



การพัฒนาโปรแกรมจำลองวงจรองความถี่ สำหรับประยุกต์ใช้ในการศึกษาด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม

จงรัก สามารถ^{1*} สมมาตร ขำเกลี้ยง² และ สมศักดิ์ อรรถทิมากุล³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมจำลองวงจรองความถี่สำหรับประยุกต์ใช้ในการศึกษาด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมในรูปแบบของโปรแกรมจำลอง โดยโปรแกรมจำลองวงจรองความถี่ที่พัฒนาขึ้นทำงานภายใต้โปรแกรม MATLAB ส่วนรับและแสดงผลการทำงานพัฒนาด้วยฟังก์ชัน GUI และวิเคราะห์ผลโดยวิธีการวนรอบของคลื่นผลการทดสอบพบว่าโปรแกรมจำลองวงจรองความถี่ที่พัฒนาสามารถแสดงขนาดและ

แสดงรูปของวงจรองความถี่ไมโครสตริป แสดงพารามิเตอร์การจัดกระจาย และรูปของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า โดยผลการจำลองมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณของโปรแกรม Sonnet Lite เวอร์ชัน 11.53 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นสื่อประกอบการสอนเรื่องวงจรองความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: วงจรองความถี่ โปรแกรมจำลอง วิธีการวนรอบของคลื่น

¹ นักศึกษา ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาลัยรัตภูมิ

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-1749-9549 อีเมล: s.jongruk@gmail.com



Development of Filter Simulation Program for Applying in Telecommunication Engineering Education

Jongruk Samart^{1*} Sommart Khamkleang² and Somsak Akatimagool³

Abstract

This research presents the development of filter simulation program for applying in telecommunication engineering education. The filter simulation program was performed by the MATLAB program. The data input and output display were developed by GUI and the wave iterative method was used for analysis process. The results showed that the filter simulation

program could present the structure of microstrip filter circuit, show the scattering parameter, and the magnetic and electric field. The findings corresponded well with the Sonnet Lite (version 11.53). In conclusion, the simulation program could be efficiently used as a teaching aid in a filter circuit course.

Keywords: Filter, Simulation Program, Wave Iterative Method

¹ Student, Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

² Lecturer, Rajamangala University of Technology Srivijaya Rattaphum College.

³ Associate Professor, Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

* Corresponding Author, Tel. 08-1749-9549 E-mail: s.jongruk@gmail.com

1. บทนำ

การเรียนรู้เป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งของชีวิต ดังที่สำนักงานเลขาธิการสภาการศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ได้กล่าวไว้ในรายงานการติดตามและประเมินสถานภาพ การปฏิรูปการเรียนรู้ในระดับอุดมศึกษา [1] ว่าการเรียนรู้ จะช่วยให้คนเราสามารถปรับตัวให้เข้ากับสถานการณ์ที่ เกิดขึ้นในชีวิตหรือสามารถปรับสิ่งแวดล้อมให้เข้ากับ ตัวเราได้อย่างเหมาะสม การเรียนรู้จึงนับได้ว่าเป็น วิธีการหนึ่งในการเพิ่มศักยภาพของมนุษย์ซึ่งเป็น ทรัพยากรบุคคลของประเทศ ดังนั้นการจัดการศึกษาของ ประเทศไทยสามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบคือ การศึกษา แบบในระบบ แบบนอกระบบและแบบตามอัธยาศัยเพื่อ ให้เหมาะสมกับโอกาส สภาพปัญหา และความต้องการ ของแต่ละบุคคล นอกจากการจัดการศึกษาที่หลากหลาย รูปแบบแล้วยังให้ความสำคัญต่อการปฏิรูปการศึกษา ซึ่งมุ่งเน้นผู้เรียนเป็นสำคัญ ดังเห็นได้จากการปฏิรูป การศึกษาโดยกำหนดเป็นพระราชบัญญัติการศึกษา พ.ศ. 2542 ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 9 หมวดทุกหมวดมุ่งเน้น ประโยชน์ที่จะเกิดแก่ตัวผู้เรียนเป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แนวทางการจัดการศึกษาในหมวด 4 มาตรา 22 กำหนดว่า การศึกษาต้องยึดหลักว่าผู้เรียนสามารถที่จะเรียนรู้ และพัฒนาตนเองได้และถือว่าผู้เรียนมีความสำคัญ ที่สุดกระบวนการในการจัดการศึกษาต้องส่งเสริมให้ ผู้เรียนสามารถพัฒนาได้ตามธรรมชาติและเต็มศักยภาพ มาตรา 24 จัดเนื้อหาสาระและกิจกรรมให้สอดคล้องกับ ความสนใจและความถนัดของผู้เรียนโดยคำนึงถึงความ แตกต่างระหว่างบุคคล จัดให้มีการฝึกทักษะกระบวนการคิด การแก้ปัญหา การประยุกต์ใช้ความรู้ฝึกให้ผู้เรียนคิดเป็น ทำเป็นและใฝ่รู้อย่างต่อเนื่อง จัดสภาพแวดล้อมพร้อมสื่อ ที่เหมาะสมเพื่อให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ [2]

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารและโทรคมนาคมที่ ทันสมัยถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในประเทศส่งผลให้ บุคลากรที่มีความรู้ความสามารถในด้านดังกล่าวจึงเป็นที่ ต้องการของผู้ประกอบการ ดังนั้นสถาบันการศึกษาระดับ อุดมศึกษาทั้งภาครัฐวิสาหกิจและเอกชนจึงเปิด หลักสูตร

การเรียนการสอนในสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคมเพื่อจะผลิตบุคลากรเข้าสู่ตลาดแรงงาน แต่ด้วยรายวิชาในหลักสูตรส่วนใหญ่มีเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง กับการวิเคราะห์ การคำนวณ การออกแบบ และการ สังเคราะห์ ที่ยากต่อความเข้าใจ และจากการสัมภาษณ์ อาจารย์ผู้สอนในสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และ โทรคมนาคมระดับปริญญาตรีพบว่า การสอนส่วนใหญ่ จะมุ่งเน้นให้ผู้เรียนศึกษาทฤษฎีเป็นหลัก ขาดการนำ ทฤษฎีไปประยุกต์ใช้งานจริง ขาดสื่อหรือเครื่องมือประกอบ การเรียนการสอนที่จำเป็น และงบประมาณของสถาบัน การศึกษามีอย่างจำกัด นอกจากนั้นแล้วข้อมูลดังกล่าว มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3]-[5] ซึ่งผลของ การวิจัยได้สรุปไว้ว่า รูปแบบและสื่อการสอนที่เหมาะสม กับสภาพรายวิชาและเนื้อหานั้นจะก่อให้เกิดผลสัมฤทธิ์ ทางการเรียนเพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้ที่เกี่ยวข้องต้องตระหนักถึง ความสำคัญในการพัฒนาสื่อการเรียนการสอนให้มี คุณภาพที่ดีและมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

จากการวิเคราะห์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชภัฏวชิรเวศน์ [6],[7] พบว่า วงจรกรองความถี่เป็นเรื่อง สำคัญที่ต้องจัดให้มีการเรียนการสอนสังเกตได้จาก คำอธิบายรายวิชาหลายๆ รายวิชาระบุถึงเรื่องวงจรกรอง ความถี่ สอดคล้องกับข้อมูลการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญซึ่ง มีความคิดเห็นว่าเรื่องวงจรกรองความถี่เป็นเรื่องสำคัญที่ ต้องมีการเรียนการสอน และผลจากการสืบค้นข้อมูลงาน วิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องวงจรกรองความถี่จากฐานข้อมูล IEEE ในช่วงปี ค.ศ. 2006 ถึงปี ค.ศ. 2010 มีแนวโน้มของ ผู้ทำวิจัยเรื่องนี้เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า วงจรกรอง ความถี่เป็นเรื่องสำคัญที่ต้องจัดให้มีการเรียนการสอนใน สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

การศึกษาและการออกแบบวงจรกรองความถี่ ไมโครเวฟจำเป็นต้องอาศัยโปรแกรมจำลอง ซึ่งโปรแกรม จำลองที่มีอยู่นั้นอาจมีข้อจำกัดบางประการทำให้ ไม่เหมาะสมสำหรับเป็นสื่อประกอบการสอน เช่น โปรแกรม

จำลองบางประเภทไม่สามารถสร้างวงจรตามที่ใช้ต้องการได้ ไม่สามารถแสดงรูปสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ นอกจากนี้โปรแกรมจำลองที่มีประสิทธิภาพที่ดีจะมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นคณะวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาโปรแกรมจำลองขึ้นใหม่และจากการศึกษาวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์พบว่ามืออยู่หลายวิธี เช่น FDTD TLM และ Method of Moment เป็นต้น [8]-[10] แต่ละเทคนิคจะมีความยุ่งยากและซับซ้อน มีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกัน มีข้อจำกัดในการนำมาใช้ในการคำนวณวงจรองความถี่ และเมื่อเร็วๆ นี้มีกลุ่มนักวิจัยได้นำเสนอเทคนิคการคำนวณวิธีการหนึ่งที่ใช้หลักการวนรอบของคลื่น (Wave Iterative Method: WIM) [11]-[13] ที่ให้ผลการทำงานสอดคล้องกับทฤษฎี ประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและสามารถประยุกต์ใช้งานได้สะดวก ซึ่งคณะวิจัยได้ให้ความสนใจในการพัฒนาวิธีดังกล่าวเพื่อนำมาใช้เป็นสื่อการสอนทางด้านการออกแบบวงจรองความถี่

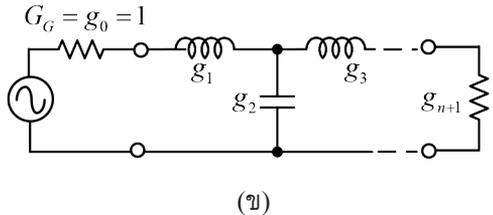
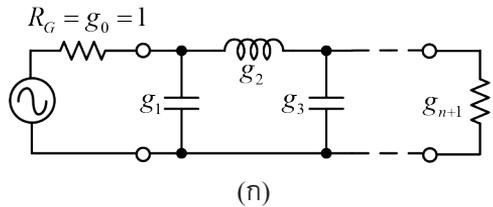
จากความสำคัญดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาสื่อประกอบการสอนเรื่องวงจรองความถี่สำหรับประยุกต์ใช้ในการศึกษาด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม โดยการออกแบบและสร้างเป็นโปรแกรมจำลองวงจรองความถี่โดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่น และใช้ฟังก์ชัน GUI ทำงานภายใต้โปรแกรม MATLAB

2. ทฤษฎี

การดำเนินการวิจัยต้องอาศัยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเป็นข้อมูลประกอบการดำเนินงาน ดังนี้

2.1 การออกแบบวงจรองความถี่

วงจรองความถี่ หมายถึง วงจรไฟฟ้าที่ยอมให้สัญญาณไฟฟ้าความถี่ในย่านที่ต้องการผ่านไปได้ และความถี่ในย่านที่ไม่ต้องการจะถูกลดทอนลง ดังนั้นการออกแบบวงจรองสามารถทำได้โดยการประมาณค่าที่สอดคล้องตามคุณสมบัติของตัวกรองแบบอุดมคติ ตัวกรองความถี่ [14] สามารถแบ่งได้ 4 ประเภท คือ



รูปที่ 1 วงจรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ

- 1) ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน
 - 2) ตัวกรองความถี่สูงผ่าน
 - 3) ตัวกรองความถี่แถบผ่าน
 - 4) ตัวกรองความถี่แถบหยุด
- การออกแบบกรองความถี่แบบพาสซีฟโดยการสังเคราะห์วงจรโดยตรงนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากวงจรองความถี่มีส่วนประกอบจำนวนมาก การหาค่าองค์ประกอบแต่ละตัวเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองตามที่ต้องการในรูปแบบของฟังก์ชันที่ซับซ้อน การคำนวณอาจจะเป็นไปได้ยากหรืออาจเป็นไปได้เลย [15] ในทางปฏิบัติจึงได้ทำการออกแบบวงจรต้นแบบเป็นวงจรองความถี่ต่ำโดยค่าพารามิเตอร์ในวงจรต้นแบบที่ได้เป็นค่าที่ถูกลอการแมสเพื่อทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับ 1 โดยสัญลักษณ์แทนด้วย $g_0 = 1$ ความถี่คัตออฟเท่ากับ $\omega_c = 1 \text{ rad/s}$ ดังแสดงด้วยวงจรองความถี่ต่ำต้นแบบในรูปที่ 1 หลังจากนั้นทำการแปลงจากวงจรองความถี่ต่ำต้นแบบไปเป็นวงจรที่ต้องการแล้วทำการปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์และความถี่ใช้งานจริง

การออกแบบให้ตัววงจรองความถี่ที่ตอบสนองความถี่ให้ได้ตามที่ผู้ใช้ต้องการเหมือนกับทางอุดมคติเป็นสิ่งที่กระทำได้ยาก จึงทำให้เกิดทฤษฎีการประมาณค่าหลายทฤษฎี เช่น บัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth) เชบปีเชฟ (Chebyshev) เบสเซล (Bessel) และแอลลิปติก (Elliptic)

เป็นต้น สำหรับในงานวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะทฤษฎีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวิร์ทและเชฟบีเซฟ เนื่องจากเป็นทฤษฎีที่ได้รับความนิยมใช้ในการออกแบบและการสร้างวงจรกรองความถี่มากกว่าวิธีอื่น

2.1.1 ทฤษฎีการการประมาณค่าบัตเตอร์เวิร์ท

ประสิทธิภาพของวงจรจะถูกกำหนดด้วยจำนวนอุปกรณ์พาสซีฟได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ซึ่งค่าของอันดับจะอธิบายถึงจำนวนอุปกรณ์ดังกล่าว โดยที่ค่าของอันดับจะมีค่าเริ่มต้นตั้งแต่ 1 จนถึง ∞ เพื่อให้ได้วงจรใกล้เคียงอุดมคติมากที่สุด สมการสำหรับคำนวณค่าอันดับดังแสดงในสมการที่ (1)

$$n = \frac{\log \left[\frac{10^{\frac{\alpha_{\min}}{10}} - 1}{10^{\frac{\alpha_{\max}}{10}} - 1} \right]}{2 \log \frac{\omega_s}{\omega_p}} \quad (1)$$

เมื่อ

n คืออันดับของวงจรกรองความถี่
 $\alpha_{\min}, \alpha_{\max}$ คืออัตราการลดทอนต่ำสุดและสูงสุดของวงจร
 ω_p, ω_s คือความถี่สำหรับแถบผ่านและแถบหยุด

เมื่อได้ค่าอันดับของวงจร หลังจากนั้นทำการคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจรโดยใช้สมการที่ (2) หรือเปิดตารางองค์ประกอบของวงจรต้นแบบที่ความถี่นอร์มัลไลซ์

$$\begin{cases} g_0 = 1 \\ g_i = 2 \sin \left(\frac{(2i-1)\pi}{2n} \right) \\ g_{n+1} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

เมื่อ i คือ 1, 2, 3, 4, ..., n

2.1.2 ทฤษฎีการประมาณค่าเชฟบีเซฟ

การคำนวณค่าอันดับของวงจรในทฤษฎีการประมาณค่าเชฟบีเซฟใช้สมการที่ (3)

$$\begin{cases} \varepsilon = \sqrt{10^{\frac{\alpha_{\max}}{10}} - 1} \\ \cosh^{-1} \left[\varepsilon^{-1} \left(10^{\frac{\alpha_{\min}}{10}} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \\ n = \frac{\cosh^{-1} \left(\frac{\omega_s}{\omega_p} \right)}{\cosh^{-1} \left(\frac{\omega_s}{\omega_p} \right)} \end{cases} \quad (3)$$

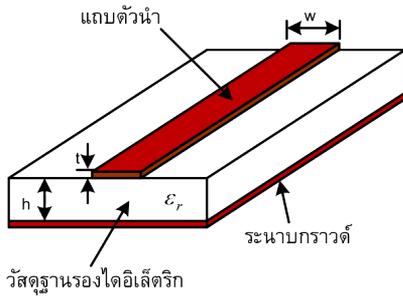
เมื่อได้ค่าอันดับของวงจร หลังจากนั้นทำการคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจรโดยใช้สมการที่ (4) หรือเปิดตารางองค์ประกอบของวงจรต้นแบบที่ความถี่นอร์มัลไลซ์

$$\begin{cases} g_0 = 1.0 \\ g_1 = \frac{2}{\gamma} \sin \left(\frac{\pi}{2n} \right) \\ g_i = \frac{1}{g_{i-1}} \frac{4 \sin \left[\frac{(2i-1)\pi}{2n} \right] \sin \left[\frac{(2i-2)\pi}{2n} \right]}{\gamma^2 + \sin^2 \left[\frac{(i-1)\pi}{n} \right]} \\ \beta = \ln \left[\coth \left(\frac{\alpha_{\max}}{17.37} \right) \right] \\ \gamma = \sinh \left(\frac{\beta}{2n} \right) \end{cases} \quad (4)$$

เมื่อ i คือ 2, 3, 4, ..., n

2.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ไมโครสตริป

ไมโครสตริปเป็นสายส่งสัญญาณที่นิยมใช้กันมากในวงจรสื่อสารโดยจะสร้างอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์เนื่องจากสายส่งไมโครสตริปมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สามารถออกแบบเป็นวงจรใช้งานที่ความถี่สูงๆ ได้ และต้นทุนในการสร้างวงจรมีทั้งนี้สายส่งไมโครสตริปมีโครงสร้างเช่นเดียวกับกับเส้นของลวดวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2 ที่ประกอบด้วยแถบตัวนำหรือสตริปตัวนำวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กทริกและแผ่นระนาบกราวด์ตัวนำโดยที่สตริปตัวนำมีความหนาเท่ากับ t และความกว้างเท่ากับ w ฐานรองมีความหนา h และมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ε_r



รูปที่ 2 โครงสร้างสายส่งไมโครสตริป

การออกแบบวงจรกรองความถี่โดยใช้สายส่งแบบไมโครสตริปต้องมีการกำหนดค่าอิมพีแดนซ์เพื่อใช้สำหรับการคำนวณหาอัตราส่วนความกว้างของสตริปต่อความสูงของฐานรองซึ่งการประมาณค่าดังกล่าวจะใช้สมการที่ (5) หรือสมการที่ (6) ขึ้นอยู่กับผลการคำนวณเมื่อเทียบกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ดังนี้ [14]

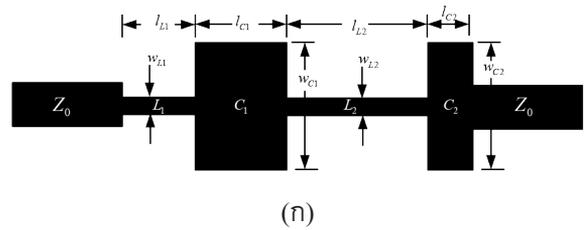
กรณี $\left(\frac{w}{h} \leq 2\right)$

$$\begin{cases} A = 2\pi \frac{Z_0}{\eta} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r}\right)} \\ \frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \end{cases} \quad (5)$$

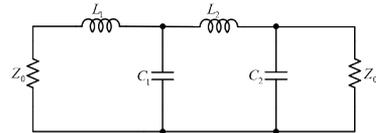
กรณี $\left(\frac{w}{h} \geq 2\right)$

$$\begin{cases} B = \frac{\eta\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \\ \frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ \begin{aligned} &B - 1 - \ln(2B - 1) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r}\right) \\ &\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \end{aligned} \right\} \end{cases} \quad (6)$$

เมื่อได้ค่า w/h แล้วในขั้นตอนถัดไปจะเป็นการคำนวณเพื่อหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ประสิทธิภาพซึ่งต้องอาศัยค่า w/h มาใช้เป็นเงื่อนไขเพื่อเลือกสมการในการคำนวณโดยมีสมการคำนวณดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 (ก) โครงสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด L-C Ladder โดยใช้สายส่งไมโครสตริปแบบ Step Impedance (ข) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด L-C Ladder

กรณี $\left(\frac{w}{h} > 1\right)$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1/2} \quad (7)$$

กรณี $\left(\frac{w}{h} < 1\right)$

$$\begin{cases} \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2}\right) \\ \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1/2} + 0.04 \left(1 - \frac{w}{h}\right)^2\right] \end{cases} \quad (8)$$

สำหรับรูปแบบของวงจรกรองความถี่ไมโครสตริปในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย

2.2.1 วงจรกรองความถี่แบบ Step Impedance

โครงสร้างของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้สายส่งไมโครสตริปชนิด L-C Ladder แบบ Step Impedance แสดงในรูปที่ 3(ก) ซึ่งใช้การเชื่อมต่อแบบ Cascaded ของสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงและต่ำเรียงเป็นลำดับโดยสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงเปรียบเสมือนตัวเหนี่ยวนำ

และสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำเปรียบเสมือนตัวเก็บประจุ โดยแสดงเป็นวงจรชนิด L-C Ladder ดังในรูปที่ 3(ข) การพิจารณาค่าของอิมพีแดนซ์สายส่งไมโครสตริปของ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุโดยมีหลักการพิจารณาคือ $Z_{0C} < Z_0 < Z_{0L}$ โดยที่ $Z_0 = 50\Omega$ ซึ่งค่า Z_{0C} มีค่าอยู่ระหว่าง 10Ω ถึง 15Ω และค่า Z_{0L} มีค่าอยู่ระหว่าง 100Ω ถึง 150Ω จากความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์สามารรถ คำนวณหาค่าของความยาวสายส่งที่มีความถี่ตัด โดยการ พิจารณาสายส่งในแบบปลายปิดสำหรับตัวเหนี่ยวนำ แบบปลายเปิดสำหรับตัวเก็บประจุตั้งสมการหาค่า ความยาวในสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ

$$l_L = \frac{\omega_0 L}{\beta Z_{0L}} \quad (9)$$

$$l_C = \frac{\omega_0 C Z_{0C}}{\beta} \quad (10)$$

การคำนวณเพื่อหาค่าคงที่เฟสใช้สมการที่ (11) ดังนี้

$$\beta = \omega_0 \sqrt{\epsilon_{eff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (11)$$

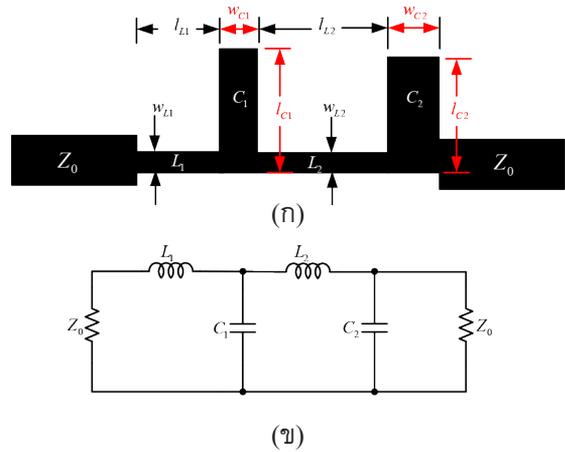
2.2.2 วงจรกรองความถี่แบบ Open Stub

โครงสร้างของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้ สายส่งไมโครสตริปชนิด L-C Ladder แบบ Open Stub แสดงในรูปที่ 4(ก) และแสดงเป็นวงจรชนิด L-C Ladder ดังในรูปที่ 4(ข) การคำนวณหาค่าความยาวของสายส่งที่ ความถี่ตัดแสดงในสมการที่ (12) และ (13) ตามลำดับ

$$l_L = \frac{\omega_0 L}{\beta Z_{0L}} \quad (12)$$

$$l_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \tan^{-1}(\omega_0 C Z_{0C}) \quad (13)$$

เมื่อ λ_{gC} คือ ความยาวคลื่นในสายส่งของ Z_{0C}



รูปที่ 4 (ก) โครงสร้างวงจกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด L-C Ladder โดยใช้สายส่งไมโครสตริปแบบ Open Stub (ข) วงจกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด L-C Ladder

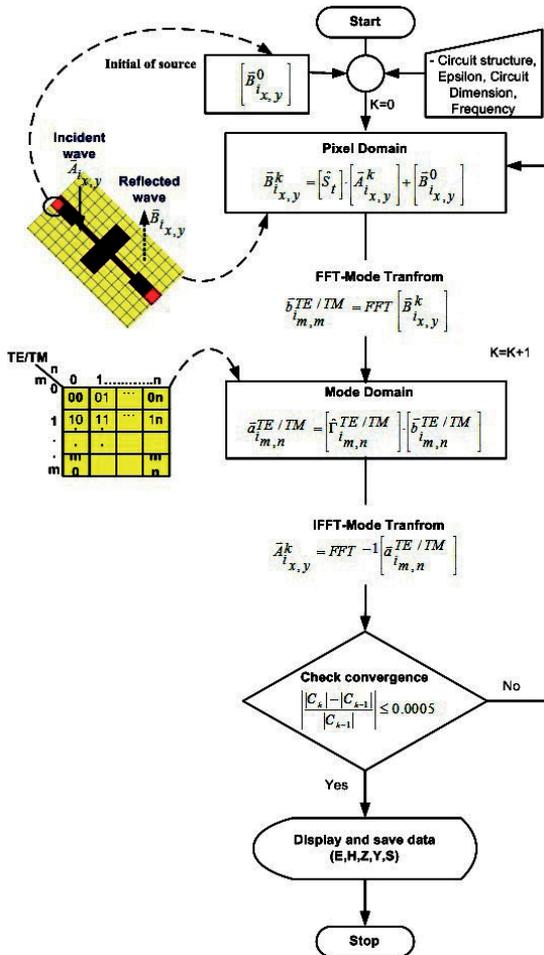
2.3 การวิเคราะห์ห้วงจรโดยวิธีการวนรอบของคลื่น [4]

วิธีการวนรอบของคลื่นจะอาศัยหลักการของ คลื่นที่ตกกระทบ (Incident Wave) คลื่นสะท้อนกลับ (Reflected Wave) และคลื่นส่งผ่าน (Transmitted Wave) ในโครงสร้างของวงจรคลื่นระนาบที่อยู่ภายในกล่องตัวนำ กระบวนการคำนวณโดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่นที่ พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 5 จะทำงานเริ่มจากการกำหนดโครงสร้าง ของวงจร ค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ (ϵ_r) ค่าขนาดของวงจร ค่าความถี่ที่ใช้งาน และกำหนดค่าเริ่มต้นของสนามไฟฟ้า (E_0) ที่ส่งเข้าไปภายในกล่องตัวนำตั้งสมการของแหล่ง กำเนิดที่สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{B}_{i(x,y)}^0 = \frac{1}{n + n_1 + 1} \left[\frac{E_0}{\sqrt{Z_{0i}}} \right] \quad (14)$$

$$\text{เมื่อ } n = \frac{Z_0}{Z_{01}}, n_1 = \frac{Z_0}{Z_{02}}$$

กระบวนการคำนวณก็จะเริ่มต้นขึ้น เมื่อส่งคลื่นเข้าไป ในวงจรกล่องตัวนำ โดยคลื่นที่สะท้อนบนวงจรตัวนำจะ



รูปที่ 5 กระบวนการของวิธีการวนรอบของคลื่น

ประกอบไปด้วยคลื่นบนส่วนของตัวนำ ไดโวลีกริก และ แหล่งกำเนิด สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\vec{B}_{i,x,y}^{(k)} = \hat{S}_i \vec{A}_{i,x,y}^{(k)} + \vec{B}_{i,x,y}^{(0)} \quad (15)$$

เมื่อ $\vec{A}_{i(x,y)}^{(k)}$ คือคลื่นตกกระทบบนวงจรถ้วนนำ $\vec{B}_{i(x,y)}^{(0)}$ คือค่าเริ่มต้นของแหล่งกำเนิด i คือชั้นที่ 1 หรือ 2 ของแผ่นวงจรถ้วนนำ k คือจำนวนรอบของการคำนวณ และ \hat{S}_i คือพารามิเตอร์การกระจายของคลื่นบนวงจรถ้วนนำที่ประกอบไปด้วยส่วนของตัวนำ ส่วนของไดโวลีกริก และ แหล่งกำเนิด ซึ่งมีค่าดังนี้

$$[\hat{S}_i] = \begin{bmatrix} -M + \frac{(1-n^2)D}{1+n^2} + \frac{(-1+n_1-n_2)S}{1+n_1+n_2} & M + \frac{(2n)D}{1+n^2} + \frac{(2n_2)S}{1+n_1+n_2} \\ M + \frac{(2n)D}{1+n^2} + \frac{(2n_2)S}{1+n_1+n_2} & -M + \frac{(1-n^2)D}{1+n^2} + \frac{(-1+n_1-n_2)S}{1+n_1+n_2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

เมื่อ $n = \frac{Z_0}{Z_{01}}, n_1 = \frac{Z_0}{Z_{02}}, n_2 = \frac{Z_0}{\sqrt{Z_{01}Z_{02}}}$

Z_0 คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง 50Ω

Z_{01} คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งชั้นที่ 1

Z_{02} คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งชั้นที่ 2

M คือพื้นที่วงจรถ้วนนำ

D คือพื้นที่วงจรถ้วนนำของไดโวลีกริก

S คือพื้นที่วงจรถ้วนนำของแหล่งกำเนิด

ดังนั้นเมื่อคลื่น $\vec{B}_{i(x,y)}^{(k)}$ สะท้อนออกมาจากพื้นผิวของวงจรถ้วนนำหรือโดเมนทางพิกเซล (Pixel Domain) จะถูกแปลงสภาพด้วยฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (FFT) เป็นคลื่นในโดเมนทางโหมด (Mode Domain) คือ

$$\vec{b}_{i(m,n)}^{TE/TM} = FFT[\vec{B}_{i(x,y)}^{(k)}] \quad (17)$$

คลื่น $\vec{b}_{i(m,n)}^{TE/TM}$ จะตกกระทบกับฝาถ่วงตัวนำที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในโหมด TE (Transverse Electric) และ TM (Transverse Magnetic) ได้ดังนี้

$$\hat{\Gamma}_{i(m,n)}^{TE/TM} = \sum_{m,n} \frac{Y_0 - Y_{m,n}^{TE/TM}}{Y_0 + Y_{m,n}^{TE/TM}} \quad (18)$$

เมื่อ Y_0 คือแอดมิตแตนซ์คุณลักษณะของสายส่งหรือส่วนกลับของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Z_0) $T_{m,n}$ คือแอดมิตแตนซ์ของโหมด TE และ TM ในลำดับของจำนวนโหมดคลื่น (m, n) เมื่อ m, n มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง ∞

ดังนั้นจะได้คลื่นสะท้อนกลับที่ฝาถ่วงตัวนำในโดเมนทางโหมด เป็นดังนี้

$$\vec{a}_{i(m,n)}^{TE/TM} = [\hat{\Gamma}_{i(m,n)}^{TE/TM}] [\vec{b}_{i(m,n)}^{TE/TM}] \quad (19)$$

จากนั้นทำการแปลงสภาพจากโดเมนทางโมดไปเป็นโดเมนทางขนาดโดยใช้ฟูริเยร์อย่างเร็วย้อนกลับดังนี้

$$\vec{A}_i^k(x,y) = FFT^{-1} [a_{i(m,n)}^{TE/TM}] \quad (20)$$

กระบวนการของการคำนวณในแต่ละรอบจะสามารถแสดงค่าของสนามไฟฟ้า $\vec{E}_i(x,y)$ และสนามแม่เหล็ก $\vec{H}_i(x,y)$ ที่ปรากฏบนพื้นที่ของชั้นวงจรตัวนำได้ดังนี้

$$\vec{E}_i(x,y) = \sum_{m,n} E_{m,n}(x,y) f_{m,n}(x,y) \quad (21)$$

$$\vec{H}_i(x,y) = \sum_{m,n} E_{m,n}(x,y) Y_{m,n} f_{m,n}(x,y) \quad (22)$$

เมื่อ $f_{m,n}$ คือฟังก์ชันพื้นฐานของคลื่นที่ประกอบไปด้วยฟังก์ชัน Cosine และฟังก์ชัน Sine

กระบวนการของการคำนวณจะกระทำซ้ำๆ จนกระทั่งผลลัพธ์ที่ได้มีการลู่ออกค่าตอบที่ถูกต้องดังรูปที่ 5 และสามารถวิเคราะห์หาค่าโครงข่ายพารามิเตอร์ได้จากสมการดังนี้

$$[Z] = \sum_{x,y} \frac{E(x,y)}{j(x,y)} \quad (23)$$

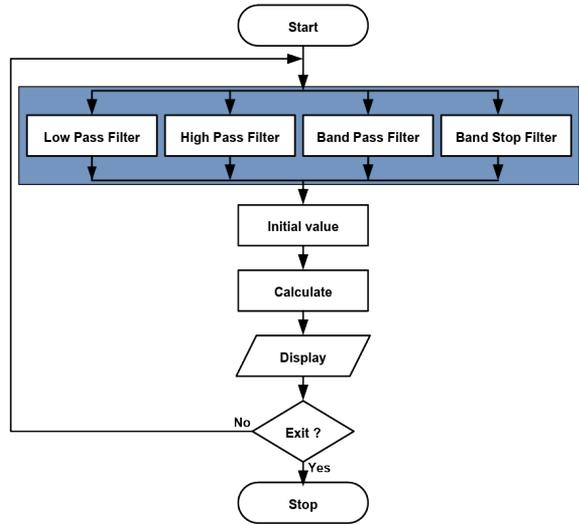
$$[S] = [1-Z][1+Z]^{-1} \quad (24)$$

3. การพัฒนาสื่อการสอน

ขั้นตอนในการพัฒนาโปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่สำหรับเป็นสื่อประกอบการสอนมีลำดับขั้นในการพัฒนาดังต่อไปนี้

3.1 การวิเคราะห์เนื้อหา

วัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์เนื้อหาเรื่องวงจรกรองความถี่เพื่อต้องการกำหนดหัวข้อในการพัฒนาโปรแกรม ซึ่งจากการผลการวิเคราะห์สามารถแบ่งได้ 4 หัวข้อได้แก่ วงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรกรองความถี่สูง วงจรกรองความถี่แถบผ่านและวงจรกรองความถี่แถบหยุด



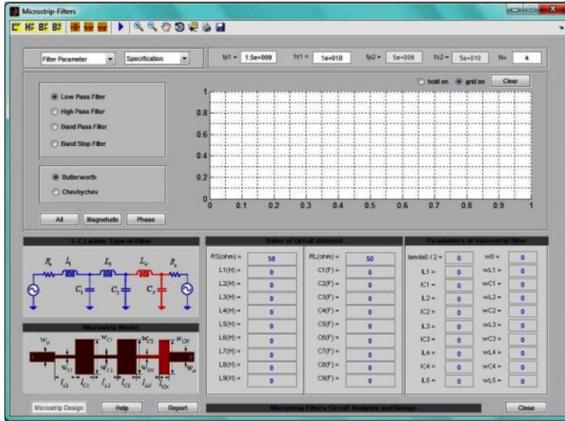
รูปที่ 6 กระบวนการของโปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่

3.2 ออกแบบกระบวนการทำงานของโปรแกรม

กระบวนการทำงานที่ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 6 ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ได้แก่ การรับข้อมูลจากผู้ใช้ด้วยการเลือกประเภทของวงจรกรองความถี่ การเลือกวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวิร์ทหรือเชฟบีเซฟ การกำหนดค่าเริ่มต้น เช่น ค่าอันดับ ความถี่ตัด ความถี่แถบผ่านความถี่แถบหยุด เป็นต้น จากนั้นทำการประมวลผลสุดท้ายจำลองและแสดงผลการทำงานของวงจร

3.3 การพัฒนาโปรแกรมจำลอง

โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย ส่วนของการป้อนและการแสดงผลของโปรแกรม ที่สร้างขึ้นโดยใช้ฟังก์ชัน GUI ของโปรแกรม MATLAB เพื่อความสะดวกในการติดต่อกับผู้ใช้งานโปรแกรม ส่วนการคำนวณวงจรกรองความถี่จะใช้ทฤษฎีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวิร์ทและเชฟบีเซฟ ส่วนของการออกแบบวงจรกรองความถี่ไมโครสตริปจะใช้ทฤษฎีการคำนวณสายส่งแบบ Step และ Stub Impedance และส่วนการการวิเคราะห์ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่จะอาศัยวิธีการวนรอบของคลื่น ดังนั้นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถ



รูปที่ 7 หน้าต่างของโปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่

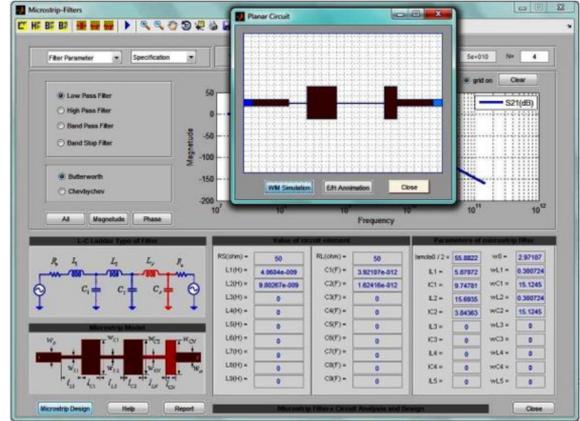
แสดงค่าของตัวเหนี่ยวนำ ค่าของตัวเก็บประจุ ขนาดและรูปของวงจรกรองความถี่ไมโครสตริป และค่าการตอบสนองทางความถี่ของพารามิเตอร์กระจาย นอกจากนี้นี้ยังสามารถแสดงรูปสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ปรากฏในวงจร หน้าต่างของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7

4. ผลของการวิจัย

ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบวงจรกรองความถี่โดยใช้โปรแกรมและเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการคำนวณโดยใช้สมการร่วมกับเครื่องคำนวณ ซึ่งวงจรสำหรับการทดสอบประกอบด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและวงจรกรองความถี่แถบหยุด มีรายละเอียดดังนี้

4.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้สายส่งไมโครสตริปแบบ Step Impedance

กำหนดวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้สายส่งไมโครสตริปแบบ Step Impedance มีผลตอบสนองแบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับ 4 ที่ความถี่ตัดเท่ากับ 1.5GHz ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ ชนิด FR-4 ที่มีค่า $\epsilon_r = 4.2$ ค่าของความหนาของฐานรองเท่ากับ 1.5mm $Z_{OC} = 15\Omega$, $Z_0 = 50\Omega$, $Z_{OL} = 125\Omega$ การเปรียบเทียบผลของการคำนวณทางทฤษฎีและการคำนวณโดยใช้โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้น ดังในตารางที่ 1



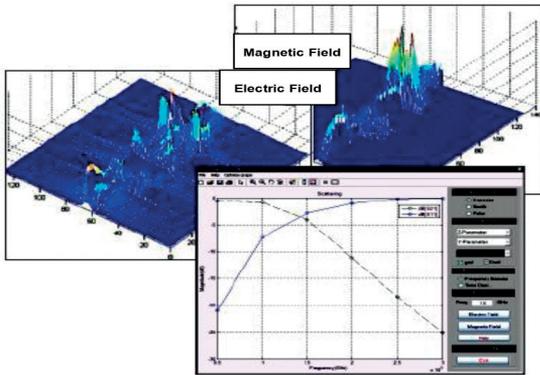
รูปที่ 8 ผลการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ตารางที่ 1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ผลการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	
คำนวณทางทฤษฎี	โปรแกรมจำลอง
$L_1 = 4.06 \text{ nH}$	$L_1 = 4.06 \text{ nH}$
$L_2 = 9.80 \text{ nH}$	$L_2 = 9.80 \text{ nH}$
$C_1 = 3.92 \text{ pF}$	$C_1 = 3.92 \text{ pF}$
$C_2 = 1.62 \text{ pF}$	$C_2 = 1.62 \text{ pF}$
$l_{L1} = 5.76 \text{ mm}$	$l_{L1} = 5.87 \text{ mm}$
$l_{L2} = 13.91 \text{ mm}$	$l_{L2} = 15.69 \text{ mm}$
$l_{C1} = 9.19 \text{ mm}$	$l_{C1} = 9.74 \text{ mm}$
$l_{C2} = 3.81 \text{ mm}$	$l_{C2} = 3.84 \text{ mm}$
$w_{L1} = w_{L2} = 0.34 \text{ mm}$	$w_{L1} = w_{L2} = 0.3 \text{ mm}$
$w_{C1} = w_{C2} = 15.12 \text{ mm}$	$w_{C1} = w_{C2} = 15.12 \text{ mm}$

ผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 1 ค่าที่คำนวณได้จากทั้งสองแบบ พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 1\%$ และผลการคำนวณค่าของอุปกรณ์และการออกแบบโครงสร้างของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้สายส่งไมโครสตริปแบบ Step Impedance แสดงดังรูปที่ 8

จากรูปที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์และการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปแบบ Step Impedance พบว่า ที่ความถี่ 1.5GHz ซึ่งเป็นค่า



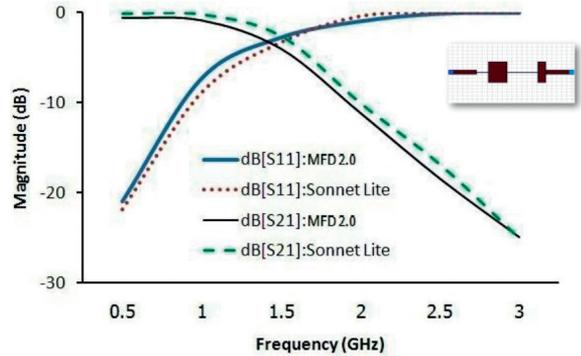
รูปที่ 9 ผลการจำลองวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

ความถี่ตัดที่ต้องการ ค่า dB(S21) มีค่าต่ำกว่า -3 dB และเมื่อความถี่สูงกว่าค่าความถี่ตัดสัญญาณจะถูกลดทอนลงไปมากยิ่งขึ้นซึ่งเป็นคุณสมบัติของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน นอกจากนั้นแล้วโปรแกรมสามารถแสดงรูปคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ปรากฏบนวงจรได้ โดยที่สนามไฟฟ้าที่ปรากฏบริเวณรอยต่อระหว่างตัวนำกับไดอิเล็กทริกมีค่ามากและจะลดลงเมื่อห่างออกไป สำหรับสนามแม่เหล็กจะปรากฏเฉพาะในบริเวณผิวตัวนำ

จากรูปที่ 10 จะแสดงถึงความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ dB(S11) และ dB(S21) กับโปรแกรมการจำลอง Sonnet Lite ซึ่งผลที่ได้เป็นผลการตอบสนองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่สอดคล้องกัน โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 5% เนื่องจากผลของข้อจำกัดของโปรแกรมจำลองที่แตกต่างกัน

4.2 วงจรรองความถี่แถบหยุดโดยใช้สายส่งไมโครสตริปแบบ Open Stub

กำหนดวงจรรองความถี่แถบหยุดโดยใช้สายส่งแบบไมโครสตริป Open Stub ใช้การประมาณค่าเซพมิเซพในอันดับ 2 ที่มีริบเบิลเท่ากับ 0.5dB และมีความถี่หยุดแถบ (f_1) เท่ากับ 1.25GHz ความถี่หยุดแถบ (f_2) เท่ากับ 3.75GHz ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 ที่มีค่า $\epsilon_r = 4.6$ ความหนาของชั้นฐานรองเท่ากับ 1.6mm $Z_{0C} = 15\Omega$, $Z_0 = 50\Omega$, $Z_{0L} = 125\Omega$



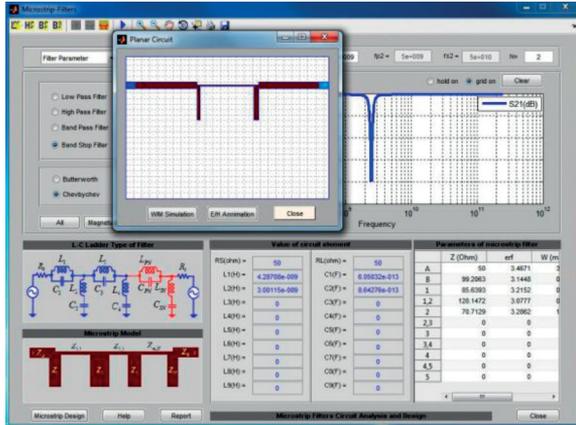
รูปที่ 10 พารามิเตอร์การจัดการกระจายระหว่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นและโปรแกรม Sonnet Lite 11.53

ตารางที่ 2 วงจรรองความถี่แถบหยุด

ผลการออกแบบวงจรรองความถี่แถบหยุด	
ค่านวนทางทฤษฎี	โปรแกรมจำลอง
$L_1 = 4.28 \mu H$	$L_1 = 4.28 \mu H$
$L_2 = 3 \mu H$	$L_2 = 3 \mu H$
$C_1 = 60.5 pF$	$C_1 = 60.5 pF$
$C_2 = 86.42 pF$	$C_2 = 86.42 pF$
$l_1 = 16.73mm$	$l_1 = 16.85mm$
$l_{1-2} = 17.10mm$	$l_{1-2} = 17.15mm$
$l_2 = 16.55mm$	$l_2 = 16.75mm$
$w_{1-2} = 0.32mm$	$w_{1-2} = 0.37mm$
$w_1 = 1.51mm$	$w_1 = 1.54mm$
$w_i = 0.94mm$	$w_i = 0.96mm$

ผลการค่านวนทางทฤษฎี และการใช้โปรแกรมจำลอง จะแสดงในตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาข้อมูลการเปรียบเทียบในตารางที่ 2 พบว่า ผลของการค่านวนโดยโปรแกรมจำลองและการค่านวนทางทฤษฎีได้ค่าของตัวเหนี่ยวนำตัวเก็บประจุขนาดความกว้างและความยาวของไมโครสตริปที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 1\%$

จากรูปที่ 11 แสดงหน้าต่างผลการออกแบบด้วยโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นที่ประกอบด้วย การแสดงค่า

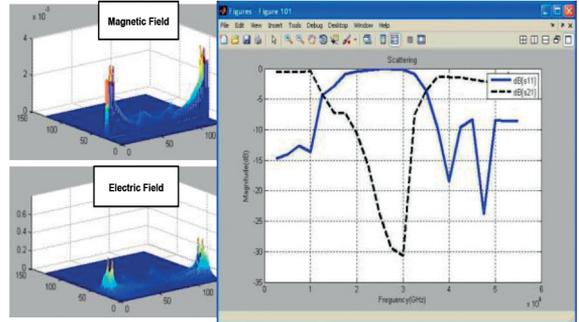


รูปที่ 11 ผลการออกแบบวงจรกรองความถี่แถบหยุด

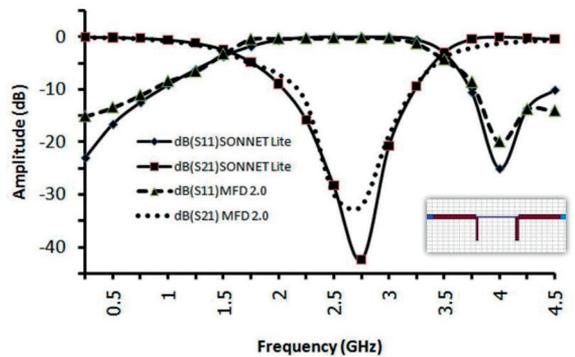
ของตัวเหนี่ยวนำ ค่าของตัวเก็บประจุ ขนาดความกว้าง และความยาวของโครงสร้างวงจรไมโครสตริปของวงจรกรองความถี่แถบหยุดแบบ Open Stub ตามเงื่อนไขที่กำหนด

จากรูปที่ 12 แสดงผลการวิเคราะห์และการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่แถบหยุดไมโครสตริปแบบ Open Stub พบว่า ที่ความถี่ตั้งแต่ 1.25GHz ถึง 3.75GHz ค่า dB(S21) มีค่าต่ำกว่า -3dB ซึ่งหมายถึงสัญญาณจะไม่สามารถส่งผ่านไปได้ในช่วงความถี่ดังกล่าว ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่แถบหยุดและเป็นช่วงความถี่ที่ต้องการออกแบบ นอกจากนั้นแล้วโปรแกรมจำลองสามารถแสดงรูปสนามไฟฟ้าและรูปสนามแม่เหล็กที่ปรากฏบนวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 13 จะแสดงถึงความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์กระจายในรูปแบบ dB(S11) และ dB(S21) ระหว่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับโปรแกรมการจำลอง Sonnet Lite ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของค่าตอบที่มีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 5\%$ ในช่วงของความถี่ใช้งาน ซึ่งแสดงว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและเป็นสื่อประกอบการสอนในเรื่องวงจรกรองความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 12 ผลการจำลองวงจรกรองความถี่แถบหยุด



รูปที่ 13 พารามิเตอร์กระจายระหว่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับ Sonnet Lite เวอร์ชัน 11.53

5. สรุป

โปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยฟังก์ชัน GUI ของโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการป้อนข้อมูลตามต้องการของผู้ใช้งานและแสดงผลการทำงาน การออกแบบจะใช้ทฤษฎีของการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวิร์ท และเชฟบีเซฟ ตลอดจนอาศัยทฤษฎีสายส่งไมโครสตริปร่วมกับหลักการของการวนรอบของคลื่น สำหรับการวิเคราะห์การทำงานของวงจรผลการทดสอบของโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 1\%$ และผลการวิเคราะห์และจำลองการทำงานของโปรแกรมมีความสอดคล้องกับผลของโปรแกรม Sonnet Lite เวอร์ชัน 11.53 ที่มีค่า



ความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 5\%$ จากข้อจำกัดของโปรแกรมที่แตกต่างกัน กล่าวคือโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจำเป็นต้องใช้พื้นที่ส่วนหนึ่งของวงจรเป็นจุดบ่อนพลังงานที่แตกต่างจากโปรแกรมการจำลอง Sonnet Lite ที่ใช้แหล่งกำเนิดของพลังงานเป็นแบบอุดมคติ อย่างไรก็ตามโปรแกรมจำลองวงจรรองความถี่ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ห้วงจรรองความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้เป็นสื่อประกอบการเรียนการสอนได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Office of the Education Council, *Monitoring and Evaluation Report of Learning Reform in Higher Education*, Bangkok (Thailand): Kurusapa Printing, 2004.

[2] Office of the Education Council, *National Education Act B.E.2542 (1999)*, Bangkok (Thailand): Published in the Government Gazette, 1999.

[3] Sommart Khamkleang, Somsak Akatimagool and Mongkol Wangsathitwong, "A Development of Instructional Model on Facilitating Student-Centered Learning of Microwave Planar Circuit Design and Analysis," in *47th Kasetsart University Annual Conference*, Mar 2009, pp. 109-116.

[4] S. Khamkleang and S. Akatimagool, "Microwave Planar Circuit Design Tool in the teaching of Microwave Engineering," *Electrical Engineering/ Electronics, Computer, in Telecommunications and Information Technology, 2009, ECTI-CON 2009. 6th International Conference on*, May 2009, vol. 2, pp. 830-833.

[5] Qiang Sui, Liang Zhang and Hongtao Jia, "Interactive Matlab Programs for Impedance Matching Teaching in Microwave Engineering," in *Computational Intelligence and Software Engineering, CiSE 2009. International Conference on*, 2009, pp. 1-4.

[6] Rajamangala University of Technology Isan, *Bachelor of Engineering Program in Electronics and Telecommunication Engineering*, 2010.

[7] Rajamangala University of Technology Isan, *Bachelor of Science in Technical Education Program in Electronics and Telecommunication Engineering*, 2010.

[8] Yan Zhang, Ben-Qing Gao et al. "Analysis and Application of New Quasi-Network Characteristics of Nonuniform Mesh in FDTD Simulation," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, No. 11, pp. 2519-2526, November, 2002.

[9] A. Wender and R.A.X. Leonado, "Reconstruction of microwave structures using two-dimensional inverse TLM (Transmission Line Matrix) method," in *Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International*, May 2001 vol. 2, pp. 905-908.

[10] A. Centeno, "A comparison of numerical dispersion in FDTD and TLM algorithms," in *Applied Electromagnetics, 2003. APACE 2003. Asia-Pacific Conference*, Aug. 2003, pp. 12-14.

[11] S. Akatimagool, D. Baujon and H. Baudrand, "Analysis of Multi-layer Integrated Inductor with Wave Concept Iterative Procedure," in *Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International*, May 2001, vol.3, pp.1941-1944.

[12] N. Raveu, O. Pigaglio, G. Prigent, and



- H. Baudrand, "Improvement in the wave concept iterative procedure through spectral connection," in *Microwave Conference*, European, Oct. 2007, pp. 28-31.
- [13] Sommart Khamkleng and Somsak Akatimagool, "Microwave Filter Education Supported by Wave Iterative Simulation Program," in *Electrical Engineering /Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2008*, Krabi, May 2008, pp. 277-280.
- [14] Somsak Akatimagool, *Microwave Circuit Analysis and Design*, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. Bangkok (Thailand), 2008.
- [15] Prayoot Akkaraekthalin, *Microwave Circuit Design*, King Mongkut's University of Technology North Bangkok Printing. Bangkok (Thailand), 2010.
- [16] Reinhold Ludwig and Pavel Bretchko, *RF Circuit Design: Theory and Applications*, New Jersey Prentice: Hall, 2002.