)}) + S_M A_2^{(n-1)} \quad (9)$$

สมการของคลื่น b ในโดเมนทางความถี่ เมื่อ m แทนการแปลงสภาพทางความถี่โดยใช้ FFT (Fast Fourier Transform) เขียนได้ดังนี้

$$B_{(m,n)} = M[b_{(x,y)}] \quad (10)$$

$$B_{(m,n)} = \sum_i^{2n} B_{(x_i, y_i)} e^{\left(-\frac{2j\pi m x_i}{a}\right)} \quad (11)$$

ในสมการ (11) คลื่น a จากผลของสัมประสิทธิ์การสะท้อน มีดังนี้

$$a_{(m,n)} = \Gamma b_{(m,n)} \quad (12)$$

$$\Gamma = \frac{1 - Z_0 Y}{1 + Z_0 Y} \quad \text{เมื่อ } Z_0 \text{ คือ Intrinsic Impedance ใน}$$

โหมดพื้นฐาน TE_{10} และ Y_{mn} คือ TE/TM Mode Admittance ในลำดับโหมดที่ m, n

และในทำนองเดียวกัน สามารถหาการแปลงผกผันของฟูเรียร์ทางความถี่ (Inverse Fast Fourier Transform : M^{-1}) ได้คือ

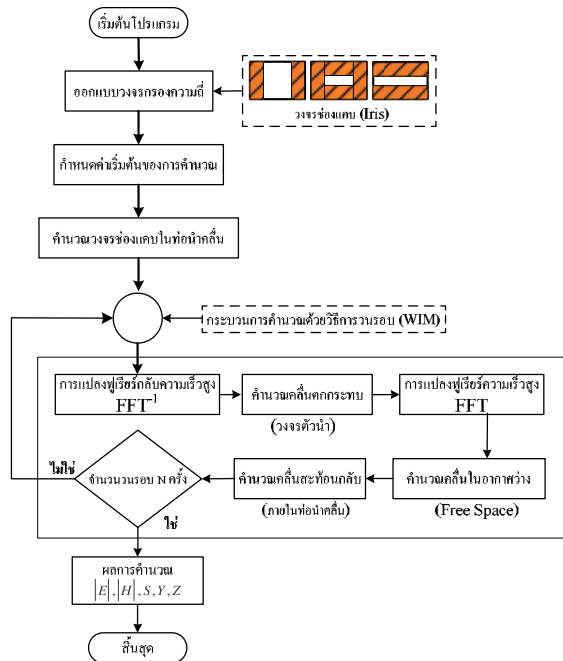
$$A_{(x,y)} = M^{-1}[a_{(m,n)}] \quad (13)$$

ดังนั้นเมื่อทำการคำนวณแบบวนรอบ ที่ลำดับ $n-1$ ในโดเมนบนพื้นที่จริง จากสมการที่ (8) ถึงสมการที่ (13) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$A_1^{(n-1)} = M^{-1}(\Gamma M(B_1^{(n-1)})) \quad (14)$$

$$A_2^{(n-1)} = M^{-1}(\Gamma M(B_2^{(n-1)})) \quad (15)$$

เมื่อ A_i คือ คลื่นตกกระทบที่ส่งเข้าไปในท่อนำคลื่น และเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

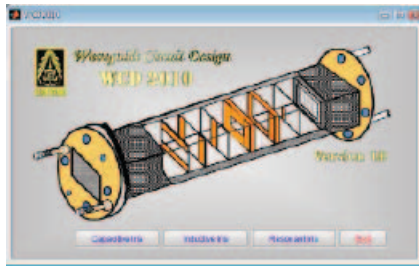


รูปที่ 5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม WCD

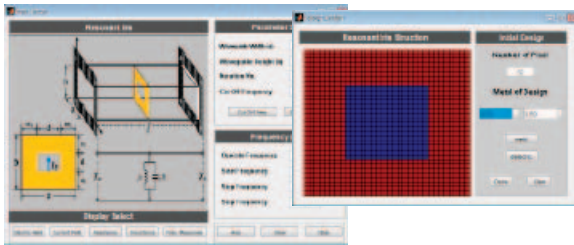
$$\begin{bmatrix} B_1^{(n)} \\ B_2^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_M M^{-1} \Gamma & S_I M^{-1} \Gamma M \\ S_I M^{-1} \Gamma & -S_M M^{-1} \Gamma M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1^{(n-1)} \\ B_2^{(n-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -S_M A_1^{(0)} \\ S_I A_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

3. การพัฒนาโปรแกรมจำลอง WCD V.1.03

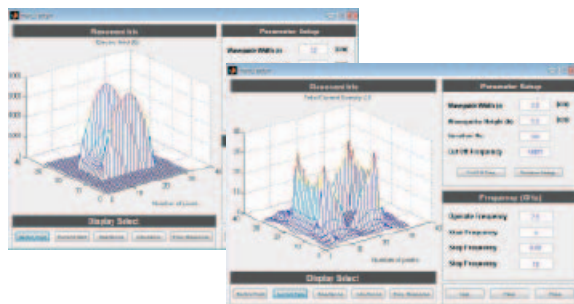
การออกแบบโปรแกรมจำลองการคำนวณสำหรับการศึกษาและวิเคราะห์ห้วงจรของความเร็วภายในท่อนำคลื่นที่สร้างและพัฒนาขึ้นด้วยวิธีการวนรอบของคลื่นที่มีชื่อเรียกว่า โปรแกรม WCD V1.03 (Waveguide Circuit Design Version 1.03) จะมีลักษณะเป็นรายการเมนูให้เลือกหรือป้อนค่าลงไปในช่วงที่กำหนดให้ และสามารถออกแบบโครงสร้างของแผ่นตัวนำ (Iris Structure) โดยทำงานภายใต้ฟังก์ชัน GUI (Graphic User Interface) ของโปรแกรม MATLAB® เพื่อเป็นส่วนในการติดต่อระหว่างผู้ใช้งานและส่วนของการคำนวณ โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 5 มีกระบวนการทำงานตามไดอะแกรมดังนี้



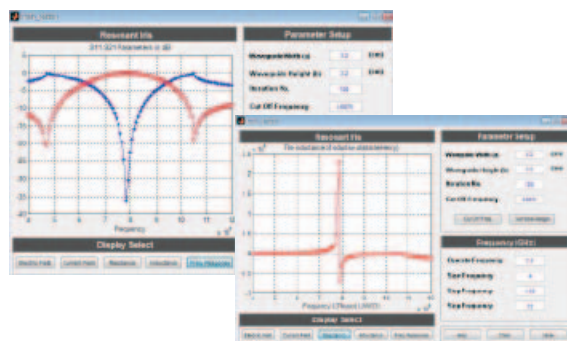
(ก) เมนูหลักของโปรแกรม



(ข) เลือกวิเคราะห์วงจรช่องแคบและกำหนดค่าการคำนวณ



(ค) หน้าต่างแสดงรูปคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



(ง) หน้าต่างแสดงผลค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ

รูปที่ 6 โปรแกรมจำลอง WCD

ก. เริ่มต้นโปรแกรมจำลองจากเมนูหลัก ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์วงจรช่องแคบที่มีโครงสร้างวางขวางในท่อนำคลื่นแบบตัวเหี่ยวนา ตัวเก็บประจุ ตัวเหี่ยวนา และตัวเก็บประจุต่อขนานกันหรือเรียกว่าโครงสร้างช่องแคบแบบสี่เหลี่ยม แสดงดังรูปที่ 6(ก)

ข. ออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่น ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดค่าพื้นฐานการคำนวณในการออกแบบได้เอง เช่น ขนาดความสูง ความกว้างของท่อนำคลื่น ช่วงความกว้างของความถี่ในการทำงาน และอัตราส่วนพื้นผิวด้านและขนาดช่องว่างของวงจรช่องแคบ แสดงดังรูปที่ 6(ข)

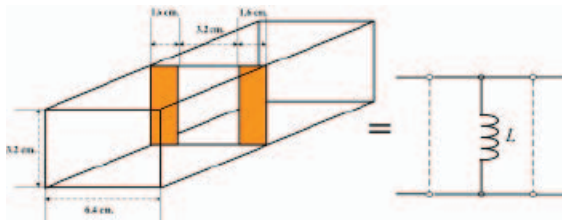
ค. กำหนดค่าขนาดของคลื่นที่ตกกระทบในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

ง. กำหนดค่าขนาดของคลื่นที่สะท้อนกลับและคลื่นส่งผ่านบนพื้นผิวด้านในโดเมนบนพื้นที่จริง (Real Domain) และภายในอากาศว่างในโดเมนทางความถี่ (Frequency Domain) ในกระบวนการนี้จะปรากฏค่าของคลื่นสะท้อนกลับและคลื่นส่งผ่านเป็นจำนวนมากที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ของวงจรช่องแคบ ซึ่งกระบวนการคำนวณจะสิ้นสุดลงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของจำนวนการวนรอบ

จ. ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะแสดงค่าปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ปรากฏบนพื้นที่ช่องแคบ แสดงดังรูปที่ 6(ค) และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 6(ง)

4. ผลของการวิจัย

ผลของงานวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้ เป็นการวิเคราะห์วงจรกรองความถี่แบบช่องแคบชนิดต่างๆ ที่อยู่ภายในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม ซึ่งจะประกอบด้วยวงจรช่องแคบแบบตัวเหี่ยวนา วงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุ และวงจรช่องแคบแบบตัวเหี่ยวนาและตัวเก็บประจุต่อขนานกัน โดยการใช้โปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่ WCD V1.03 ที่ผู้วิจัยสร้างและพัฒนาขึ้นที่ใช้วิธีการคำนวณแบบวนรอบของคลื่นเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองสำเร็จรูปในเชิงพาณิชย์ CST Microwave



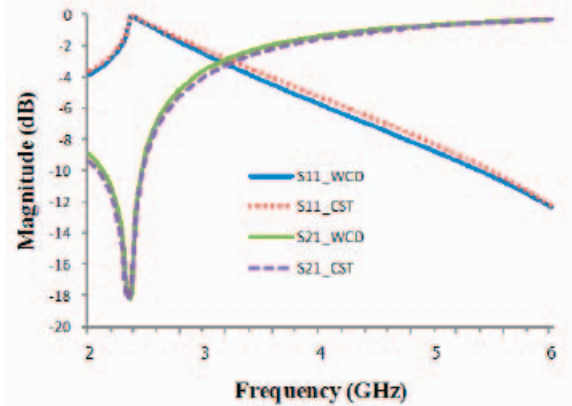
รูปที่ 7 วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

Studio® ภายใต้การจำลองการทำงานในสภาพของโครงสร้างที่เหมือนกันที่มีแหล่งจ่ายพลังงานของคลื่นในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) และกำหนดให้มีการแผ่รังสีทางโหมดที่ทางเข้าและทางออกของท่อนำคลื่น โดยผลของการวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

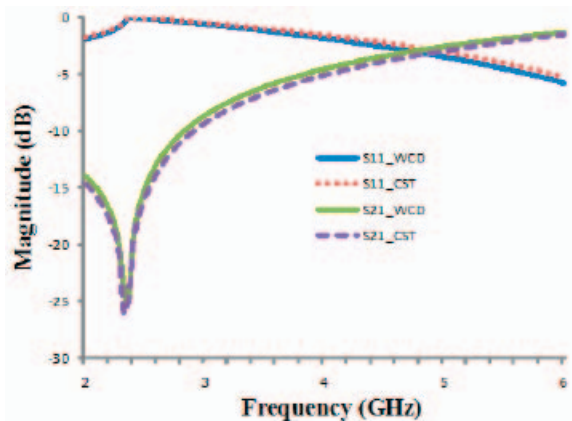
4.1 การวิเคราะห์วงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ

การวิเคราะห์วงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียวที่วางขวางอยู่ภายในโครงสร้างท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 7 ด้วยโปรแกรม WCD V1.03 ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งจะกำหนดให้จ่ายพลังงานจากแหล่งกำเนิดของคลื่นในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) สำหรับวงจรทดสอบนี้จะมีความกว้าง (a) เท่ากับ 6.4 เซนติเมตร และความสูง (b) เท่ากับ 3.2 เซนติเมตร โดยการตอบสนองจะยอมให้ค่าที่มีความถี่สูงกว่าความถี่คutoff ในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) ที่ 2.34 GHz ผ่านไปได้ และกำหนดให้ส่วนของวงจรช่องแคบมีความกว้าง (d) เท่ากับ 3.2 และ 1.6 เซนติเมตร ผลการจำลองจะแสดงในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

รูปที่ 8 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำที่กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างความกว้างช่องแคบ (d) ต่อความกว้างท่อนำคลื่น (a) มีค่าเท่ากับ 0.5 ที่มีลักษณะของผลตอบสนองทางไฟฟ้าเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยมีความถี่คutoff ของวงจรช่องแคบที่ค่าเท่ากับ 3.24 GHz ที่ระดับ -3 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2–6 GHz และเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ CST Microwave Studio® จะให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องกันโดยค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างทั้งสองโปรแกรมมีค่า



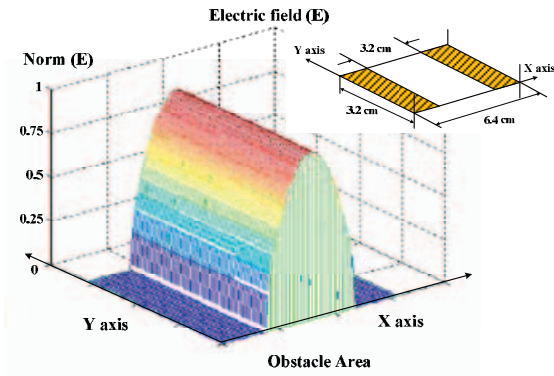
รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์เอส ระหว่างโปรแกรม WCD กับ CST® เมื่อ $d/a = 0.5$



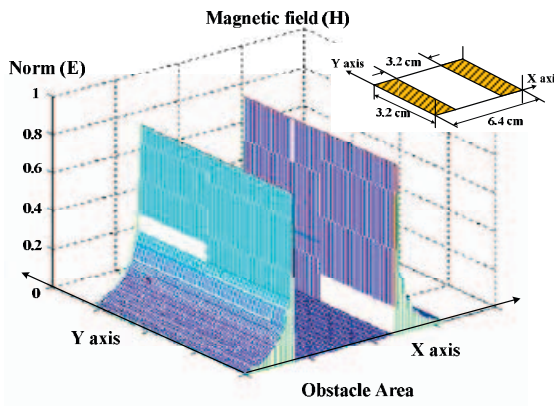
รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ ระหว่างโปรแกรม WCD กับ CST® เมื่อ $d/a = 0.375$

ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 9 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านที่ใช้วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำที่กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างความกว้างช่องแคบ (d) ต่อความกว้างท่อนำคลื่น (a) มีค่าเท่ากับ 0.375 โดยมีความถี่คutoff ของวงจรช่องแคบที่ค่าเท่ากับ 4.82 GHz ที่ระดับ -3 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2–6 GHz ซึ่งพบว่าค่าของความถี่ตัดผ่านจะแปรผกผันกับขนาดความกว้างของวงจรช่องแคบ หรืออาจกล่าวได้ว่าถ้าขนาดของช่องแคบกว้างมากขึ้น ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรช่องแคบจะมีค่า



(ก) รูปคลื่นของสนามไฟฟ้า

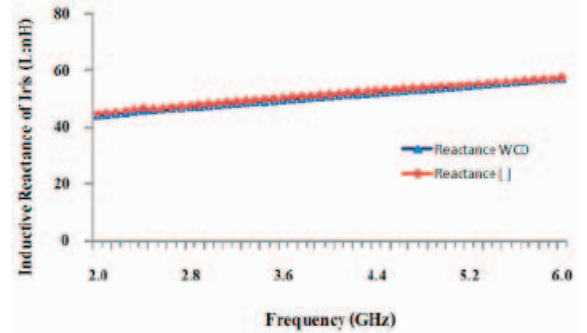


(ข) รูปคลื่นของสนามแม่เหล็ก

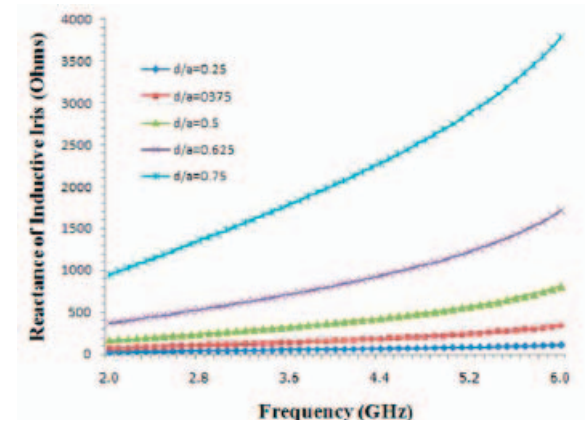
รูปที่ 10 รูปคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ เมื่อ $d/a = 0.5$

น้อยลง โดยผลจากการวิเคราะห์ที่ได้จะสอดคล้องกันกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ CST Microwave Studio® โดยค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างทั้งสองโปรแกรมมีค่าประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 10 (ก) แสดงค่าสนามไฟฟ้าของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ จะเห็นได้ว่าในส่วนของพื้นที่ช่องช่องแคบจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสนามไฟฟ้าโดยมีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางและจะมีค่าเป็นศูนย์ที่พื้นที่ตัวนำและรูปที่ 10 (ข) แสดงค่าสนามแม่เหล็กของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ จะเห็นว่าสนามแม่เหล็กจะปรากฏอยู่บน



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำระหว่างโปรแกรม WCD และ [12] เมื่อ $d/a = 0.375$

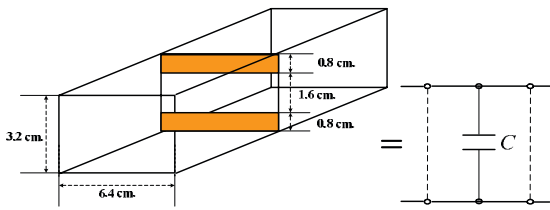


รูปที่ 12 ผลการเปรียบเทียบค่ารีแอคแตนซ์โดยเพิ่มขนาดความกว้างของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

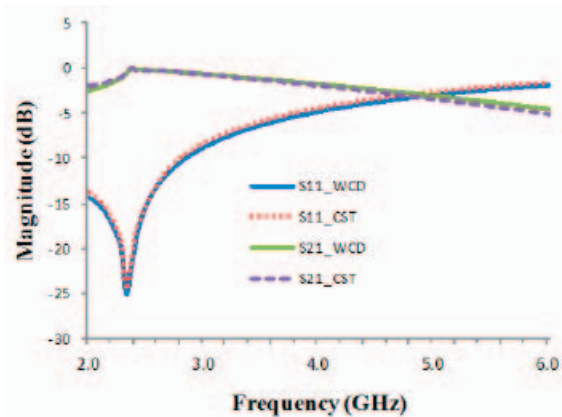
พื้นที่ตัวนำของวงจรช่องแคบที่แสดงค่าขนาดในรูปของความหนาแน่นของกระแส โดยบริเวณขอบของแผ่นตัวนำจะมีค่าสูงสุดและมีค่าต่ำสุดที่พิกัดติดกับท่อนำคลื่น

รูปที่ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ารีแอคแตนซ์และของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรมจำลอง WCD และค่าทางทฤษฎี [11] โดยกำหนดค่าความกว้างของวงจรช่องแคบ $d/a = 0.375$ ที่ความถี่ตั้งแต่ 2-6 GHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ค่ารีแอคแตนซ์ของวงจรช่องแคบจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกันกับค่าทางทฤษฎี

รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่ารีแอคแตนซ์ของ



รูปที่ 13 วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ

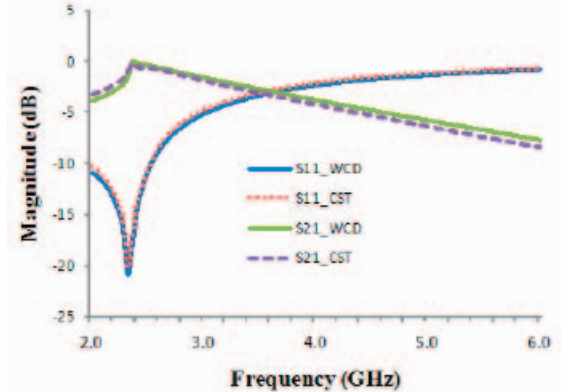


รูปที่ 14 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์เอส ระหว่างโปรแกรม WCD กับ CST® เมื่อ $d/a = 0.125 - 0.25$

วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำโดยการเพิ่มขนาดความกว้างของวงจรช่องแคบที่ระยะห่างระหว่าง $d/a = 0.25 - 0.75$ ด้วยโปรแกรมจำลอง WCD ที่ความถี่ตั้งแต่ 2-6 GHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดความกว้างของช่องแคบเพิ่มขึ้น คาร์แอคแตนซ์ของวงจรช่องแคบก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม

4.2 การวิเคราะห์ห้วงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุ

การวิเคราะห์ห้วงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุที่วางขวางอยู่ในโครงสร้างท่อนำคลื่นดังรูปที่ 13 โดยกำหนดให้จ่ายพลังงานแหล่งกำเนิดของคลื่นในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) สำหรับวงจรทดสอบมีความกว้าง (a) เท่ากับ 6.4 เซนติเมตร และความสูง (b) เท่ากับ 3.2 เซนติเมตร โดยจะยอมให้ความถี่ที่มีค่าต่ำกว่าความถี่คัตออฟในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) ที่ 2.34 GHz ผ่านไปได้ และกำหนดให้ส่วนของวงจรช่องแคบมีความกว้าง (d) เท่ากับ 0.8 และ 0.4 เซนติเมตร ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับ

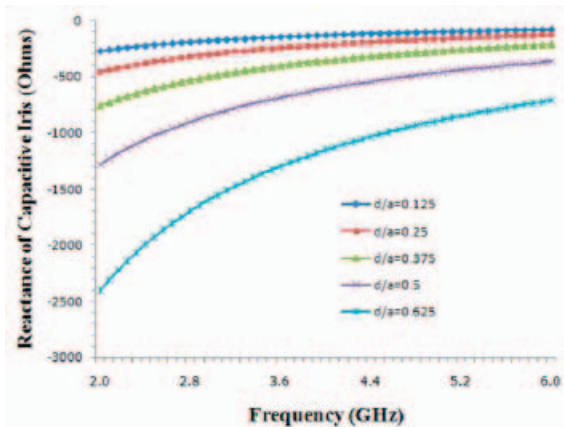


รูปที่ 15 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์เอส ระหว่างโปรแกรม WCD กับ CST® เมื่อ $d/a = 0.125$

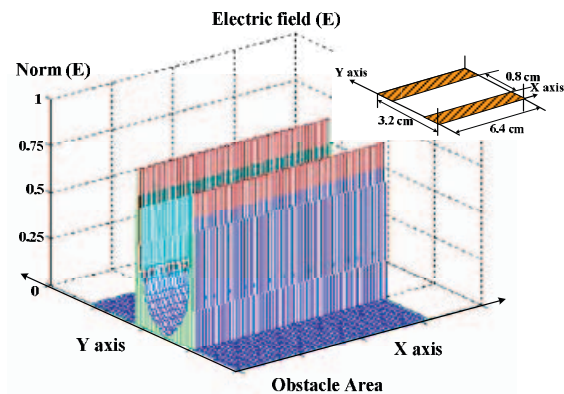
รูปที่ 14 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรช่องแคบชนิดตัวเก็บประจุที่กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างความกว้างช่องแคบ (d) ต่อความกว้างท่อนำคลื่น (a) มีค่าเท่ากับ 0.25 ที่มีลักษณะของผลตอบสนองทางไฟฟ้าเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยมีค่าความถี่คัตออฟ ของวงจรช่องแคบเท่ากับ 4.95 GHz ที่ระดับ -3 dB และเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ CST Microwave Studio® จะให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องกัน โดยค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทั้งสองโปรแกรมมีค่าประมาณ 3.54 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 15 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุมีค่า $d/a = 0.125$ โดยความถี่คัตออฟของวงจรมีค่าเท่ากับ 3.46 GHz ที่ระดับ -3 dB ซึ่งพบว่าค่าความถี่คัตออฟจะแปรผันกับขนาดความกว้างของวงจรช่องแคบ หรืออาจกล่าวได้ว่าถ้าขนาดของช่องแคบกว้างมากขึ้น ค่าตัวเก็บประจุของวงจรช่องแคบจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย โดยผลจากการวิเคราะห์ที่ได้จะสอดคล้องกันกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ CST Microwave Studio® โดยค่าของความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทั้งสองโปรแกรมมีค่าประมาณ 3.24 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบคาร์แอคแตนซ์ของวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุโดยการเพิ่มขนาด



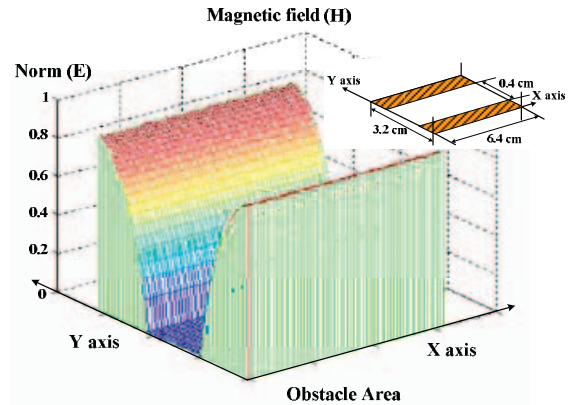
รูปที่ 16 ผลการเปรียบเทียบค่ารีแอคแตนซ์โดยเพิ่มขนาดความกว้างของวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ



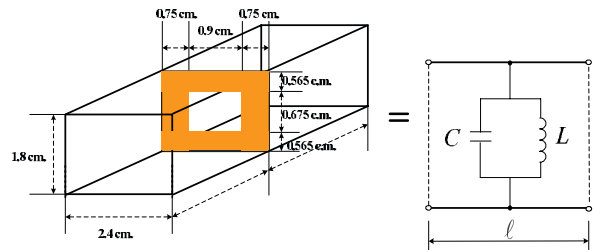
รูปที่ 17 รูปคลื่นของสนามไฟฟ้าในช่องแคบ

ความกว้างของวงจรช่องแคบที่ระยะห่างระหว่าง $d/a = 0.125 - 0.625$ ด้วยโปรแกรมจำลอง WCD ที่ความถี่ตั้งแต่ 2-6 GHz ซึ่งจากการจำลองจะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดความกว้างของช่องแคบเพิ่มขึ้น ค่ารีแอคแตนซ์ของวงจรจะมีค่าลดลงตาม

รูปที่ 17 แสดงค่าสนามไฟฟ้าของวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่ามากที่สุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นตัวนำ และบริเวณช่องว่าง และจากรูปที่ 18 จะเห็นว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบด้านนอกของแผ่นโลหะตัวนำทั้งสองด้าน แต่ที่ขอบรอยต่อด้านในระหว่างแผ่นตัวนำจะมีค่าสนามแม่เหล็กต่ำสุด และบริเวณช่องว่างของท่อ



รูปที่ 18 รูปคลื่นของสนามแม่เหล็กในช่องแคบ



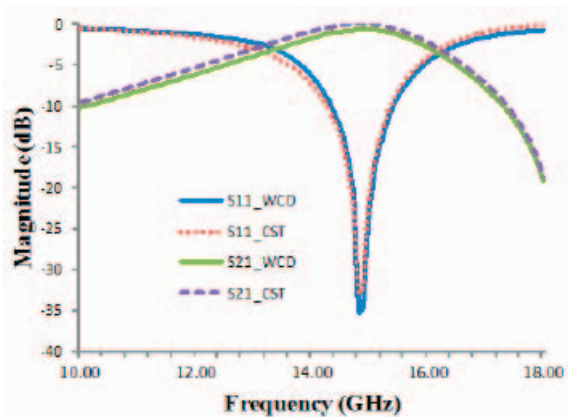
รูปที่ 19 วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

นำคลื่นจะไม่ปรากฏค่าของสนามแม่เหล็กใดๆ ทั้งสิ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

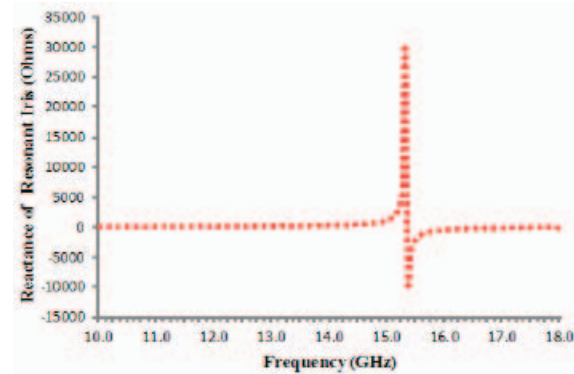
4.3 การวิเคราะห์วงจรช่องแคบชนิดตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อขนานกัน (Resonant)

กำหนดวงจรช่องแคบสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง (a) เท่ากับ 2.4 เซนติเมตร และความสูง (b) เท่ากับ 1.8 เซนติเมตร โดยกำหนดให้จ่ายพลังงานแหล่งกำเนิดของคลื่นในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) ส่วนของวงจรช่องแคบสี่เหลี่ยมมีความกว้างเท่ากับ 0.9 เซนติเมตร และความสูงเท่ากับ 0.675 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 19

รูปที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบผลของการตอบสนองทางความถี่ในช่วง 10-18 GHz ระหว่างโปรแกรมจำลอง WCD และโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ CST Microwave Studio® ได้ผลการตอบสนองเป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่มีความถี่คัตออฟด้านล่าง (Lower



รูปที่ 20 ผลการเปรียบเทียบค่า dB(S11) และ dB(S21)

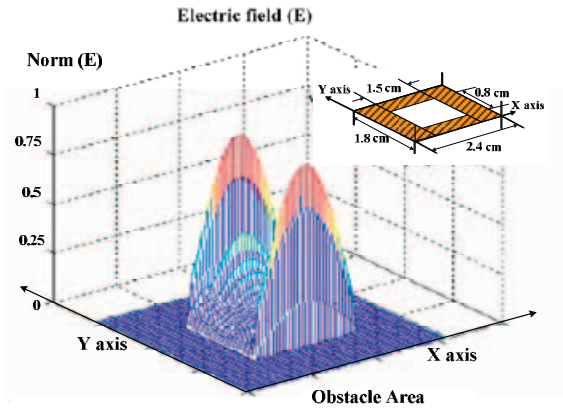


รูปที่ 21 แสดงค่ารีแอคแตนซ์ของวงจรร่องแคบเรโซแนนซ์

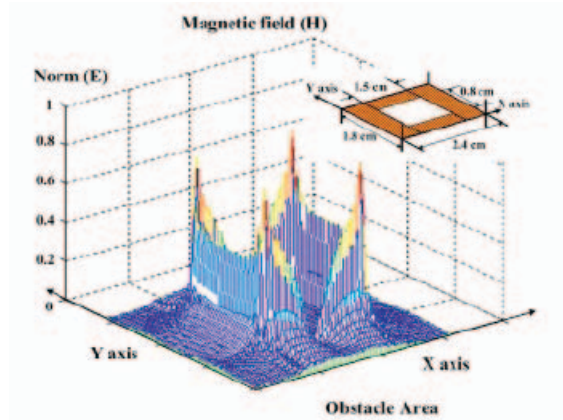
Frequency) เท่ากับ 13.14 GHz ความถี่คัตออฟด้านบน (Upper Frequency) เท่ากับ 16.12 GHz และความถี่กลางที่ 14.63 GHz มีความกว้างของแบนด์วิธเท่ากับ 2.98 GHz จากการเปรียบเทียบผลการจำลองกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ CST Microwave Studio® จะให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องกัน โดยค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทั้งสองโปรแกรมมีค่าประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 21 ค่ารีแอคแตนซ์และของวงจรร่องแคบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อขนานกันด้วยโปรแกรม WCD โดยกำหนดค่าความกว้างของวงจรร่องแคบ $d/a = 0.375$ ที่ความถี่ตั้งแต่ 10-18 GHz ผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกันกับค่าทางทฤษฎี

รูปที่ 22 แสดงค่าสนามไฟฟ้าของวงจรร่องแคบ



รูปที่ 22 รูปคลื่นสนามไฟฟ้าบนวงจรร่องแคบ



รูปที่ 23 รูปคลื่นของสนามแม่เหล็กในช่องแคบ

สีเหลือง (Resonant) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่ามากที่สุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นตัวนำด้านในและบริเวณช่องว่างทางด้านบนของท่อนำคลื่น และบริเวณพื้นผิวแผ่นตัวนำของวงจรร่องแคบจะไม่ปรากฏค่าของสนามไฟฟ้าใดๆ ทั้งสิ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 23 แสดงค่าสนามแม่เหล็กของวงจรร่องแคบสีเหลือง (Resonant) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่ามากที่สุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นตัวนำด้านในและบริเวณช่องว่างทางด้านบนของท่อนำคลื่น และบริเวณพื้นผิวแผ่นตัวนำของวงจรร่องแคบจะมีค่าของสนามแม่เหล็กปรากฏอยู่ในปริมาณที่น้อยมากๆ ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

5. สรุป

บทความนี้เป็นกรณีศึกษาการวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโดยใช้วงจรช่องแคบที่มีโครงสร้างในลักษณะต่างๆ โดยการจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีการวนรอบของคลื่น เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นโปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า WCD V.1.03 ที่พัฒนาขึ้นและทำงานภายใต้ GUI (Graphic User Interface) ของโปรแกรม MATLAB® ซึ่งผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบต่างๆ มีความถูกต้องและสอดคล้องกับผลที่ได้จากโปรแกรมของ CST Microwave Studio® โดยมีค่าของความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้แล้วโปรแกรมจำลองนี้สามารถแสดงรูปคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในวงจรช่องแคบได้อย่างถูกต้องและอย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทางสาขาวิชาครุศาสตร์ อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย และโปรแกรมจำลอง CST Microwave Studio® สำหรับใช้ในการทดสอบชิ้นงานที่ออกแบบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Soto, Tari, x, E. n, V. E. Boria, C. Vicente, J. Gil, and B. Gimeno, "Accurate Synthesis and Design of Wideband and Inhomogeneous Inductive Waveguide Filters," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 2220-2230.
- [2] H. Guo-Shu and C. Chun Hsiung, "Nonuniformly Folded Waveguide Resonators and Their Filter Applications," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, vol. 20, pp. 136-138.
- [3] P.-O. Persson and O. Runborg, "Simulation of a Waveguide Filter Using Wavelet-Based Numerical Homogenization," *Journal of Computational Physics*, vol. 166, pp. 361-382, 2001.
- [4] Vijay Kumar Chaudhary, Prakash Verma, Uma Balaji., "Field Theory Based CAD of Inductive Iris Waveguide Filter," *APMC2001*, Taipei, Taiwan, R.O.C., 2001.
- [5] A. Mediavilla, A. Tazón, J. A. Pereda, et al., "Neuronal Architecture for Waveguide Inductive Iris Bandpass Filter Optimization," *IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'00)*, vol. 4, 2000.
- [6] T. Hiraoka, C. P. Chen, T. Anada, J. P. Hsu, Z. W. Ma, and C. C. Christopoulos, "Electric Field Distributions in Microwave Planar Circuits by Small Coaxial Probe and Comparison with FDTD Method," *2005 European Microwave Conference*, vol. 2, 4-6 October 2005.
- [7] J. W. Bandler, A. S. Mohamed, and M. H. Bakr, "TLM-Based Modeling and Design Exploiting Space Mapping," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* vol. 53, September 2005.
- [8] Seunghyun Song, Hyeon-Seok Kim, Hyun-Kyo Jung; J. Braunstein, and Un-Chul Moon, "Frequency Domain Analysis of Microstrip Filters and Antennae using an Adaptive Frequency Sampling Moment Method," *Magnetic IEEE Transactions on* vol. 42, pp. 607-610, April 2006.
- [9] Guided Wave Technology (GWT), [Online] Microwave Filter Analysis and Design, 2004. Available: <http://www.guidewavetech.com>
- [10] H. Baudrand, *Introduction au Calcul de Circuits Micro-Ondes*, Toulouse, France, 1993.
- [11] S. Akatimagool, D. Bajon, and H. Baudrand, "Analysis of multi-layer integrated inductors with wave concept iterative procedure (WCIP)," in *Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International*, vol. 3, pp. 1941-1944, 2001.
- [12] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, Short Run Press Ltd., London, UK, 1986.