

การวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปโดยใช้อิมพีแดนซ์แบบขั้น และการคัปปลิงแบบขนานปลายเปิดด้วยวิธีการวนรอบของคลื่น

Analysis of Microstrip Low Pass Filter Using Step-impedance and Open Ended Parallel Coupling with Wave Iterative Method

สมมารท ขำเกลี้ยง^{1*} และ สมศักดิ์ อรรถทิมากุล²
Sommart Khamkleang^{1*} and Somsak Akatimagoon²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปที่มีโครงสร้างเป็นอิมพีแดนซ์แบบขั้นและใช้การคัปปลิงแบบขนานปลายเปิดที่ให้อ่านแถบหยุดกว้าง โดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่น ที่มีการคำนวณขนาดของคลื่นที่ตกกระทบและสะท้อนกลับในสองโดเมนคือโดเมนทางสเปคตรัม สำหรับคลื่นที่ปรากฏในชั้นของไดอิเล็กตริก และโดเมนทอพอจิกเซล สำหรับคลื่นที่ปรากฏบนผิวของวงจร การเชื่อมโยงระหว่างคลื่นทั้งสองโดเมนนี้จะอาศัยตัวแปลงทางโหมดความเร็วสูง ซึ่งอาศัยหลักการของการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ผลการวิจัยพบว่าวิธีการวนรอบของคลื่นที่นำเสนอสามารถวิเคราะห์ค่าขนาดของสนามไฟฟ้าแลสนามแม่เหล็ก ค่าพารามิเตอร์การจัดกระจายมีความสอดคล้องกับโปรแกรม Sonnet Lite เวอร์ชัน 12.53 โดยที่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่นำเสนอให้อ่านแถบหยุดกว้าง ขนาดเล็ก และต้นทุนในการผลิตต่ำ

คำสำคัญ: วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริป วิธีการวนรอบของคลื่น อิมพีแดนซ์แบบขั้น คัปปลิงแบบปลายเปิด

Abstract

This research presents an analysis of low pass filter circuit via microstrip with step-impedance structure, using open ended parallel coupling and wave iterative method (WIM) that yields wide stop band. Within this method, a calculation of reflected wave amplitudes was made in two domains; spectrum domain for the waves that appeared in the di-electric, and pixel domain for those in the circuit surface. The high speed mode transformer was used to connect the waves in those two domains, basing on FastFourier Transform (FFT). It was found that the presented WIM could calculate the size of electric and magnetic field as well as the scattering parameter. The findings well accorded with the SONNET Lite version 12.53 program. The microstrip low pass filter circuit was small in size and has a wide stop band. Moreover, its production cost was low.

Keywords: Microstrip Low Pass Filter, Wave Iterative Method, Step Impedance, Open Ended Parallel Coupling

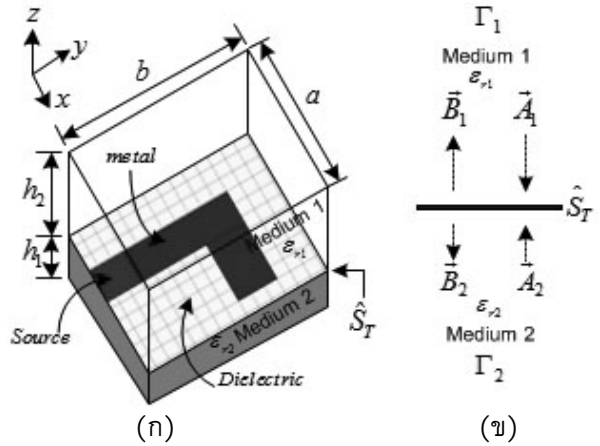
¹ อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาลัยรัตภูมิ

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* Corresponding Author, Tel 08-6822-4060, E-Mail: sommart.k@rmutsv.ac.th

1. บทนำ

วงจรรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปส่วนใหญ่มีการพัฒนาและปรับปรุงให้วงจรมีขนาดเล็ก ดังงานวิจัย [1]-[3] ที่ให้สมรรถนะคงเดิมหรือดีขึ้นกว่าเดิม โดยที่การออกแบบวงจรจะมีวิธีการที่แตกต่างกันไป วิธีการออกแบบวงจรต่างๆ สามารถค้นหาได้จากทฤษฎี [4] และงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ต่างๆ [5]-[7] ผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้วิธีที่ง่ายและเหมาะสมกับการออกแบบวงจรตามที่ต้องการ แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปคือ ความกว้างของความถี่แถบหยุดค่อนข้างแคบทำให้เกิดสัญญาณการรบกวนที่ความถี่สูงๆ วงจรมีขนาดใหญ่ และมีต้นทุนการผลิตสูง ดังนั้นการสร้างวงจรจริงผู้ออกแบบจำเป็นต้องมีโปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบวงจรที่มีประสิทธิภาพ เช่น โปรแกรม Sonnet, Cadence, Zeland's IE3D และ ADS (Advanced Design System) เพื่อออกแบบและทดสอบสมรรถนะของวงจร แต่โปรแกรมที่กล่าวมานั้นมีราคาสูงมาก จึงได้มีกลุ่มนักวิจัย [8]-[11] ทำการคิดค้น พัฒนา และออกแบบวิธีการคำนวณแบบใหม่ เพื่อลดต้นทุนในการจัดซื้อโปรแกรม โดยเรียกวิธีการคำนวณนี้ว่าวิธีการวนรอบของคลื่น (Wave Iterative Method) ที่ใช้หลักการของการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับวิธีการคำนวณแบบวนรอบ มาพัฒนาเป็นโปรแกรมการออกแบบวงจรรีโซแนนซ์ไมโครเวฟหรือเรียกว่าโปรแกรม MPD2008 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะแก้ปัญหาการออกแบบวงจรรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปที่กล่าวมาข้างต้น ให้วงจรมีขนาดเล็ก มีย่านความถี่แถบหยุดกว้าง และมีต้นทุนในการออกแบบและสร้างต่ำ โดยการออกแบบจะใช้หลักการของสเต็ปอิมพีแดนซ์และการคับปลิงแบบขนานปลายเปิดที่สามารถออกแบบวงจรได้ง่าย มีทฤษฎีการออกแบบไม่ซับซ้อนที่ใช้วิธีการวนรอบของคลื่นโดยทำงานภายใต้โปรแกรม MPD2008 สำหรับช่วยวิเคราะห์ผลตอบสนองของวงจรที่ออกแบบก่อนนำไปสร้างจริง



รูปที่ 1 (ก) โครงสร้างของวงจรรีโซแนนซ์ที่อยู่ที่ภายในกล่องตัวนำ และ (ข) คลื่นตกกระทบ $\vec{A}_{1,2}$ และคลื่นสะท้อนกลับ $\vec{B}_{1,2}$ ในกล่องตัวนำ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การวิเคราะห์วงจรรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการวนรอบของคลื่น (Wave Iterative Method) ที่ประกอบด้วยคลื่นตกกระทบ $\vec{A}_{1,2}$ และคลื่นสะท้อนกลับ $\vec{B}_{1,2}$ บนโครงสร้างของวงจรรีโซแนนซ์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ \hat{S}_T ที่อยู่ในกล่องตัวนำ และมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ฝาทั้งสองเท่ากับ $\hat{\Gamma}_{1,2}$ แสดงดังรูปที่ 1

กำหนดให้พื้นที่ใดๆ ที่มีคลื่นเคลื่อนที่ผ่านแสดงดังรูปที่ 1 และอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับดังสมการที่ (1) สามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้า \vec{E}_i และสนามแม่เหล็ก \vec{H}_i ในแนวสัมผัสผิวส่วนโค้งของรอยต่อระหว่าง 2 ตัวกลาง ดังสมการที่ (2)

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

$$\vec{B}_i = \frac{1}{2\sqrt{Z_{oi}}} (\vec{E}_i - Z_{oi}\vec{H}_i)$$

$$\vec{E}_i = \sqrt{Z_{oi}} (\vec{A}_i + \vec{B}_i) \quad (2)$$

$$\vec{H}_i = \frac{1}{\sqrt{Z_{oi}}} (\vec{A}_i - \vec{B}_i)$$

เมื่อ i คือตัวกลางที่ 1 และ 2
 Z_0 คืออิมพีแดนซ์ของคลื่น

2.2 กระบวนการวนรอบของคลื่น

กระบวนการวนรอบ เป็นพื้นฐานในการคำนวณค่าซ้ำๆ ในแต่ละรอบของสมการสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตกกระทบ และสะท้อนกลับ บนพื้นผิวของวงจรรวมที่ประกอบไปด้วย พื้นผิวของตัวนำ (Metal) ไดอิเล็กทริก (Dielectric) และแหล่งกำเนิด (Source) ที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ และอยู่ภายในกล่องตัวนำมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ฝากลองทั้งสองเท่ากัน สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3)

$$\begin{cases} \vec{A} = \hat{\Gamma}_i \times \vec{B} \\ \vec{B} = \hat{S}_T \times \vec{A} \end{cases} \quad (3)$$

การวิเคราะห์สมการเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับบนพื้นผิวของวงจรรวม \hat{S}_T ในโดเมนพิกเซล (Pixel Domain) จะอาศัยหลักการเงื่อนไขขอบเขต (Boundary) ของตัวกลางสองชนิดที่แตกต่างกันของรอยต่อที่เป็นไดอิเล็กทริก ตัวนำ และแหล่งกำเนิด ดังนี้

$$\hat{S}_T = \begin{bmatrix} aH_I - H_M + cH_S & bH_I + dH_S \\ bH_I + dH_S & aH_I - H_M + cH_S \end{bmatrix} \quad (4)$$

เมื่อ $a = \frac{1-N^2}{1+N^2}$, $b = \frac{2N}{1+N^2}$, $c = \frac{-1+N_1-N_2}{1+N_1+N_2}$, และ $d = \frac{Z_0}{\sqrt{Z_{01}Z_{02}}}$ เมื่อ Z_{01} คืออิมพีแดนซ์ของคลื่นในตัวกลางที่ 1 Z_{02} คืออิมพีแดนซ์ของคลื่นในตัวกลางที่ 2 และ H_I, H_M, H_S มีค่าเท่ากับ 1 เป็นตัวชี้พื้นที่ขอบเขตบนระนาบของวงจรรวม ที่ประกอบด้วยส่วนของไดอิเล็กทริก

ตัวนำ และแหล่งกำเนิด ตามลำดับ โดยที่ $N = \sqrt{\frac{Z_{01}}{Z_{02}}}$,

$N_1 = Z_0/Z_{01}$ และ $N_2 = Z_0/\sqrt{Z_{01}Z_{02}}$ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $\hat{\Gamma}_i$ (Mode Domain) เป็นการแพร่กระจายคลื่น

(Wave Propagation) ที่ฝากลองทั้งสอง ด้านที่ประกอบด้วยคลื่นตกกระทบ $\vec{B}_{1,2}$ กับคลื่นสะท้อนกลับ $\vec{A}_{1,2}$ ดังสมการที่ (5)

$$\hat{\Gamma}_i = \sum_{m,n,\alpha} |f_{mn}^{\alpha} > \Gamma_{mn}^{\alpha,i} < f_{mn}^{\alpha}| \quad (5)$$

เมื่อ $\Gamma_{mn}^{\alpha,i} = \frac{1-Z_{0i}Y_{mn}^{\alpha,i}}{1+Z_{0i}Y_{mn}^{\alpha,i}}$, α คือโหมด TE และ TM, f_{mn}^{α} คือโหมดฟังก์ชันในเทอมของสนาม TE และ TM และ $Y_{mn}^{\alpha,i}$ แอดมิตแตนซ์ของแต่ละโหมด

การแปลงสภาพระหว่างขอบเขตทางพิกเซลและโหมด (Pixel and Mode Domain) ทำได้โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) โดยมีหลักการพื้นฐาน [11] แสดงดังสมการที่ (6) และ (7)

$$\text{FMT} : \vec{E}_i \Rightarrow \begin{matrix} \text{Pixel domain} \\ \left\{ \begin{matrix} E_x \\ E_y \end{matrix} \right\} \end{matrix} \Rightarrow \text{FFT} \Rightarrow \begin{matrix} \text{Mode domain} \\ \left\{ \begin{matrix} E_{x_{mn}} \\ E_{y_{mn}} \end{matrix} \right\} \end{matrix} P \Rightarrow \begin{matrix} \left\{ \begin{matrix} E_{mn}^{TE} \\ E_{mn}^{TM} \end{matrix} \right\} \end{matrix} \quad (6)$$

$$: \vec{H}_i \Rightarrow \begin{matrix} \left\{ \begin{matrix} H_x \\ H_y \end{matrix} \right\} \end{matrix} \Rightarrow \text{FFT} \Rightarrow \begin{matrix} \left\{ \begin{matrix} H_{x_{mn}} \\ H_{y_{mn}} \end{matrix} \right\} \end{matrix} P \Rightarrow \begin{matrix} \left\{ \begin{matrix} H_{mn}^{TE} \\ H_{mn}^{TM} \end{matrix} \right\} \end{matrix}$$

$$\text{FMT}^{-1} : \vec{E}_i \Leftarrow \begin{matrix} \text{Pixel domain} \\ \left\{ \begin{matrix} E_x \\ E_y \end{matrix} \right\} \end{matrix} \Leftarrow \text{FFT}^{-1} \Leftarrow \begin{matrix} \text{Mode domain} \\ \left\{ \begin{matrix} E_{x_{mn}} \\ E_{y_{mn}} \end{matrix} \right\} \end{matrix} Q \Leftarrow \begin{matrix} \left\{ \begin{matrix} E_{mn}^{TE} \\ E_{mn}^{TM} \end{matrix} \right\} \end{matrix} \quad (7)$$

$$: \vec{H}_i \Leftarrow \begin{matrix} \left\{ \begin{matrix} H_x \\ H_y \end{matrix} \right\} \end{matrix} \Leftarrow \text{FFT}^{-1} \Leftarrow \begin{matrix} \left\{ \begin{matrix} H_{x_{mn}} \\ H_{y_{mn}} \end{matrix} \right\} \end{matrix} Q \Leftarrow \begin{matrix} \left\{ \begin{matrix} H_{mn}^{TE} \\ H_{mn}^{TM} \end{matrix} \right\} \end{matrix}$$

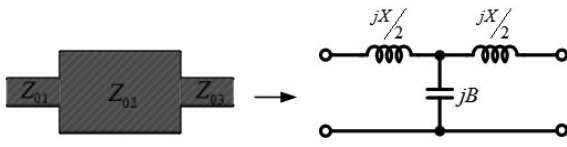
$$P = j \frac{e^{2j\pi m} \cdot e^{2j\pi n}}{4} \text{ และ } Q = \frac{e^{2j\pi x} \cdot e^{2j\pi y}}{4j}$$

เมื่อ m และ n คือจำนวนโหมด x และ y คือขนาดพื้นที่ของวงจรรวม

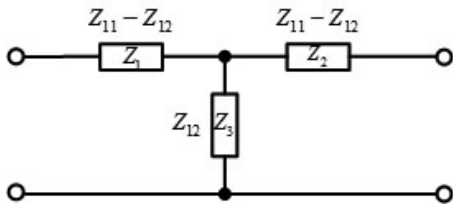
การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์อินพุต (Z_{in}) ทุกๆ รอบของคลื่นที่มีการกระทำข้ามพื้นผิวของวงจรรวม สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Z_{in}^k = \frac{1}{Y_{in}^k} = \sum \left(\frac{(E_{x,y})_i^k}{(H_{x,y})_i^k} \right) \quad (8)$$

เมื่อ k คือจำนวนรอบของการคำนวณ และ i คือผนังด้านบนและด้านล่าง



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของวงจรอิมพีแดนซ์แบบขั้น



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของโครงข่ายรูปที

2.3 วงจรกรองความถี่แบบสแต็ปอิมพีแดนซ์ [4]

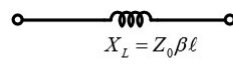
วงจรกรองที่ใช้สายนำสัญญาณแบบไม่โครสตริปที่มีลักษณะเป็นขั้น จะมีค่าของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities Characteristic Impedance) ซึ่งจะเรียกว่าวงจรกรองอิมพีแดนซ์แบบขั้น (Step-Impedance Filter) ดังแสดงในรูปที่ 2 และวงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 3 เมื่อ Z_{11} คืออิมพีแดนซ์ทางอินพุต (Impedance Input) Z_{12} คืออิมพีแดนซ์ถ่ายโอนย้อนกลับ (Revers Transfer Impedance)

การหาค่าโดยประมาณของวงจรสมมูลของสายนำสัญญาณในรูปที่ 3 ถ้าค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ค่าความกว้างของสายนำสัญญาณจะมีขนาดใหญ่ และถ้าค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าสูง ความกว้างของสายนำสัญญาณจะมีขนาดเล็ก ตามคุณสมบัติสายนำสัญญาณแบบไม่โครสตริป จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3 จะมีลักษณะเหมือนโครงข่ายรูปที (T-Network) ดังนั้นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์จากความสัมพันธ์ของ ABCD พารามิเตอร์ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (9) และ (10)

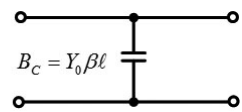
$$Z_{11} = Z_{22} = \frac{A}{C} = -jZ_0 \cot \beta\ell \quad (9)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = \frac{1}{C} = -jZ_0 \csc \beta\ell \quad (10)$$

ส่วนประกอบของอิมพีแดนซ์ Z_1 ของวงจรสมมูลรูปที (T-Equivalent Circuit) หาได้ดังสมการที่ (11)



(ก) ค่า Z_0 มีค่าสูง



(ข) ค่า Z_0 มีค่าต่ำ

รูปที่ 4 วงจรสมมูลของวงจรเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นเมื่อ $\beta\ell$ มีค่าต่ำ

$$Z_1 = Z_{11} - Z_{12} = -jZ_0 \frac{\cos \beta\ell - 1}{\sin \beta\ell} = -jZ_0 \tan\left(\frac{\beta\ell}{2}\right) \quad (11)$$

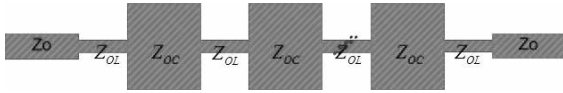
สำหรับส่วนประกอบของอิมพีแดนซ์ Z_3 ของวงจรสมมูลโครงข่ายรูปทีที่มีค่าเท่ากับ Z_{12} ดังนั้นถ้าค่าของเฟส $\beta\ell < \pi/2$ ส่วนประกอบของอิมพีแดนซ์ Z_1 จะมีค่ารีแอคแตนซ์เป็นบวก (แสดงผลเป็นตัวเหนี่ยวนำ) ขณะที่ส่วนประกอบของอิมพีแดนซ์ Z_3 จะมีค่ารีแอคแตนซ์เป็นลบ (แสดงผลเป็นตัวเก็บประจุ) ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรในรูปที่ 2 สามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (12)

$$\frac{X}{Z_0} = \tan\left(\frac{\beta\ell}{2}\right) \quad \text{และ} \quad B = \frac{1}{Z_0} \sin \beta\ell \quad (12)$$

ถ้าสมมติว่าความยาวของสายนำสัญญาณมีขนาดสั้นลงโดยที่ $\beta\ell < \pi/4$ และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าสูง ซึ่งจะแสดงลักษณะเป็นวงจรสมมูลในรูปที่ 4(ก) (ตัวเหนี่ยวนำต่อแบบอนุกรม) ดังนั้นสมการที่ (12) จะประมาณได้ว่าค่าของขั้วเซบแตนต์ซ์ของ $B = 0$

ถ้าความยาว ℓ ของสายนำสัญญาณมีขนาดยาวขึ้น และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าต่ำ ซึ่งจะแสดงลักษณะเป็นวงจรสมมูลในรูปที่ 4 (ข) (ตัวเก็บประจุแบบขนาน) ดังนั้นสมการที่ (12) จะประมาณค่าได้เท่ากับ $X = 0$ และค่าของ $B = Y_0\beta\ell$

การออกแบบวงจรกรองอิมพีแดนซ์แบบขั้น โดยกำหนดคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ต้องการตามตารางต้นแบบ [4] โดยวงจรกรองความถี่ต้นแบบมีความถี่คัทออฟ (Ω_c) ที่ 1 เรเดียนต่อวินาที ซึ่งสัมพันธ์กับค่าเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในตารางต้นแบบความถี่ดังกล่าวเป็นความถี่ต่ำซึ่งในสภาพความเป็นจริง



รูปที่ 5 วงจรกรองสัญญาณที่มีโครงสร้างแบบอิมพีแดนซ์แบบขั้น

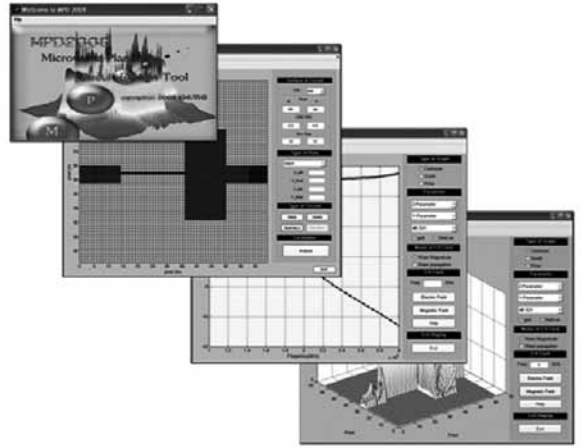
มีความจำเป็นต้องออกแบบใช้งานให้ได้ตามความถี่ที่ต้องการ เช่น ความถี่อาจจะอยู่ในหน่วยกิโลเฮิร์ตซ์ (KHz) เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) หรืออาจจะเป็น กิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) ดังนั้นการปรับค่าสเกลความถี่ (Frequency Scaling) ไปยังความถี่ที่ต้องการจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนั้นแล้ว การปรับค่าสเกลอิมพีแดนซ์ (Impedance Scaling) จะมีความสำคัญเช่นกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าว เมื่อพิจารณาที่อิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด อิมพีแดนซ์ของโหลดและความถี่ใช้งาน สามารถคำนวณค่าอุปกรณ์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$L = \left(\frac{Z_0}{g_0}\right) \left(\frac{\Omega_c}{2\pi f_c}\right) g_1, \quad C = \left(\frac{g_0}{Z_0}\right) \left(\frac{\Omega_c}{2\pi f_c}\right) g_2 \quad (13)$$

การคำนวณหาค่าความยาว (\$\ell\$) ของสายนำสัญญาณไมโครสตรูปอิมพีแดนซ์แบบขั้นโดยมีองค์ประกอบของตัวเหนี่ยวนำ (L) มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเป็น \$Z_{OC}\$ และตัวเก็บประจุ (C) มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเป็น ดังรูปที่ 5 จะต้องคำนวณหาอิมพีแดนซ์ คุณสมบัติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (\$\epsilon_r\$) ค่าความยาวคลื่นของสตรูป (\$\lambda_g\$) ค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (Propagation Constant, \$\gamma\$) และค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity, \$v_p\$) ซึ่งต้องเลือกค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะให้อยู่ในเงื่อนไข \$Z_{OC} < Z_0 < Z_{OL}\$ เมื่อ \$Z_0\$ คือค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นซึ่งมีค่า 50 โอห์ม จากนั้นคำนวณหาค่าความยาว (\$\ell\$) ได้ดังสมการที่ (14)

$$\ell_L = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\omega_c L}{Z_{OL}} \right), \quad \ell_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \sin^{-1} \omega_c C Z_{OC} \quad (14)$$

จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้นำทฤษฎีดังกล่าวมาออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้อิมพีแดนซ์แบบขั้นและใช้การคัปปลิงแบบขนานปลายเปิด และนำทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับวิธีการวนรอบของคลื่น



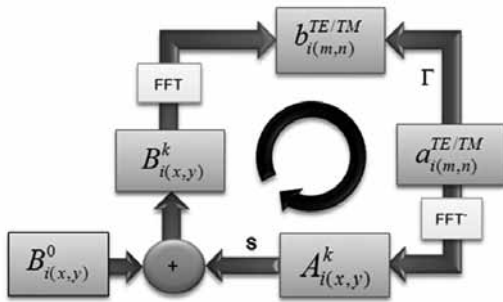
รูปที่ 6 โปรแกรมออกแบบวงจรคลื่นระนาบไมโครเวฟ (Microwave Planar Circuit Design Program)

มาพัฒนาเป็นโปรแกรมการออกแบบวงจรคลื่นระนาบไมโครเวฟ เพื่อวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่ไมโครเวฟต่อไป

3. เครื่องมือการจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่ในบทความนี้ ได้พัฒนาวิธีการจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาสร้างโปรแกรมการคำนวณที่เรียกว่า Microwave Planar Design (MPD2008) [7] แสดงดังรูปที่ 6 ที่สามารถติดต่อกับผู้ใช้งานโดยใช้รูปแบบของ Graphic User Interface (GUI) ภายใต้โปรแกรม MATLAB® โดยมีหน้าต่างเมนูหลัก ประกอบด้วยปุ่มเชื่อมต่อไปยังส่วนการออกแบบวงจร (Design) ส่วนการแสดงผลการผล (Display) และคู่มือการใช้งาน (Manuals)

การทำงานของโปรแกรม MPD 2008 แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนรับข้อมูล ส่วนประมวลผล และส่วนแสดงผล โดยการทำงานของโปรแกรมจะเริ่มต้นจากการออกแบบ และกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับวงจร หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณโดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่น โดยมีขั้นตอนแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเริ่มต้นจากการกำหนดค่าของแหล่งกำเนิด (\$B_{i(x,y)}^0\$) ให้กับวงจรตัวนำ กระบวนการจะคำนวณค่าของคลื่นในสองโดเมน ได้แก่ โดเมนทาง



รูปที่ 7 กระบวนการของการคำนวณโดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่น

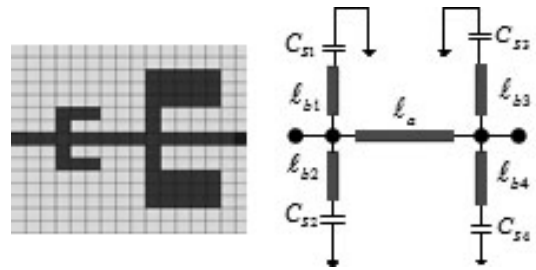
พิกเซล (Pixels) ซึ่งเป็นการคำนวณหาขนาดของคลื่นที่ตกกระทบ ($A_{i(x,y)}^k$) และที่สะท้อนออกมาจากพื้นที่ของวงจร ($B_{i(x,y)}^k$) และโดเมนทางโหมด ซึ่งขั้นตอนการแปลงสภาพระหว่างทั้งสองโดเมนนี้ จะอาศัยหลักการของการแปลงสภาพฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอย่างรวดเร็ว ซึ่งกระบวนการของการวนรอบของการคำนวณจะสิ้นสุดเมื่อค่าของคลื่นที่ตกกระทบ หรือสะท้อนมีค่าลู่อู่เข้าสู่ศูนย์ (Convergence) และสามารถคำนวณหาค่าของอิมพีแดนซ์ของวงจรตัวนำได้ดังสมการที่ (15)

$$Z = \frac{1}{Y} = \sum_{x,y} \left(\frac{E_{,y}}{H_{,y}} \right) \quad (15)$$

และสมการความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์แบบการกระจาย (S-parameter) กับพารามิเตอร์ของอิมพีแดนซ์ (Z-parameter) แสดงดังสมการที่ (16)

$$[S] = [Z - I][Z + I]^{-1} \quad (16)$$

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการคำนวณ สามารถเลือกรูปแบบการแสดงผล ประกอบด้วยค่าของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่ปรากฏในชั้นของวงจรตัวนำ ที่สามารถเลือกค่าความถี่การแสดงผลได้ตามต้องการ และค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ค่าแอดมิตแตนซ์ (Y) หรือค่าสแกตเตอร์ริง (S) หรือแสดงผลลัพท์ในรูปแบบของสมิธชาร์ท หรือถ้าผู้ใช้ต้องการแก้ไขวงจรตัวนำ หรือเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้นของวงจรจะสามารถกระทำได้ตามความต้องการ



รูปที่ 8 โครงสร้างของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปและวงจรเทียบเคียง

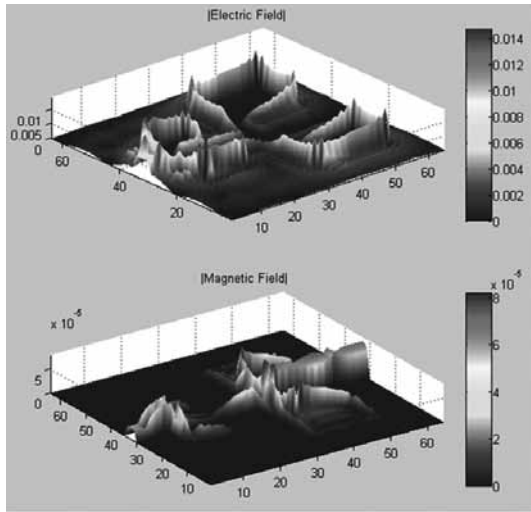
4. การวิเคราะห์ห้วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

4.1 วงจรรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปโดยใช้อิมพีแดนซ์แบบชั้น

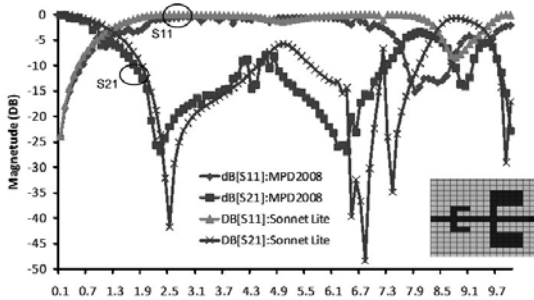
การออกแบบวงจรรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปโดยใช้อิมพีแดนซ์แบบชั้น จะใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 ที่มีค่า ϵ_r เท่ากับ 4.6 ความหนาของชั้นฐานรองเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร โดยใช้โปรแกรม MPD2008 เพื่อหาค่าขนาดของวงจรที่เหมาะสมที่สุด โดยที่โครงสร้างของวงจรแสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 32x32 ตารางมิลลิเมตร ประกอบด้วยสายส่ง ℓ_a มีความกว้างเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ยาว 32 มิลลิเมตร ℓ_{b1} เท่ากับ ℓ_{b2} มีความกว้างเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ยาว 2 มิลลิเมตร C_{S1} เท่ากับ C_{S2} มีความกว้างเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ยาว 4 มิลลิเมตร และ C_{S3} เท่ากับ C_{S4} มีความกว้างเท่ากับ 6 มิลลิเมตร และความยาว 10 มิลลิเมตร

รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างผลของการจำลองสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าบนวงจรรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปที่ความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ จะสังเกตได้ว่าขนาดของสนามแม่เหล็กจะมีค่าปรากฏบนพื้นผิวของตัวนำเท่านั้นและจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าความยาวที่เปลี่ยนไป และขนาดของสนามไฟฟ้าจะมีค่าปรากฏบนพื้นผิวของฉนวน โดยที่สนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่บริเวณขอบรอยต่อของตัวนำกับฉนวน ซึ่งมีความสอดคล้องตามทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า [4]

รูปที่ 10 เป็นการเปรียบเทียบค่าขนาดของพารามิเตอร์เอสได้แก่ ขนาดของการสูญเสียย้อนกลับ dB(S11)

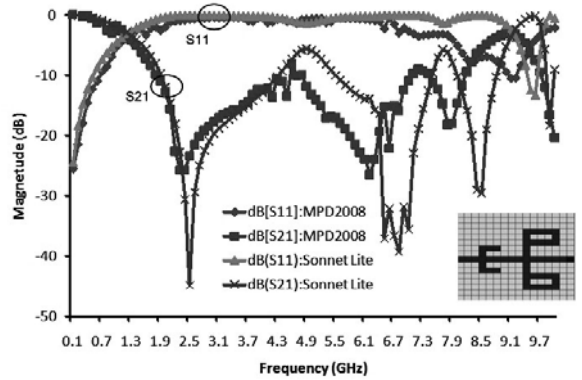


รูปที่ 9 ผลการจำลองขนาดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ ของโปรแกรม MPD2008



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์การจัดกระจายของวงจรความถี่ต่ำผ่าน ด้วยโปรแกรม MPD2008 กับ Sonnet Lite เวอร์ชัน 12.53

และขนาดของการสูญเสียแทรกสอด dB(S21) ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 10 กิกะเฮิรตซ์ ระหว่างโปรแกรม MPD2008 กับโปรแกรม Sonnet Lite เวอร์ชัน 12.53 โดยที่ MPD2008 มีผลการคำนวณให้ค่าความถี่ตัดที่ความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์ และมีความกว้างในช่วงแถบหยุดมีค่าเท่ากับ 6.5 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสอดคล้องกับโปรแกรม Sonnet Lite ที่มีผลการคำนวณให้ค่าความถี่ตัดที่ความถี่ 1.2 กิกะเฮิรตซ์ และมีความกว้างในช่วงแถบหยุดมีค่าเท่ากับ 7.3 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งผลการเปรียบเทียบเป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพ



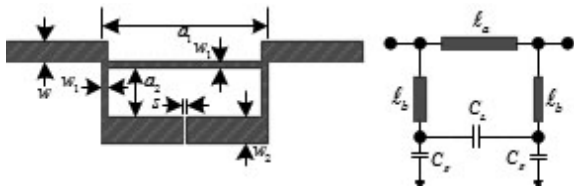
รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์การจัดกระจายของวงจรความถี่ต่ำผ่านที่ปรับปรุงด้วยโปรแกรม MPD2008 เปรียบเทียบกับ Sonnet Lite เวอร์ชัน 12.53

ของโปรแกรม MPD2008 ที่ให้ค่าสอดคล้องกันทุกย่านความถี่

รูปที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์การจัดกระจายของวงจรความถี่ต่ำผ่านที่ปรับปรุงค่าของ C_{S3} และ C_{S4} ที่ใช้เป็นตัววงจรเรโซเนเตอร์ลูปปิด (Close Loop Resonator) ผลการเปรียบเทียบค่าขนาดของพารามิเตอร์เอสได้แก่ dB(S11) และ dB(S21) ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 10 กิกะเฮิรตซ์ ระหว่างโปรแกรม MPD2008 กับโปรแกรม Sonnet Lite เวอร์ชัน 12.53 โดยที่ MPD2008 มีผลการคำนวณให้ค่าความถี่ตัดที่ความถี่ 1.2 กิกะเฮิรตซ์ และมีความกว้างในช่วงแถบหยุดมีค่าเท่ากับ 7.1 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสอดคล้องกับโปรแกรม Sonnet Lite ที่มีผลการคำนวณให้ค่าความถี่ตัดที่ความถี่ 1.2 กิกะเฮิรตซ์ และมีความกว้างในช่วงแถบหยุดมีค่าเท่ากับ 7.9 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวงจรความถี่ต่ำผ่านที่มีการปรับปรุงวงจรสามารถทำให้อ่านความถี่แถบหยุดกว้างขึ้นมากกว่าเดิมประมาณ 0.6 กิกะเฮิรตซ์

4.2 วงจรความถี่ต่ำผ่านกับการคัปปลิงปลายเปิด

การออกแบบเบื้องต้นของวงจรความถี่ต่ำผ่านโดยใช้การคัปปลิงปลายเปิด [12] ซึ่งประกอบด้วย



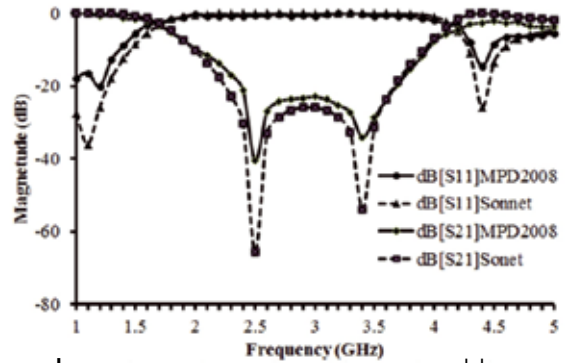
รูปที่ 12 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านกับการคัปปลิงปลายเปิดและวงจรถียบเคียง

1 ลูป (Loop) กับ 2 สายกระตุ่น (Feed Line) แสดงดังรูปที่ 12 จากวงจรถียบเคียงประกอบด้วยสายส่งไมโครสตริป l_a และ l_b ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ คุณลักษณะสูงและมีความกว้างเท่ากับ a_1 และ a_2 ตามลำดับ ค่าความจุ C_L คือภาวะของวงจรที่ได้จากผลของการเชื่อมต่อแบบปลายปิดระหว่างสายไมโครสตริป C_p คือค่าความจุระหว่างสายไมโครสตริปแบบปลายปิดกับกราวด์ ทำการจำลองวงจรโดยไฮโปรแกรม Sonnet Lite เวอร์ชัน 12.53 และวงจรจะถูกออกแบบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) เท่ากับ 9.6 และมีค่าความหนาเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร โดยที่ขนาดของ a_1 มีค่าเท่ากับ 12 มิลลิเมตร a_2 มีค่าเท่ากับ 2 มิลลิเมตร s มีค่าเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร w_1 มีค่าเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร w_2 มีค่าเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร w มีค่าเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร ที่อิมพีแดนซ์อินพุตและเอาต์พุตของสายส่งไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม

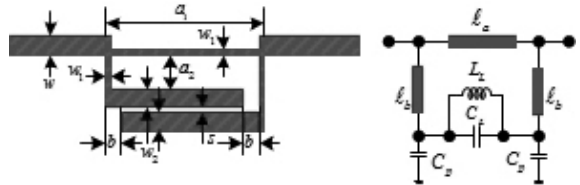
รูปที่ 13 แสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์กระจายกระจายของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านกับการคัปปลิงปลายเปิด ผลปรากฏว่าการจำลองด้วย MPD2008 ให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับ Sonnet Lite เวอร์ชัน 12.53 โดยที่ MPD2008 มีค่าความถี่ตัดที่ 1.65 กิกะเฮิรตซ์ มีช่วงความถี่แถบหยุดเท่ากับ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และ Sonnet Lite มีค่าความถี่ตัดที่ 1.7 กิกะเฮิรตซ์ มีช่วงความถี่แถบหยุดเท่ากับ 2.4 กิกะเฮิรตซ์

4.3 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านกับการคัปปลิงแบบขนาน

การออกแบบเบื้องต้นของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้การคัปปลิงแบบขนานจาก [12] แสดงดังรูปที่ 14 จากวงจรถียบเคียงการคัปปลิงแบบขนานจะนำมาแทนที่

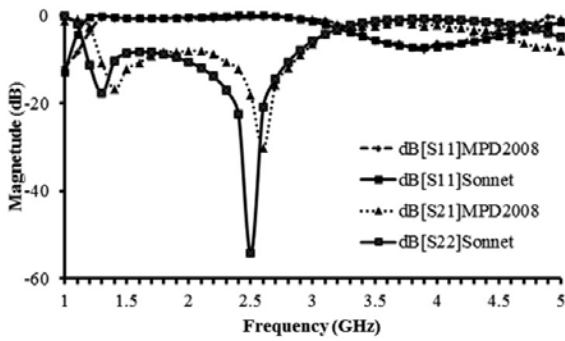


รูปที่ 13 ผลการจำลองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านกับการคัปปลิงปลายเปิด

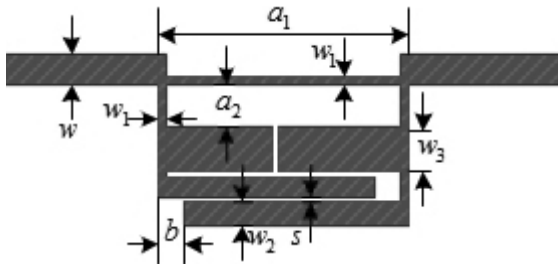


รูปที่ 14 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านกับการคัปปลิงแบบขนาน และวงจรถียบเคียง

การคัปปลิงแบบปลายเปิด ที่แสดงในรูปที่ 12 เพราะการเชื่อมต่อแบบขนานเป็นการรวมกันของการคัปปลิงทางไฟฟ้า (Electric Coupling) และการคัปปลิงทางแม่เหล็ก (Magnetic Coupling) ภาวะของวงจรคือตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวเก็บประจุ โดยที่ขนาดของ มีค่าเท่ากับ 12 มิลลิเมตร a_2 มีค่าเท่ากับ 3.75 มิลลิเมตร b มีค่าเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร s มีค่าเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร w_1 มีค่าเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร w_2 มีค่าเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร และ w มีค่าเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร ที่อิมพีแดนซ์อินพุตและเอาต์พุตของสายไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม รูปที่ 15 แสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์กระจายกระจายของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านกับการคัปปลิงแบบขนาน ผลปรากฏว่าการจำลองด้วย MPD2008 ให้ค่าความถี่ตัดที่ 1.2 กิกะเฮิรตซ์ ให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับ Sonnet Lite เวอร์ชัน 12.53 มีค่าความถี่ตัดที่ 1.15 กิกะเฮิรตซ์ จะเห็นว่าช่วงความถี่แถบหยุดค่อนข้างแคบเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองของวงจรดังรูปที่ 13 แต่ค่าของความถี่ตัดจะมีค่าที่ต่ำกว่าเนื่องมาจากสภาพของ



รูปที่ 15 ผลการจำลองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านกับการคัปปลิงแบบขนาน

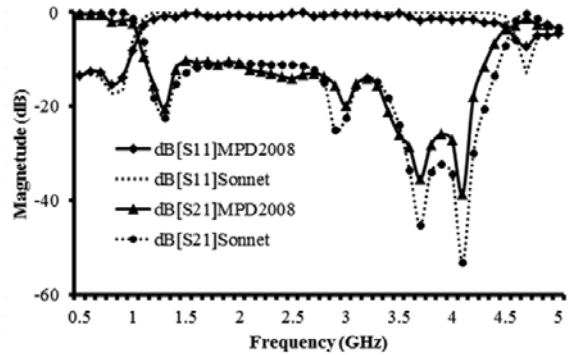


รูปที่ 16 วงจรรองความถี่ต่ำผ่านกับการคัปปลิงปลายเปิดและแบบขนาน

วงจรถ้าให้เกิดค่าความจุ (C_L) ขนานกับค่าความเหนี่ยวนำ (L_L) ทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของวงจรเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้ได้ความถี่ตัดเปลี่ยนแปลงลดต่ำลง

4.4 การออกแบบของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านกับการคัปปลิงแบบปลายเปิดและแบบขนาน

การออกแบบวงจรในรูปที่ 16 เป็นการพัฒนางจรในรูปที่ 12 และรูปที่ 14 นำมาออกแบบเป็นวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่มีย่านแถบหยุด (Stop Band) กว้างขึ้นเมื่อใช้การคัปปลิงแบบปลายเปิดและแบบขนาน โดยที่ขนาดของ a_1 มีค่าเท่ากับ 12 มิลลิเมตร a_2 มีค่าเท่ากับ 3.75 มิลลิเมตร b มีค่าเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร s มีค่าเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร w_1 มีค่าเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร w_2 มีค่าเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร และ w มีค่าเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร ที่อิมพีแดนซ์อินพุทและเอาท์พุทของสายไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม



รูปที่ 17 ผลการจำลองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านกับการคัปปลิงแบบปลายเปิดและแบบขนาน

รูปที่ 17 แสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์เอส ผลปรากฏว่าการจำลองด้วย MPD2008 มีผลตอบสนองของสัญญาณมีค่าความถี่ตัดเท่ากับ 1.1 กิกะเฮิรตซ์ให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับ Sonnet Lite เวอร์ชัน 12.53 มีค่าความถี่ตัดเท่ากับ 1.05 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าช่วงความถี่แถบหยุดมีค่ากว้างมากขึ้น เนื่องมาจากค่าความจุ (C_L) ที่ขนานกันระหว่างวงจรรูปที่ 12 และวงจรรูปที่ 14 มีการเปลี่ยนแปลงทำให้ได้ค่าความถี่ตัดด้านบนมีค่าที่สูงขึ้น และผลค่าของความเหนี่ยวนำ (L_L) ทำให้ค่าความถี่ตัดด้านล่างมีค่าลดน้อยลง

5. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์วงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่มีแถบหยุดความถี่กว้าง ขนาดเล็ก และต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่น ที่มีการคำนวณภายใต้โปรแกรมการออกแบบวงจรคลื่นระนาบไมโครเวฟ (MPD2008) เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบ ผลการวิจัยสรุปได้ว่าวิธีการวนรอบของคลื่นที่นำเสนอสามารถวิเคราะห์ค่าขนาดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ค่าพารามิเตอร์การจัดกระจายมีความสอดคล้องกับโปรแกรม Sonnet Lite เวอร์ชัน 12.53 โดยที่วงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่นำเสนอมีย่านแถบหยุดกว้าง ขนาดเล็ก ต้นทุนในการผลิตต่ำ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตผลการวิจัยพบว่าผลการคำนวณมีค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของโปรแกรม

ในเชิงพาณิชย์ที่นำมาทดสอบ ซึ่งการใช้โปรแกรมการจำลองในเชิงพาณิชย์มาวิเคราะห์วงจรระนาบนั้นจะไม่นำผลของแหล่งกำเนิดมาคำนวณ แต่วิธีการวนรอบของคลื่นมีการนำผลของแหล่งกำเนิด ($B_{i(x,y)}^0$) มาวิเคราะห์รวมอยู่ด้วย จึงทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีความคลาดเคลื่อน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาลัยรัตนภูมิ ที่ให้ทุนอุดหนุนในการเผยแพร่งานวิจัยและภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สิทธิ์ของโปรแกรม MATLAB

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Jianxin, Y. Mengxia, X. Jun, and X. Quan, "Compact microstrip lowpass filter," *Electronics Letters*, vol. 40, issue 11, pp.674–675, May 2004.
- [2] C. Jianxin and X. Quan, "Compact microstrip lowpass filter using slow-wave resonator," *Microwave Conference*, 2005 European, vol. 2, pp.4-6, Oct. 2005.
- [3] J.-L. Li, S.-W. Qu, and Q. Xue, "Compact microstrip lowpass filter with sharp roll-off and wide stop-band," *Electronics Letters*, vol. 45, issue 2, pp.110–111, January 2009.
- [4] Jia-Shen G.Hong and M.J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Application*, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [5] L. Li and Z.-F. Li, "Compact quasi-elliptic lowpass filter using symmetric rectangular coupled capacitors," *Electronics Letters*, vol. 44, issue 2, pp.124–125, January 2008.
- [6] A. Boutejdar, A. Sherbini, W. Ali, S. Fouad, L. Ahmed, and A. Omar, "Design of compact microstrip lowpass filters using coupled half-circle defected ground structures (DGSs)," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2008. AP-S 2008. IEEE, pp.1–4, July 2008.
- [7] L. Jialin, C. Jianxin, X. Quan, W. Jianpeng, S. Wei, and X. Liangjin, "Compact microstrip lowpass filter based on defected ground structure and compensated microstrip line," *Microwave Symposium Digest*, 2005 IEEE MTT-S International, pp.4, June 2005.
- [8] S. Khamkleang and S. Akatimagool, "Microwave Planar Circuit Design Tool in the teaching of Microwave Engineering," *Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2009. ECTI-CON 2009. 6th International Conference, vol. 2, pp.830–833, May 2009.
- [9] S. Khamkleang and S. Akatimagool, "Microwave filter education supported by wave iterative simulation program," *Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2008. ECTI-CON 2008. 5th International Conference, vol. 1, pp.277–280, May 2008.
- [10] S. Akatimagool, D. Baujon, and H. Baudrand, "Analysis of Multi-layer Integrated Inductor with Wave Concept Iterative Procedure," *Microwave Symposium Digest*, 2001 IEEE MTT-S International, vol. 3, pp. 1941-1944, May 2001.
- [11] N. Raveu, T. P. Vuong, I. Terrasse, G. -P. Piau, G. Fontgalland, and H. Baudrand, "Wave Concept Iterative Procedure applied to cylinders," *IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation*, IEE Proceedings. vol. 151, issue 5, pp.409-416, October 2004.
- [12] C. Jianxin and X. Quan. "Compact microstrip low-pass filter with suppression of spurious response," *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings*, vol. 153, issue 5, pp. 432-434, Oct. 2006.