การวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนทางเวลา ด้วยวิธีการวนรอบของคลื่น สำหรับการศึกษาและการวิจัยวงจรกรองความถี่ไมโครสตริป

Analysis of Electromagnetic Wave Propagation in the Time Domain by Wave Iterative Method (WIM) for Education and Research Microstrip Filter

สมมารถ ขำเกลี้ยง[1*]

Sommart Khamkleang[1*]

[*1]วิทยาลัยรัตภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อ.รัตภูมิ จ.สงขลา 90180

[*1]Rajamangala University of Technology Srivijaya Rattaphum Collage, Rattaphum, Songkhla 90180

[*]ผู้นิพนธ์ประสานงาน : หมายเลขโทรศัพท์ 08-6822-4060 และ E-mail : smk_kai@hotmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนทางเวลา โดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่น สำหรับประกอบการสอนและการวิจัย เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB® มีการประมวลผลโดยอาศัยหลักการของคลื่นที่ตกกระทบ (Incident Wave) และคลื่นสะท้อนกลับ (Reflected Wave) ที่มีการเคลื่อนที่สลับกันไปมาระหว่างตัวกระทำทางพิกเซล (pixel operation) และตัวกระทำทางสเปกตรัม (spectrum operation) โดยใช้ฟูริเยร์อย่างเร็ว (Fast Fourier Transform) ในการคำนวณหาขนาดของคลื่น ผลของการวิจัยพบว่า การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปที่ความถี่ 1.5 กิกะเฮิร์ต ในโดเมนทางเวลา จะมีลักษณะการแพร่กระจายที่แตกต่างกันไปโดยมีองค์ประกอบของคลื่น 2 ส่วน ได้แก่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยที่ค่าของสนามไฟฟ้าจะปรากฏบริเวณที่เป็นฉนวน และจะมีค่ามากบริเวณรอยต่อของตัวนำกับฉนวน และค่าของสนามแม่เหล็กจะปรากฏบนพื้นผิวของตัวนำเท่านั้นและจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าความยาวคลื่น และจะสังเกตได้ว่าค่าของสนามแม่เหล็กจะมีค่าน้อยบริเวณตัวนำที่มีการหักงอ ซึ่งมีความสอดคล้องตามทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อนำค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์กระจัดกระจาย เพื่อแสดงคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน พบว่าผลการวิเคราะห์มีค่าความถี่ตัดที่ 1.475 กิกะเฮิร์ต มีค่าเท่ากับ -3.25 เดซิเบล (dB) และเมื่อนำผลการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของโปรแกรม Sonnet Lite พบว่ามีค่าสอดคล้องกันทุกย่านความถี่ โดยโปรแกรม Sonnet Lite มีค่าความถี่ตัดที่ 1.420 กิกะเฮิร์ต มีค่าเท่ากับ -3.01 เดซิเบล

คำสำคัญ : การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วิธีการวนรอบของคลื่น โดเมนทางเวลา

Abstract

This research paper presents an analysis of electromagnetic wave propagation of in the time domain by using Wave Iterative Method (WIM) in the teaching and research. The research tool is the simulation computer program (SCP) by using MATLAB® program. The SCP is based on the concept of incident and reflected waves which propagate the alternating between the spectrum operation and the pixels one. Both can calculate the amplitude of wave by using Fast Fourier Transform (FFT). The research results showed the distribution of electromagnetic wave occuring on the structure of the microstrip lowpass filter circuit at frequency 1.5 gigahertz (GHz) in the time domain. Looks like the spread that varies with the composition of two parts: the electric field and the magnetic field. The value of the electric field appears at the insulator and it is a great value at the interface of the conductor with insulation. The value of the magnetic field appears on the surface of the conductor only, and will vary with the wavelength and observed that the value of the magnetic field is less with the conductor bent which complies with electromagnetic theory. When, the value of the electric field and magnetic field to the analysis of scattering parameters for the features of the lowpass filter. The analysis showed that the cutoff frequency at 1.475 GHz is equal to -3.25 decibels (dB), and when the results of calculations are compared with the results of Sonnet Lite software that is well agreed the entire frequencies. The Sonnet Lite software has the cutoff frequency at 1.420 GHz is equal to -3.01 dB.

Keywords : Wave propagation, Wave iterative method, Time domain

บทนำ

การเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ามีลักษณะการจัดการเรียนการสอนที่มุ่งเน้นให้ผู้เรียนมีการเรียนรู้ทางด้านทฤษฎีควบคู่กับการปฏิบัติ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการจัดการศึกษาที่มีประสิทธิภาพและแตกต่างจากการจัดการศึกษาในสาขาอื่น ๆ เพื่อพัฒนาศักยภาพของผู้เรียนอย่างเต็มความสามารถ ส่งเสริมด้านทักษะและกระบวนการคิด เน้นการเรียนรู้จากประสบการณ์และการฝึกปฏิบัติ เพื่อให้ผู้เรียนคิดเป็น ทำเป็น และแก้ปัญหาได้ เทคโนโลยีมีส่วนช่วยที่สำคัญอย่างยิ่งในการช่วยให้ผู้เรียนมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงขึ้น โดยที่ในปัจจุบันการเรียนรู้สมัยใหม่มีแนวโน้มที่จะผนวกการสอนเชิงทฤษฎีแบบผสมผสาน มุ่งเน้นการทดลองในเชิงปฏิบัติโดยการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาจำลองผลในการทำงาน ซึ่งสามารถทำให้ผู้เรียนเข้าใจหลักการหรือทฤษฎีที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โปรแกรมคอมพิวเตอร์จัดว่าเป็นเครื่องมือสำคัญอย่างหนึ่งที่ช่วยให้ผู้เรียนในสาขาด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมและสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องได้มีโอกาสเรียนรู้ทฤษฎี ทดสอบแนวคิด พัฒนาองค์ความรู้ใหม่ ตลอดจนมีการทำงานวิจัยเชิงลึกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การศึกษาและออกแบบวงจรคลื่นระนาบไมโครเวฟมีเนื้อหาที่มุ่งเน้นถึงทฤษฎี หลักการวิเคราะห์ การคำนวณ และการออกแบบวงจรไมโครเวฟ โดยเฉพาะเนื้อหาทางด้านการออกแบบวงจรกรองความถี่ไมโครสตริป ซึ่งเป็นเนื้อหาพื้นฐานที่สำคัญสำหรับออกแบบและประยุกต์ใช้งานในด้านอุตสาหกรรม การวิเคราะห์และออกแบบวงจรดังกล่าวพบว่า มีขั้นตอนและการคำนวณในทางทฤษฎีที่ซับซ้อน อีกทั้งไม่สามารถที่จะเห็นพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดภายในวงจรได้ ดังนั้นเครื่องมือที่มีความสำคัญได้แก่ โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองที่ใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการประมวลผล ซึ่งจะมีความเร็วในการคำนวณสูง และยังสามารถนำผลการจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปคำนวณหาค่าความสัมพันธ์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงข่ายได้

จากการศึกษางานวิจัยของ Dejan V., Tosic and Milka Potrebic (2006, pp.45-54), Wolfgang Menzel (2003, pp.1312-1317), Gupta K.C., et al (2002, pp.1006-1014) และ Scott W. Wedge, David B. Rutledge (1993, pp.127-131) ได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองสำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยทางด้านวงจรไมโครเวฟ และได้มีการพัฒนาห้องปฏิบัติการเสมือนจริง (Virtual Laboratory) โดยใช้รูปแบบการคำนวณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่สูง โดยโปรแกรมดังกล่าวสามารถแสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ แอดมิตแตนซ์ และกระจัดกระจาย รวมทั้งแสดงค่าสนามแม่เหล็กบนพื้นผิวของวงจรในแต่ละความถี่ของการใช้งาน เพื่อให้ผู้เรียนได้ทดสอบทฤษฎี ทดสอบแนวคิด และพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ แต่จากผลการวิจัยดังกล่าวยังไม่มีการวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนพื้นผิวของวงจรเพื่อให้ผู้เรียนได้เข้าใจพฤติกรรมของคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงในโดเมนทางเวลา ซึ่งต่อมา Ghaneie E. and Xun Gong. (2008, pp.1-4) ได้ทำการสร้างเครื่องมือจำลองในโดเมนทางความถี่ และโดเมนทางเวลา สำหรับวิเคราะห์อุปกรณ์ไมโครเวฟในรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ ซึ่งผลการวิจัยพบว่าเครื่องมือที่นำเสนอสามารถนำไปออกแบบและวิเคราะห์วงจรไมโครเวฟทั้งในขอบเขตของเวลา และขอบเขตของความถี่ได้ โดยที่สามารถนำไปใช้ประกอบการสอนรายวิชาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและไมโครเวฟได้ แต่ยังขาดการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนทางเวลา สำหรับการศึกษาและการวิจัยวงจรกรองความถี่ไมโครสตริปต่อไป

วิธีการวิจัย

การวิเคราะห์สมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

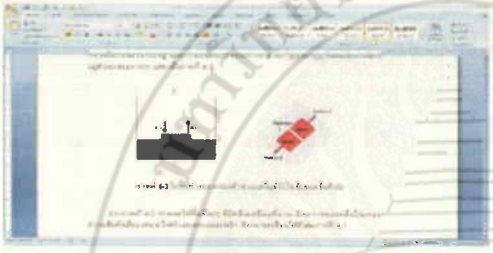
1. การวิเคราะห์สมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การจำลองการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีการวนรอบของคลื่น (Khamkleang S. and Akatimagool S., 2009, pp.830-833) ซึ่งอาศัยหลักการของคลื่นที่ตกกระทบ (Incident Wave) และคลื่นสะท้อนกลับ (Reflected Wave) บนโครงสร้างของวงจรคลื่นระนาบดังรูปที่ 1

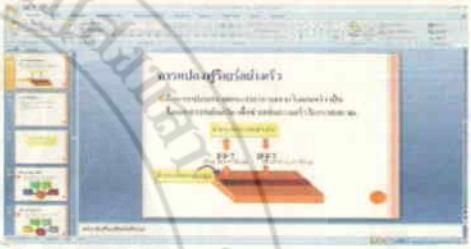
พิจารณาตัวกระทำทางพิกเซลจากรูปที่ 1 กำหนดให้พื้นที่ใด ๆ ที่มีคลื่นเคลื่อนที่ผ่านสมการของคลื่นในเทอมความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{A}_i = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(\vec{E} + Z_0\vec{H}) \quad \text{และ} \quad \vec{B}_i = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(\vec{E} - Z_0\vec{H}) \tag{1}$$

โดยที่ $\vec{A}$ คือ คลื่นตกกระทบ และ $\vec{B}$ คือ คลื่นสะท้อนกลับ i คือชั้นโครงสร้างของวงจร โดยที่ $\vec{E}$ และ $\vec{H}$ แทนเวคเตอร์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ของคลื่น โดยกระบวนการคำนวณจะใช้สมการตัวกระทำทางพิกเซล (pixel operation) และสมการตัวกระทำทางสเปกตรัม (spectrum operation) โดยมีการเชื่อมโยงระหว่างทั้งสองโดเมนโดยใช้ฟูริเยร์อย่างเร็ว (Fast Fourier Transform) แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 วงจรคลื่นระนาบในกล่องตัวนำ



รูปที่ 2 กระบวนการของการคำนวณ

จากความสัมพันธ์ของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับในสมการที่ (1) สามารถใช้หลักการของเงื่อนไขขอบนำมาวิเคราะห์หาสมการตัวกระทำทางพิกเซลได้ดังนี้

บนพื้นผิวตัวนำ (Metal) มีค่า $$S_M = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

บนพื้นผิวฉนวน (Dielectric) มีค่า $$S_D = \begin{bmatrix} \frac{1-P^2}{1+P^2} & \frac{2P}{1+P^2} \\ \frac{2P}{1+P^2} & \frac{P^2-1}{1+P^2} \end{bmatrix} \tag{3}$$

และบนพื้นผิวแหล่งจ่าย (Source) มีค่า

$$S_S = \begin{bmatrix} \frac{-1+P_1-P_2}{1+P_1+P_2} & \frac{2Q}{1+P_1+P_2} \\ \frac{2Q}{1+P_1+P_2} & \frac{-1-P_1+P_2}{1+P_1+P_2} \end{bmatrix} \tag{4}$$

เมื่อ $P = \sqrt{\frac{Z_{01}}{Z_{02}}}$, $Q = \frac{Z_0}{\sqrt{Z_{01}Z_{02}}}$, $P_1 = \sqrt{\frac{Z_0}{Z_{01}}}$, $P_2 = \sqrt{\frac{Z_0}{Z_{02}}}$ และ 1, 2 คือชั้นของตัวกลางด้านบน และตัวกลางด้านล่าง

พิจารณาตัวกระทำทางสเปกตรัม โดยพิจารณาคลื่นที่สะท้อนออกจากผิวตัวนำ ดังรูปที่ 2 จะเปลี่ยนสภาพอยู่ในรูปของตัวกระทำทางสเปกตรัมโดยใช้การแปลงสภาพฟูริเยร์อย่างเร็ว *(FFT)* และคลื่นจะแพร่กระจายไปสะท้อนกลับที่พนังด้านบนของกล่องตัวนำด้วยสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $\Gamma_{m,n}$ ตามสมการดังนี้

$$\Gamma_{mn}^{TE/TM} = \frac{Y_0 - Y_{mn}^{TE/TM}}{Y_0 + Y_{mn}^{TE/TM}} \quad \text{เมื่อ} \quad Y_{m,n}^{TE} = \frac{\gamma_{m,n}}{j\omega\mu}, \quad Y_{m,n}^{TM} = \frac{j\omega\varepsilon}{\gamma_{m,n}} \qquad (5)$$

โดยที่ m,n คือ โหมด (Mode) ของคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง

จากสมการข้างต้นสามารถนำมาคำนวณหาค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแต่ละความถี่ (f) บนตัวกระทำทางพิกเซลในแกน x,y ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\vec{E}^{I}(x,y) = \sqrt{Z_0}(\vec{A}+\vec{B}) \quad \text{และ} \quad \vec{H}^{I}(x,y) = \frac{1}{\sqrt{Z_0}}(\vec{A}-\vec{B}) \qquad (6)$$

ดังนั้นจะเห็นว่า ในแต่ละความถี่ (f) ของการคำนวณ สามารถแสดงค่าของสนามบนวงจรไมโครเวฟได้ นอกจากนั้นสามารถวิเคราะห์วงจรซึ่งแทนวงจรด้วยข่ายงานสองขั้ว (Two ports network) โดยจะได้คำตอบในรูปของพารามิเตอร์แบบอิมพีแดนซ์ (Z) หรือแบบแอดมิตแตนซ์ (Y) หรือแบบสแกตเตอริ่ง (S) โดยพิจารณาค่าจากจำนวนพิกเซลพื้นที่ทั้งหมดของแหล่งจ่ายในแต่ละพอร์ต ตามสมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$[Z] = [Y]^{-1} = \begin{bmatrix} \sum_{x,y}\left(\frac{E_{x,y}(1)}{H_{x,y}(1)}\right) & \sum_{x,y}\left(\frac{E_{x,y}(1)}{H_{x,y}(2)}\right) \\ \sum_{x,y}\left(\frac{E_{x,y}(2)}{H_{x,y}(1)}\right) & \sum_{x,y}\left(\frac{E_{x,y}(2)}{H_{x,y}(2)}\right) \end{bmatrix} \qquad (7)$$

และจากสมการที่ (7) สามารถหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์แบบสแกตเตอริ่ง มีดังนี้

$$[S] = [Z-I][Z+I]^{-1} \quad \text{โดยที่} \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad (8)$$

2. การวิเคราะห์สมการคำนวณการแพร่กระจายคลื่นในขอบเขตของเวลา

จากสมการที่ (6) เป็นสมการแสดงการคำนวณสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กบนพื้นที่วงจรตัวนำในแต่ละรอบของการคำนวณที่ความถี่ใด ๆ ซึ่งในแต่ละความถี่จะมีเวลาในการคำนวณที่ต่างกัน

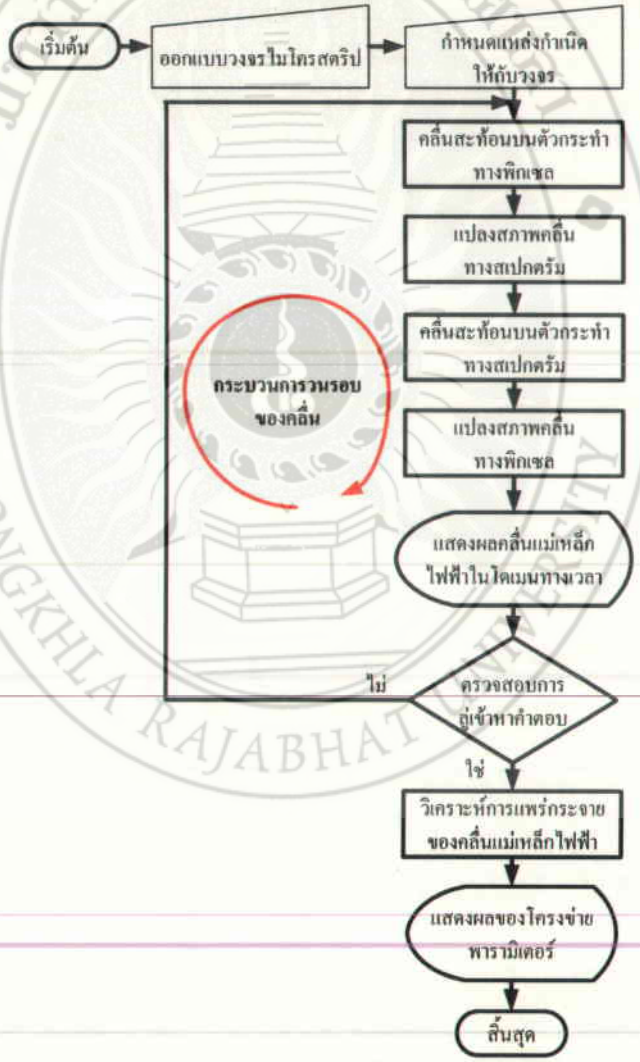
เนื่องมาจากความละเอียดของพิกเซลในแต่ละวงจรแตกต่างกัน โดยที่สามารถแสดงการคำนวณสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กตามคาบเวลาที่เกิดขึ้นจากการวนรอบของคลื่นที่ความถี่ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\vec{E}^{f}_{(x,y)t} = \sqrt{Z_0}(\vec{A}+\vec{B}) \quad \text{และ} \quad \vec{H}^{f}_{(x,y)t} = \frac{1}{\sqrt{Z_0}}(\vec{A}-\vec{B}) \qquad (9)$$

โดยที่ f คือความถี่ของการคำนวณ และ t คือเวลาแพร่กระจายของคลื่น

3. กระบวนการคำนวณโดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่น

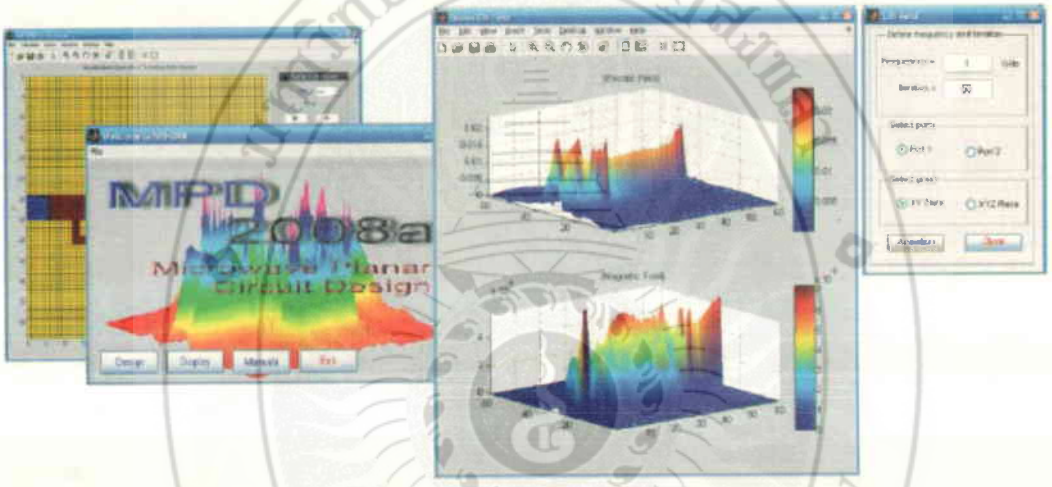
จากการวิเคราะห์สมการสำหรับการวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำมาออกแบบกระบวนการคำนวณสำหรับวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กระบวนการคำนวณการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่น

4. การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะอาศัยหลักการแพร่กระจายของคลื่นร่วมกับวิธีการวนรอบแสดงดังรูปที่ 3 ที่สามารถติดต่อกับผู้ใช้งานโดยใช้รูปแบบของ Graphic User Interface ภายใต้โปรแกรม MATLAB® ขั้นตอนการใช้งานมีดังนี้ เริ่มต้นด้วยการเปิดหน้าต่างหลักดังรูปที่ 4 (ก) ต่อไป เลือกปุ่ม Design จะปรากฏหน้าต่างการออกแบบวงจร และสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นของวงจรที่ออกแบบได้ เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์เรียบร้อย ให้กดปุ่ม Analyze โปรแกรมจะทำการประมวลผลตามกระบวนการของวิธีการวนรอบของคลื่นและสามารถแสดงผล สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นผิวของวงจรเป็นภาพเคลื่อนไหว (Animation) ตามการเปลี่ยนแปลงของเวลาแสดงดังรูปที่ 4 (ข)



(ก) หน้าต่างเมนูหลักและหน้าต่างการออกแบบ (ข) หน้าต่างการแสดงภาพเคลื่อนไหวเปลี่ยนแปลงตามเวลา

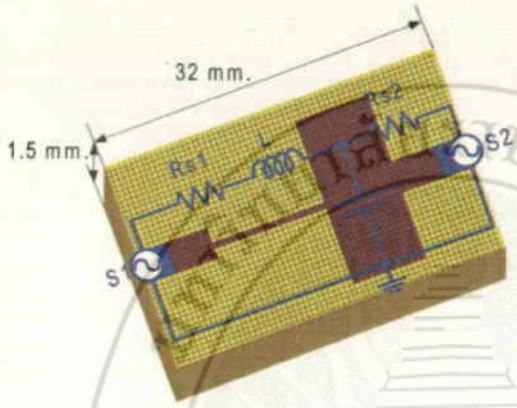
รูปที่ 4 เครื่องมือการจำลองการแพร่กระจายของคลื่น และการวิเคราะห์วงจรคลื่นระนาบไมโครเวฟ

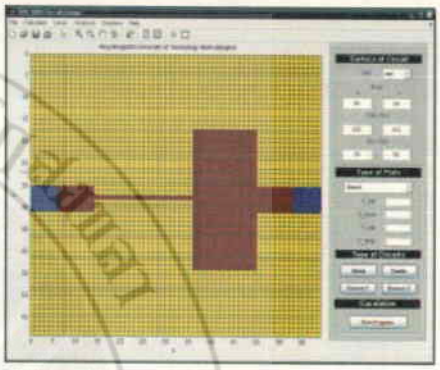
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างของวงจรกรองความถี่ไมโครสตริปในบทความนี้จะยกตัวอย่างการแพร่กระจายของคลื่นบนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปที่ความถี่ 1.5 กิกะเฮิร์ต แบบสเต็บอิมพีแดนซ์ (step impedance) แสดงดังรูปที่ 5

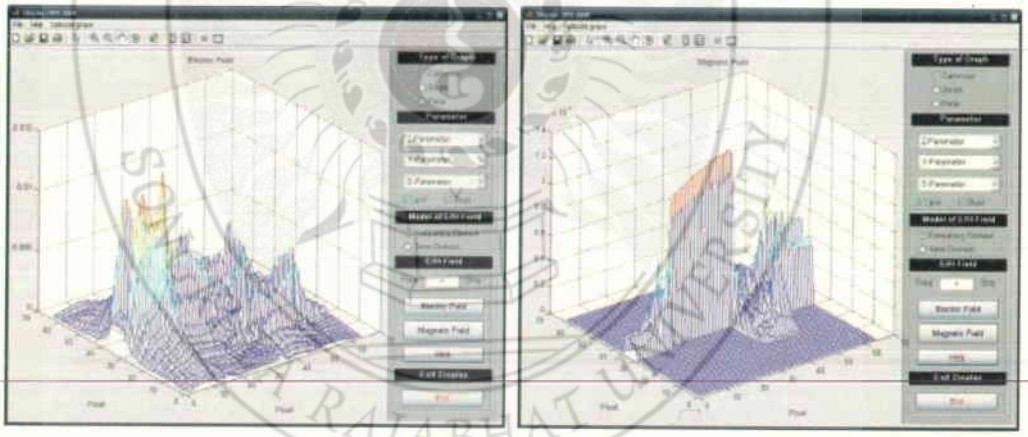
ขั้นตอนการวิเคราะห์ เริ่มต้นจากออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Jia-Shen G. Hong and M.J. Lancaster., 2001, pp.109-112) บนโครงสร้างของกล่องตัวนำขนาด 32x32 ตารางมิลลิเมตร โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 ที่มีค่า ε_r = 4.2 ค่าความหนาของแผ่นวงจรพิมพ์เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร มีค่าความกว้าง (W) ของสายไมโครสตริปดังต่อไปนี้ $W_1 = W_4 = 3$ มิลลิเมตร $W_2 = 0.5$ มิลลิเมตร และ $W_3 = 14$ มิลลิเมตร และมีความยาว (ℓ) ของสายดังนี้ $\ell_1 = 11$ มิลลิเมตร และ $\ell_2 = 7$ มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 6 โดยจะทำการวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 1-3 กิกะเฮิร์ต โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงตัวอย่างที่ความถี่ 1 กิกะเฮิร์ต โดยใช้สมการที่ (6) ในการคำนวณ จากรูปที่ 7 (ก) เป็นการ

แสดงรูปคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนโครงสร้างของวงจรกรองความถี่ต่ำไมโครสตริป โดยที่ค่าของสนามไฟฟ้าจะปรากฏบริเวณที่เป็นฉนวนและจะมีค่ามากบริเวณรอยต่อของตัวนำกับฉนวน และรูปที่ 7 (ข) แสดงรูปคลื่นสนามแม่เหล็กบนโครงสร้างของวงจรโดยที่ค่าของสนามแม่เหล็กจะปรากฏบนพื้นผิวของตัวนำเท่านั้นและจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าความยาวคลื่น และจะสังเกตได้ว่าค่าของสนามแม่เหล็กจะมีค่าน้อยบริเวณตัวนำที่มีการหักงอ ซึ่งมีความสอดคล้องตามทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า





รูปที่ 5 วงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรเทียบเคียง **รูปที่ 6** การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริป



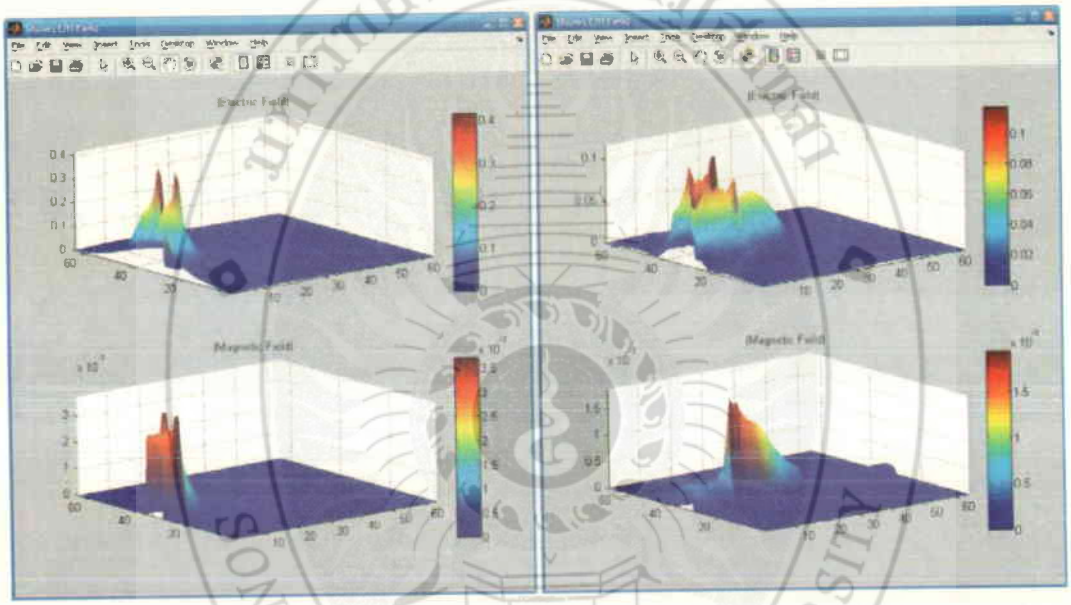
(ก) สนามไฟฟ้า (ข) สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 7 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1 กิกะเฮิร์ต ของวงจรกรองความถี่ต่ำไมโครสตริป

ต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นในโดเมนทางเวลาโดยใช้สมการที่ (9) ในการคำนวณ จากรูปที่ 8 แสดงการแพร่กระจายของคลื่นที่ความถี่ 1.5 GHz ที่เวลา 118 nS และเวลา 473 nS ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์จะสังเกตได้ว่าการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่เวลา 118 nS จะมีค่าการแพร่กระจายของคลื่นอยู่บนพื้นผิวของวงจรใกล้กับแหล่งจ่ายที่ 1 และเมื่อเวลาผ่านไป (118 nS ถึง 5.97 μS) พฤติกรรมของคลื่นจะมีการแพร่กระจายทั่วบริเวณพื้นผิว

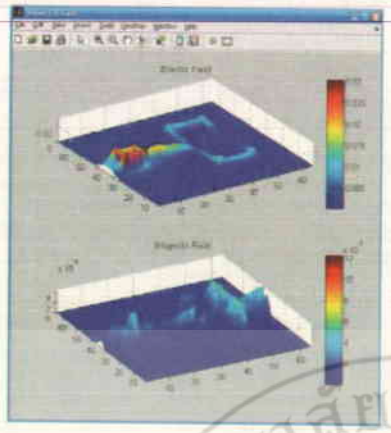
ของวงจรและจะมีพฤติกรรมหยุดนิ่ง (Standing Wave) เมื่อกระบวนการของการคำนวณมีค่าลู่เข้าหาคำตอบ หรือคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะทำให้ค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีความถูกต้องแสดงดังรูปที่ 9

เมื่อนำผลของคลื่นที่แพร่กระจายบนพื้นผิวของวงจรมาคำนวณเพื่อแสดงคุณสมบัติของวงจรตามสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ จะได้ผลของพารามิเตอร์กระจัดกระจาย แสดงดังรูปที่ 10 โดยผลการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลอง (MPD2008a) มีค่าความถี่ตัดที่ 1.475 กิกะเฮิร์ต มีค่าเท่ากับ -3.25 เดซิเบล (dB) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่ในการออกแบบที่ 1.5 กิกะเฮิร์ต และเมื่อนำผลการคำนวณไปเปรียบเทียบกับโปรแกรม Sonnet Lite พบว่ามีค่าสอดคล้องกันทุกย่านความถี่ โดยโปรแกรม Sonnet Lite มีค่าความถี่ตัดที่ 1.420 กิกะเฮิร์ต มีค่าเท่ากับ -3.01 เดซิเบล

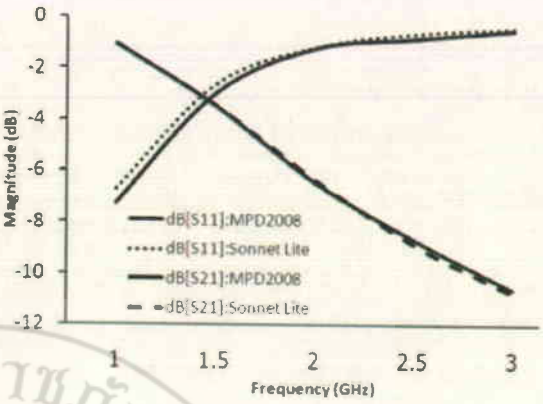


รูปที่ 8 การแพร่กระจายของคลื่นที่ความถี่ 1.5 GHz ที่เวลา 118 nS และเวลา 473 nS ตามลำดับ

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY



รูปที่ 9 การแพร่กระจายของคลื่นที่ความถี่ 1.5 GHz ที่เวลา 5.97 μs



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์กระจัดกระจายระหว่าง MPD2008a กับ SONNET Lite

สรุป

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนทางเวลา โดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่น สำหรับการศึกษาและการวิจัยวงจรกรองความถี่ไมโครสตริป เครื่องมือการวิจัย ได้แก่ โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองหรือเรียกว่า MPD 2008a ผลการวิจัยสรุปได้ว่า การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างของวงจรกรองความถี่ไมโครสตริปในโดเมนทางเวลาจะมีลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นที่ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยที่ค่าของสนามไฟฟ้าจะปรากฏบริเวณที่เป็นฉนวน และจะมีค่ามากบริเวณรอยต่อของตัวนำกับฉนวน และค่าของสนามแม่เหล็กจะปรากฏบนพื้นผิวของตัวนำเท่านั้นและจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าความยาวคลื่น และจะสังเกตได้ว่าค่าของสนามแม่เหล็กจะมีค่าน้อยบริเวณตัวนำที่มีการหักงอ และเมื่อนำค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์กระจัดกระจาย เพื่อแสดงคุณสมบัติของวงจร พบว่าผลการวิเคราะห์มีค่าสอดคล้องกับผลการคำนวณของโปรแกรม Sonnet Lite

จากผลของการวิจัยสามารถนำไปใช้ประกอบการสอนสำหรับการศึกษาและการวิจัยทางด้านการออกแบบวงจรกรองความถี่ไมโครสตริป เพื่อให้ผู้เรียนและผู้วิจัยได้เข้าใจพฤติกรรมของคลื่นที่เกิดขึ้นบนวงจรกรองความถี่ไมโครสตริป และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการซื้อเครื่องมือมาจำลองการทำงานของวงจร และยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการคำนวณอื่น ๆ อีกต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Tosic, D.V., Potrebic, M. (2006). Software tools for research and education. **Microwave Review**, 12(2), 45-54.

Ghaneie, E. & Gong, X. (2008). A time-domain/frequency-domain simulation tool for microwave component analysis in microwave engineering courses. **Antennas and Propagation Society International Symposium.** 45, 1-4.

Gupta, K.C., Itoh, T., & Oliner, A.A. (2002). Microwave and RF education-past, present, and future. **Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions**, 50(3), 1006-1014.

Khamkleang S. and Akatimagool S. (2009). Microwave planar circuit design tool in the teaching of microwave engineering. **Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI International Conference on 02,** 830-833.

Wedge, S.W. & Rutledge, D.B. (1993). Wave computation for microwave education. **IEEE Transactions on Education.** 36(1), 127-131.

Menzel, W. (2003). Microwave education supported by animations of wave propagation effects. **Microwave Theory and Techniques 51(4),** 1312-1317.

Hong, J.G. & Lancaster, M.J. (2001). **Microstrip filters for RF/Microwave applications**. New York : John Wiley & Sons.