



## การพัฒนาอัลกอริทึมแบบใหม่ของวิธีการวนรอบคลื่นสำหรับวงจรไมโครเวฟ ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

**พินิจ เนื่องภิรมย์**

นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

**สมศักดิ์ อรรถทิมากุล\***

รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 3322 อีเมล: ssa@kmutnb.ac.th

รับเมื่อ 7 ตุลาคม 2557 ตอรับเมื่อ 10 เมษายน 2558 เผยแพร่ออนไลน์ 24 มิถุนายน 2558

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.04.002 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาอัลกอริทึมแบบใหม่ของวิธีการวนรอบคลื่นสำหรับวิเคราะห์วงจรไมโครเวฟในท่อนำคลื่น ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรไมโครเวฟต่างๆ การพัฒนาในรูปแบบของโปรแกรมจำลองจะอาศัยหลักการของทฤษฎีสายส่ง พารามิเตอร์โครงข่าย ทฤษฎีเงื่อนไขขอบและเชื่อมโยงกับผู้ใช้ผ่านฟังก์ชัน GUI ของโปรแกรม MATLAB ในงานวิจัยนี้เสนอตัวอย่างของการวิเคราะห์วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุและวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำในท่อนำคลื่น ซึ่งผลของโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถวิเคราะห์รูปร่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณวงจรช่องแคบได้อย่างถูกต้อง และผลการเปรียบเทียบการตอบสนองทางความถี่ของวงจรช่องแคบระหว่างโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้น วิธีคำนวณทางทฤษฎี และโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันและมีค่าความคลาดเคลื่อนของการประมวลผลไม่เกิน  $\pm 1.5\%$

**คำสำคัญ:** โปรแกรมจำลอง อัลกอริทึม วิธีการวนรอบคลื่น วงจรช่องแคบในท่อนำคลื่น



## **Development of a Novel Algorithm for Wave Iterative Method for Rectangular Waveguide Microwave Circuits**

***Pinit Nuangpirom***

*Student, Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mounkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand*

***Somsak Akatimagool\****

*Associate Professor, Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mounkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand*

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

Received 7 October 2014; Accepted 10 April 2015; Published online: 24 June 2015

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.04.002 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### **Abstract**

This research presents the development of a novel algorithm for Wave Iterative Method (WIM) to apply in waveguide microwave circuits. WIM is a numerical modeling for electromagnetic field analysis on various microwave circuits. Principles of transmission line, network parameter and boundary condition are applied to WIM simulation based on the GUI function and m-file of MATLAB program. The simulated results shown that the electric and magnetic field can be analyzed correctly. The frequency response comparison among with developed WIM simulation, theories and the classical simulation agrees well at less than  $\pm 1.5\%$  of computation error.

**Keywords:** Simulation Program, Algorithm, Wave Iterative Method, Waveguide Iris

## 1. บทนำ

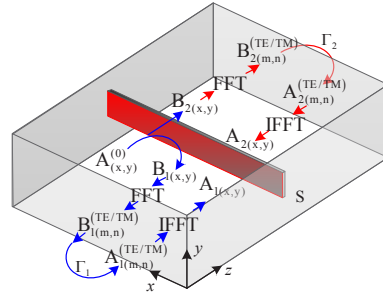
เทคโนโลยีการสื่อสารมีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน โดยเฉพาะการใช้งานทางด้านโทรคมนาคมที่ช่วยลดระยะเวลา และระยะทางของการติดต่อสื่อสาร สามารถประยุกต์เป็นนวัตกรรมสมัยใหม่ เช่น ระบบโทรศัพท์ผ่านช่องสัญญาณดาวเทียม ระบบแผนที่นำทาง และระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น สำหรับระบบสื่อสารดาวเทียมที่นิยมใช้งานในปัจจุบันมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ เครื่องรับ เครื่องส่ง ระบบควบคุมและจานดาวเทียม นอกจากนี้แล้วอุปกรณ์ที่นำคลื่น (Waveguide) เป็นส่วนที่มีความสำคัญ เนื่องจากท่อนำคลื่นเป็นสายส่งชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับเป็นตัวกลางในการส่งผ่านพลังงานระหว่างระบบวงจรขยายกับสายอากาศที่มีกำลังไฟฟ้าสูง ส่งผลให้อุปกรณ์สายส่งต้องทนกำลังไฟฟ้าสูงได้ด้วย [1] ดังนั้นท่อนำคลื่นจึงมีความเหมาะสมสำหรับการส่งสัญญาณในระบบดาวเทียม ที่ผ่านมามีนักวิจัยให้ความสนใจในการพัฒนางจรไมโครเวฟในท่อนำคลื่นในรูปแบบต่างๆ สำหรับสร้างเป็นวงจรกรองความถี่เพื่อใช้ควบคุมหรือเลือกย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานในระบบการสื่อสารดาวเทียม โครงสร้างที่นิยมใช้งานส่วนใหญ่เป็นวงจรช่องแคบหรือไอริส (Iris) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะบางๆ ที่มีขนาดความหนาแน่นน้อยกว่าค่าความยาวคลื่นมากๆ วางขวางที่ผนังด้านในของท่อนำคลื่น การวางตัวของไอริสมีหลายรูปแบบ แต่ที่ใช้งานมากที่สุดเป็นการวางแผ่นโลหะติดที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นและมีลักษณะขนานกับทิศทางของสนามไฟฟ้า (E) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านและเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับวงจรตัวเหนี่ยวนำที่ต่อแบบขนานนั่นเอง [2] ซึ่งสามารถใช้ออกแบบเป็นวงจรกรองความถี่ได้หลายชนิด [3] ได้แก่ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองความถี่สูงผ่าน วงจรกรองความถี่แถบผ่าน เป็นต้น

สำหรับการพัฒนางจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น นักวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้โปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทำงาน เช่น โปรแกรม High Frequency Structure Simulator (HFSS) ที่สามารถ

แสดงรูปร่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณโครงสร้างของวงจร และสามารถประยุกต์เป็นสื่อการเรียนการสอนหรือพัฒนาต่อยอดในงานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4] หรือโปรแกรม COMSOL Multiphysics [5] และโปรแกรม Computer Simulation Technology (CST) [6] สำหรับวิเคราะห์วงจรไมโครเวฟที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างการทำงานของโปรแกรมจำลองดังกล่าวมีการใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในหลายรูปแบบ เช่น Finite Element Method (FEM) [5], Transmission Line Modeling (TLM) Method [7], Finite Difference Time Domain (FDTD) [8] และ Method of Moments (MoM) [9] ซึ่งวิธีเชิงตัวเลขเหล่านั้นต่างมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะของรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้งาน และรูปแบบโครงสร้างของโปรแกรมที่สร้างขึ้น

ช่วงเวลาหลายๆ ปีที่ผ่านมา มีนักวิจัยได้พัฒนาวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการวิเคราะห์วงจรไมโครเวฟ ที่เรียกว่าวิธีการวนรอบของคลื่น (Wave Iterative Method หรือ WIM) โดยใช้หลักการของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนกลับ และคลื่นส่งผ่าน ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่ใช้ทฤษฎีของพารามิเตอร์กระจายกระจายเงื่อนไขขอบ และการหาผลรวมของคลื่นในตัวกลางในท่อนำคลื่นที่อาศัยเครื่องมือการแปลงสภาพฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ระหว่างโดเมนทางสเปกตรัม (Spectrum Domain) และโดเมนจริง (Real Domain) [10] โดยวิธีการวนรอบของคลื่นดังกล่าวได้มีการพัฒนาสำหรับวิเคราะห์วงจรคลื่นระนาบที่ให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับโปรแกรมเชิงพาณิชย์ และการวัดจากวงจรของจริง [11], [12] และประยุกต์ใช้สำหรับวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น [2], [3], [13], [14] แต่จากการศึกษาพบว่าวิธีการวนรอบของคลื่นที่นำเสนอมีโครงสร้างของการทำงานที่ซับซ้อน วิธีการคำนวณไม่ได้หาค่าที่เหมาะสมที่สุด การหาคำตอบที่ถูกต้องจะขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานเป็นหลัก และสามารถวิเคราะห์ให้ได้เฉพาะวงจรช่องแคบที่มีโครงสร้างบางรูปแบบเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะพัฒนาอัลกอริทึมแบบใหม่

ของการวนรอบคลื่นสำหรับวิเคราะห์วงจรไมโครเวฟให้มีรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ที่กะทัดรัด มีการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และสามารถอธิบายหลักการได้อย่างเป็นขั้นตอน สำหรับวิเคราะห์วงจรไมโครเวฟในท่อนำคลื่น จากนั้นทำการทดสอบและหาประสิทธิภาพของรูปแบบที่พัฒนาขึ้นโดยการเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณทางทฤษฎีและโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์

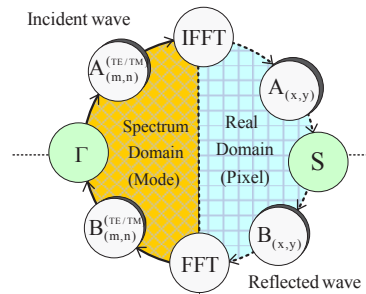


รูปที่ 1 หลักการของวิธีการวนรอบของคลื่น

## 2. วิธีการวนรอบของคลื่น

วิธีการวนรอบของคลื่น (Wave Iterative Method) พัฒนามาจาก Wave Concept Iterative Procedure (WCIP) [15] ใช้หลักการของคลื่นที่แพร่กระจายบนโครงสร้างของวงจรช่องแคบ ที่แยกเป็นส่วนตัวนำ (Conductor) และส่วนไดอิเล็กทริก (Dielectric) ที่เป็นส่วนของอากาศระหว่างตัวนำในท่อนำคลื่น โดยมีการคำนวณหาความสัมพันธ์ของคลื่นตกกระทบ (Incident Waves) คลื่นสะท้อนกลับ (Reflected Waves) และคลื่นส่งผ่าน (Transmitted Waves) ซึ่งรูปแบบการคำนวณจะถูกแบ่งตามกายภาพของคลื่นในปริมาณทางเวกเตอร์ที่ปรากฏในพื้นที่ต่างๆ ออกเป็น 2 โดเมน ได้แก่ โดเมนจริง (Real Domain) หรือพิกเซล (Pixel) และโดเมนสเปกตรัม (Spectrum Domain) หรือโหมด (Modes) ดังแสดงการแพร่กระจายของคลื่นในรูปที่ 1

หลักการของวิธีการวนรอบของคลื่นในรูปที่ 1 เริ่มจากการกำหนดคลื่นตกกระทบเริ่มต้น ( $A_{(x,y)}^{(0)}$ ) ในรูปแบบของโดเมนจริง กระทำกับค่าพารามิเตอร์การจัดกระจายของวงจรช่องแคบ เกิดเป็นคลื่นสะท้อนกลับ และคลื่นส่งผ่าน ( $B_{i(x,y)}$ ) และถูกแปลงให้เป็นคลื่นในโดเมนสเปกตรัม ( $B_{i(m,n)}^{(TE/TM)}$ ) ด้วยการใช้ฟังก์ชันการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) จากนั้นคลื่นเหล่านี้จะเกิดการสะท้อนกลับ ( $A_{i(m,n)}^{(TE/TM)}$ ) ด้วยตัวกระทำของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection Coefficient) ที่อยู่ในรูปโดเมนสเปกตรัมที่ทางเข้าของท่อนำคลื่นทั้งสองด้าน และก่อนที่คลื่นจะปรากฏบนวงจรช่องแคบ จำเป็นต้องมีการแปลงสภาพเป็นโดเมนจริง ( $A_{i(x,y)}$ ) ด้วยฟังก์ชันของการแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Inverse

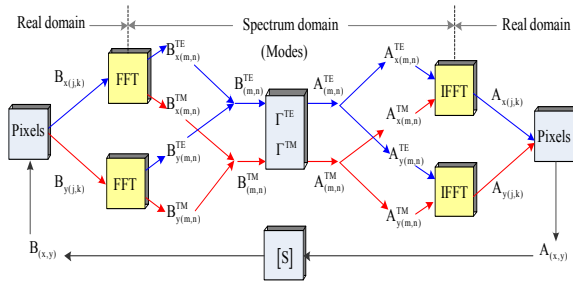


รูปที่ 2 กระบวนการวนรอบของคลื่น

Fast Fourier Transform: IFFT) ซึ่งกระบวนการในการแพร่กระจายของคลื่นจะกระทำวนรอบซ้ำๆ จนกว่าผลลัพธ์จะเข้าสู่คำตอบ (Convergence) ที่ถูกต้อง

กระบวนการแพร่กระจายของคลื่นที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดคลื่นตกกระทบเริ่มต้น ( $A_{(x,y)}^{(0)}$ ) ในโดเมนจริงที่เกิดมาจากแหล่งจ่ายในท่อนำคลื่น
- 2) คำนวณคลื่นสะท้อนกลับ ( $B_{(x,y)}$ ) โดยใช้สมการพารามิเตอร์การจัดกระจาย (S):  $B_{(x,y)} = [S](A_{(x,y)})$
- 3) แปลงคลื่นสะท้อนกลับในโดเมนจริงเป็นโดเมนสเปกตรัมโดยใช้ FFT:  $B_{(m,n)}^{(TE/TM)} = FFT(B_{(x,y)})$
- 4) คำนวณคลื่นตกกระทบโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ ( $\Gamma$ ):  $A_{(m,n)}^{(TE/TM)} = [\Gamma](B_{(m,n)}^{(TE/TM)})$
- 5) แปลงคลื่นจากโดเมนสเปกตรัมเป็นโดเมนจริงโดยใช้ IFFT:  $A_{(x,y)} = IFFT(A_{(m,n)}^{(TE/TM)})$
- 6) ทำซ้ำกระบวนการที่ 2-5 จนกว่าผลลัพธ์จะเข้าสู่คำตอบ (Convergence) ที่ถูกต้อง แสดงดังรูปที่ 2



**รูปที่ 3** กระบวนการของการคำนวณด้วยวิธีการวนรอบของคลื่น

ขั้นตอนของกระบวนการวนรอบคลื่น สามารถแสดงรายละเอียดในความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังแสดงในรูปที่ 3

**2.1 การกำหนดคลื่นของแหล่งจ่าย**

คลื่นตกกระทบเริ่มต้นในโดเมนจริง สามารถหาขนาดของปริมาณทางเวกเตอร์ในทิศทางใดๆ ได้ดังนี้

$$A_x^{(0)} = \sqrt{\frac{2}{ab}} \cos \frac{\pi x}{a}, A_y^{(0)} = \sqrt{\frac{2}{ab}} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (1)$$

เมื่อ a คือความกว้างและ b คือความสูงของท่อนำคลื่น ส่วนตัวแปร x และ y จะเขียนในรูปของสมการเมทริกซ์ดังนี้

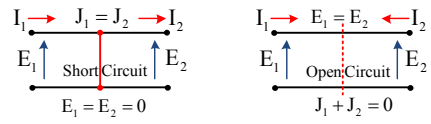
$$x = \left( \frac{a}{2m} : \frac{a}{m} : a \right), y = \left( \frac{b}{2n} : \frac{b}{n} : b \right) \quad (2)$$

และตัวแปร m, n คือจำนวนโหมด (m × n) ที่กำหนด

**2.2 การคำนวณคลื่นสะท้อนกลับ**

คลื่นสะท้อนกลับจะถูกคำนวณจากคลื่นตกกระทบที่กระทำกับคุณสมบัติของโครงสร้างของวงจรช่องแคบ ในรูปของพารามิเตอร์กระจาย (S Parameter) ดังสมการที่ (3)

$$B_{(x,y)} = [S](A_{(x,y)}) \quad (3)$$



(ก) ตัวนำ (ข) ไดอิเล็กทริก  
**รูปที่ 4** วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของวงจรช่องแคบ

โดยที่พารามิเตอร์กระจายกระจายของวงจรช่องแคบ จะแยกพิจารณาเป็น 2 กรณี ได้แก่ ส่วนตัวนำ และส่วนของช่องว่างไดอิเล็กทริกหรืออากาศ

**กรณีที่ 1** พิจารณาในส่วนของตัวนำ (Conductor: C) ในวงจรช่องแคบ พบว่าเงื่อนไขขอบที่บริเวณรอยต่อของตัวกลางที่ 1 และ 2 มีสนามไฟฟ้า  $E_1 = E_2 = 0$  สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูปของพารามิเตอร์กระจายได้ดังนี้

$$[S_c] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

**กรณีที่ 2** พิจารณาในส่วนของไดอิเล็กทริก (Dielectric: D) พบว่าเงื่อนไขขอบบริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางที่ 1 และ 2 มีค่าสนามไฟฟ้า  $E_1 = E_2$  และความหนาแน่นกระแส  $J_1 + J_2 = 0$  สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

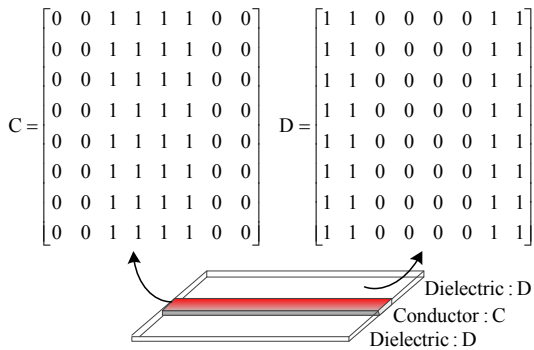
$$[S_d] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

พิจารณาสมการที่ (4) และที่ (5) สามารถนำมารวมกัน และเขียนเป็นสมการของพารามิเตอร์กระจายได้ดังนี้

$$[S] = [S_c + S_d] = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

และเขียนสมการความสัมพันธ์ของคลื่นทั้งหมดได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} B_{1x,y} \\ B_{2x,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C & D \\ D & -C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{1x,y} \\ A_{2x,y} \end{bmatrix} \quad (7)$$



รูปที่ 5 ตัวอย่างฟังก์ชัน C และ D ขนาด  $8 \times 8$  พิกเซล

ทั้งนี้สมการของฟังก์ชัน C เป็นโครงสร้างของวงจรถ่วงแคบที่พิจารณาในส่วนของตัวนำ โดยที่ถ้ามีค่า “1” หมายถึงพื้นที่ตัวนำ และ “0” หมายถึงพื้นที่ไม่ใช่ตัวนำ และฟังก์ชัน D เป็นส่วนของไดอิเล็กตริก โดยที่ถ้ามีค่า “1” หมายถึงพื้นที่ไดอิเล็กตริก และ “0” หมายถึงพื้นที่ไม่ใช่ไดอิเล็กตริก และสามารถเขียนในรูปแบบของสมการเมทริกซ์ (C, D) ที่มีจำนวนแถวและคอลัมน์เท่ากับจำนวนพิกเซล (M, N) กรณีตัวอย่างของฟังก์ชันขนาด  $8 \times 8$  พิกเซล ดังแสดงในรูปที่ 5

### 2.3 การแปลงโดเมนจริงเป็นโดเมนสเปกตรัม

คลื่นสะท้อนกลับในโดเมนจริง จะถูกแปลงให้เป็นโดเมนสเปกตรัมของโหมด  $TE_{m,n}$  และ  $TM_{m,n}$  โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สามารถเขียนสมการคลื่นในทิศทางของ x ได้ดังนี้

$$B_{x(m,n)}^{TE/TM} = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N B_{x(j,k)} \cos\left(\frac{m\pi x_j}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y_k}{b}\right) \quad (8)$$

และสมการคลื่นในทิศทางของ y สามารถเขียนได้ดังนี้

$$B_{y(m,n)}^{TE/TM} = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N B_{y(j,k)} \sin\left(\frac{m\pi x_j}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y_k}{b}\right) \quad (9)$$

ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ของคลื่นในโดเมนสเปกตรัมโดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} B_{x(m,n)}^{TE} \\ B_{y(m,n)}^{TM} \end{bmatrix} = Q_{m,n} \begin{bmatrix} n/b & -m/a \\ m/a & n/b \end{bmatrix} FFT \begin{bmatrix} B_{x(m,n)}^{TE/TM} \\ B_{y(m,n)}^{TE/TM} \end{bmatrix} \quad (10)$$

เมื่อ M, N หมายถึงขนาดของพิกเซล m, n หมายถึงลำดับของโหมด a, b หมายถึง ขนาดของท่อนำคลื่น และ

$$Q_{m,n} = \sqrt{\frac{ab}{2\Phi_{m,n}}} \frac{1}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}}, \Phi_{m,n} = \begin{cases} 2 & \text{if } m, n \neq 0 \\ 1 & \text{if } m, n = 0 \end{cases}$$

### 2.4 การคำนวณคลื่นตกกระทบ

คลื่นสะท้อนกลับจากวงจรถ่วงแคบในโดเมนสเปกตรัม จะแพร่กระจายย้อนกลับมาที่ทางเข้าและทางออกของท่อนำคลื่นทั้งสองด้าน จะเกิดการสะท้อนกลับเป็นคลื่นตกกระทบอีกครั้งด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเขียนสมการได้ดังนี้

$$A_{(m,n)}^{TE/TM} = [\Gamma] (B_{(m,n)}^{TE/TM}) \quad (11)$$

โดยที่สมการของตัวกระทำ  $[\Gamma]$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Gamma^{TE/TM} = \frac{1 - Z_0 Y_{m,n}^{TE/TM}}{1 + Z_0 Y_{m,n}^{TE/TM}} \quad (12)$$

ค่าแอดมิตแตนซ์ในท่อนำคลื่นเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Y_{m,n}^{TE} = \frac{\gamma}{j\omega\mu_0\mu_r}, Y_{m,n}^{TM} = \frac{j\omega\epsilon_0\epsilon_r}{\gamma} \quad (13)$$

เมื่อ  $\gamma = \sqrt{(m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2 - k_0^2\epsilon_r}$  และ  $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$

### 2.5 การแปลงโดเมนสเปกตรัมเป็นโดเมนจริง

พิจารณาการแพร่กระจายของคลื่นที่กลับเข้าไปในวงจรถ่วงแคบ คลื่นตกกระทบในโดเมนสเปกตรัมจะถูกเปลี่ยนให้เป็นโดเมนจริงโดยใช้การแปลงกลับฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะได้สมการคลื่นในทิศทางของ x เป็นดังนี้

$$A_{x(j,k)} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{x(m,n)}^{TE/TM} \cos\left(\frac{m\pi x}{M}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{N}\right) \quad (14)$$

ทำนองเดียวกัน สมการคลื่นในทิศทางของ y สามารถเขียนได้ดังนี้

$$A_{y(j,k)} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{y(m,n)}^{TE/TM} \sin\left(\frac{m\pi x}{M}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{N}\right) \quad (15)$$

ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ของคลื่นในทิศทาง x และ y ในรูปแบบของฟังก์ชันเมทริกซ์ สามารถสรุปได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} = \text{IFFT} \left\{ \frac{1}{Q_{m,n}} \begin{bmatrix} n/b & -m/a \\ m/a & n/b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{x(j,k)} \\ A_{y(j,k)} \end{bmatrix} \right\} \quad (16)$$

## 2.6 การหาผลรวมของสมการคลื่น

การคำนวณด้วยวิธีการวนรอบของคลื่น จะอาศัยการทำซ้ำของคลื่นที่เคลื่อนที่ในท่อนำคลื่น จนกว่าผลลัพธ์จะเข้าสู่ค่าตอบที่ถูกต้อง และสามารถหาผลรวมของสมการคลื่น เพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ เช่น ผลการตอบสนองทางความถี่ คาร์เรียดแดนซ์ เป็นต้น โดยสมการการหาขนาดในปริมาตรเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศทางใดๆ เป็นดังนี้

$$E_{(x,y)} = \sqrt{Z_0} (A_{(x,y)} + B_{(x,y)}) \quad (17)$$

$$J_{(x,y)} = (A_{(x,y)} + B_{(x,y)}) / \sqrt{Z_0} \quad (18)$$

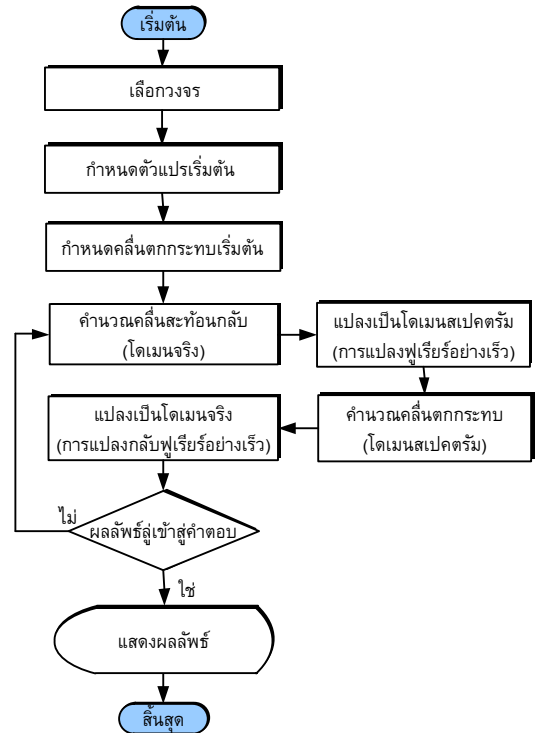
สมการแอดมิตแตนซ์ของโครงข่ายสองขั้ว สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Y = \sum_{x,y} \left( \frac{J_{(x,y)}}{E_{(x,y)}} \right) \quad (19)$$

สมการอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายสองขั้ว เขียนได้ดังนี้

$$Z = \sum_{x,y} \left( \frac{E_{(x,y)}}{J_{(x,y)}} \right) \quad (20)$$

สมการพารามิเตอร์กระจายเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 6 ผังงานของโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้น

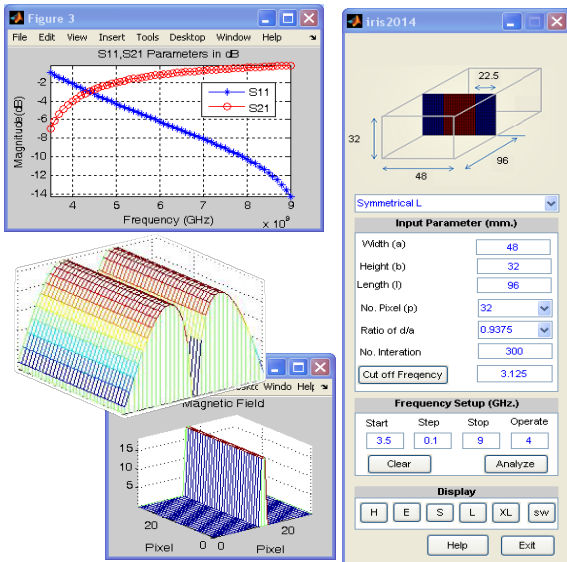
$$S = [Z - U][Z + U]^{-1} \quad (21)$$

เมื่อ U คือ Unity Matrix

## 3. การพัฒนาโปรแกรมจำลอง

โปรแกรมจำลองสำหรับวิเคราะห์วงจรช่องแคบในท่อนำคลื่น โดยใช้ทฤษฎีการวนรอบของคลื่น ออกแบบและสร้างโดยใช้ฟังก์ชันการประสานงานกับผู้ใช้ทางกราฟิก (Graphical User Interface: GUI) ของโปรแกรม MATLAB [16] ที่ปรับปรุงและพัฒนาต่อยอดมาจากโปรแกรมเดิม [17]-[19] เพื่อให้สามารถวิเคราะห์วงจรที่มีความซับซ้อนมากขึ้น และเพิ่มความสามารถของโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างวงจรช่องแคบที่มีรูปแบบหลากหลาย แสดงดังรูปที่ 6

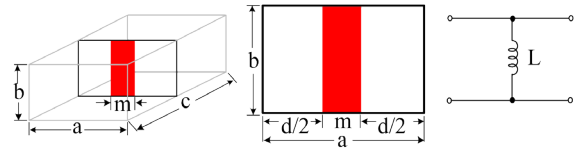
ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลอง เริ่มจากการเลือกรูปแบบของวงจร ที่สามารถเลือกได้ 6 รูปแบบ



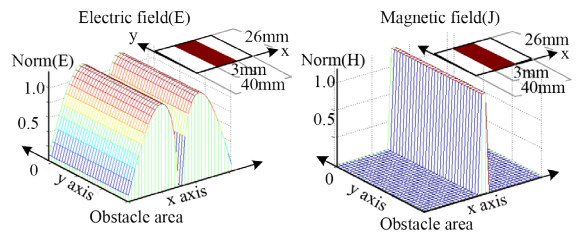
รูปที่ 7 หน้าต่างโปรแกรมจำลอง

ได้แก่ 1) วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำแบบสมมาตรสองส่วน 2) วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำแบบสมมาตรส่วนเดียว 3) วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำแบบไม่สมมาตร 4) วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุแบบสมมาตรสองส่วน 5) วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุแบบสมมาตรส่วนเดียว และ 6) วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุแบบไม่สมมาตร จากนั้นทำการกำหนดค่าตัวแปรพื้นฐานที่กำหนด เช่น ขนาดโครงสร้างของท่อนำคลื่น ขนาดของวงจรช่องแคบ และย่านความถี่ใช้งาน เป็นต้น จากนั้นส่งค่าตัวแปรที่กำหนดทั้งหมดไปสู่ขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีการวนรอบคลื่น และมีการวิเคราะห์หาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) จนได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องทั้งนี้หากผลลัพธ์ไม่มีการเข้าสู่ค่าตอบ ผู้ใช้สามารถทำการเพิ่มจำนวนรอบของการคำนวณให้มีค่าเพิ่มขึ้นได้ หน้าต่างการใช้งานและการแสดงผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 7

โปรแกรมจำลองการวิเคราะห์วงจรไมโครเวฟในท่อนำคลื่น ดังรูปที่ 7 ประกอบไปด้วย 5 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนของการเลือกวงจร ส่วนของการป้อนค่าตัวแปรพื้นฐาน ส่วนของการกำหนดย่านความถี่ใช้งาน ส่วนการแสดงผล และส่วนการแสดงผลสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



(ก) มุมมองโดยรวม (ข) ภาคตัดขวาง (ค) วงจรสมมูล  
รูปที่ 8 วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำแบบสมมาตร



(ก) สนามไฟฟ้า (ข) สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 9 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏบนวงจรช่องแคบ

#### 4. ผลการวิจัย

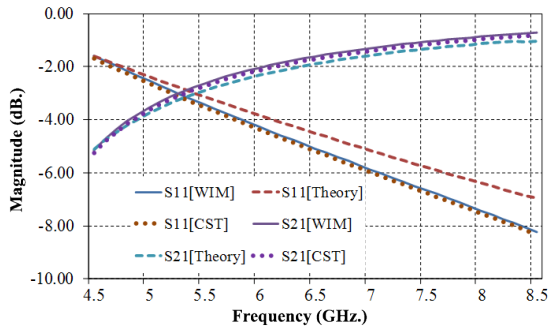
โปรแกรมจำลองสำหรับวิเคราะห์วงจรช่องแคบในท่อนำคลื่นที่พัฒนาขึ้น ในบทความนี้จะนำเสนอตัวอย่าง 2 วงจร ได้แก่ วงจรตัวเหนี่ยวนำและวงจรตัวเก็บประจุแบบสมมาตร โดยจะทำการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ผลการตอบสนองต่อความถี่ และผลของการปรับเปลี่ยนค่าความกว้างของไดอิเล็กทริก เป็นต้น

##### 4.1 วงจรตัวเหนี่ยวนำแบบสมมาตร

โครงสร้างของวงจรตัวเหนี่ยวนำแบบสมมาตรส่วนเดียว แสดงดังรูปที่ 8 โดยมีขนาดความกว้างของท่อนำคลื่น (a) เท่ากับ 40 mm ความสูง (b) เท่ากับ 26 mm ความยาว (c) เท่ากับ 96 mm ช่องว่างไดอิเล็กทริก (d) เท่ากับ 23 mm และขนาดของตัวนำวงจรช่องแคบ (m) เท่ากับ 3 mm

ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นสำหรับวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏบนวงจรช่องแคบของโครงสร้างที่นำเสนอ พบว่า รูปร่างของสนามไฟฟ้า (รูปที่ 9 ก) มีการกระจายตัวบนพื้นที่



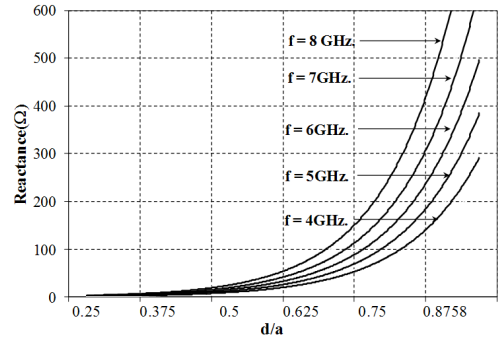


รูปที่ 10 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจร

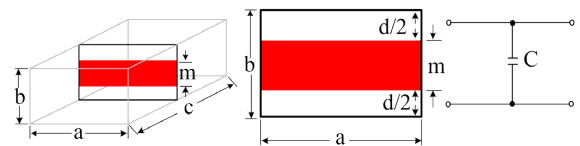
ของไดโวลีทริก โดยมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของช่องว่างทั้งสองด้าน และมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ที่ขอบของช่องว่างในทำนองเดียวกัน ค่าสนามแม่เหล็ก (รูปที่ 9 ข) มีการกระจายตัวบนพื้นที่ตัวนำโดยมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลาง และลดลงต่ำสุดที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำ

รูปที่ 10 แสดงกราฟผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำแบบสมมาตรส่วนเดียวที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นในย่านความถี่ใช้งานที่ 4.5–8.5 GHz พบว่าวงจรให้ผลการตอบสนองทางความถี่ในลักษณะเป็นวงจรรองความถี่สูงผ่าน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม WIM โปรแกรมจำลอง CST และทฤษฎี [20] จะให้ค่าความถี่ตัดที่  $-3$  dB มีค่าเท่ากับ 5.35 GHz, 5.3 GHz และ 5.45 GHz ตามลำดับ โดยที่ผลการคำนวณทั้ง 3 แบบ จะมีความสอดคล้องกัน และมีค่าความคลาดเคลื่อนของการประมวลผลไม่เกิน  $\pm 1.9\%$  [20]

รูปที่ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ตามการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ  $d/a$  (ความกว้างของช่องแคบไดโวลีทริกต่อความกว้างท่อนำคลื่น) ผลที่ได้พบว่า เมื่อปรับค่าอัตราส่วนของ  $d/a$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของวงจรช่องแคบเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของความถี่ที่สูงขึ้นค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องและสอดคล้องตามหลักการทางทฤษฎีของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ [20] นั่นเอง

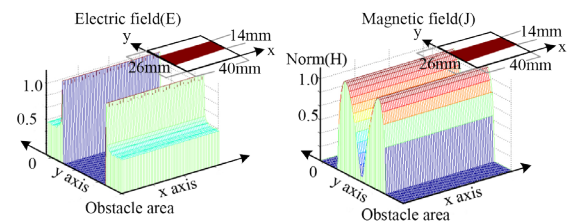


รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน  $d/a$



(ก) มุมมองโดยรวม (ข) ภาคตัดขวาง (ค) วงจรสมมูล

รูปที่ 12 วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำแบบสมมาตร



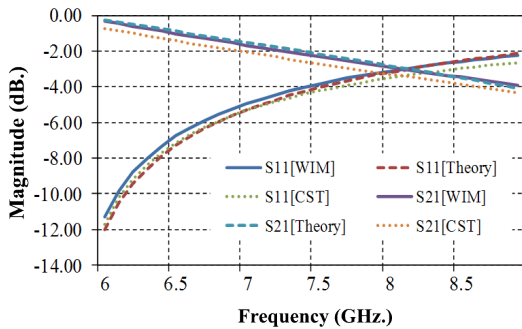
(ก) สนามไฟฟ้า (ข) สนามแม่เหล็ก

รูปที่ 13 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณช่องแคบ

#### 4.2 วงจรตัวเก็บประจุแบบสมมาตร

โครงสร้างของวงจรตัวเก็บประจุแบบสมมาตรส่วนเดียวแสดงดังรูปที่ 12 โดยมีขนาดความกว้างของท่อนำคลื่น ( $a$ ) เท่ากับ 40 mm ความสูง ( $b$ ) เท่ากับ 26 mm ความยาว ( $c$ ) เท่ากับ 96 mm ขนาดของตัวนำวงจรช่องแคบ ( $m$ ) เท่ากับ 14 mm และช่องว่างไดโวลีทริก ( $d$ ) เท่ากับ 12 mm

รูปที่ 13 แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนวงจรช่องแคบที่พบว่าสนามไฟฟ้า (รูปที่ 13 ก) จะมีการกระจายตัว

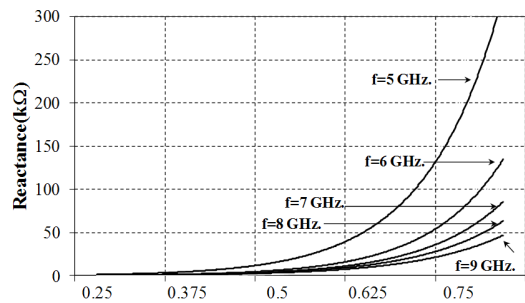


รูปที่ 14 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจร

บริเวณพื้นที่ไดโพลทริก มีค่าสูงสุดที่ขอบของตัวนำ และค่อยๆ ลดต่ำลงที่ผนังท่อนำคลื่น ในทำนองเดียวกัน ค่าของสนามแม่เหล็ก (รูปที่ 13ข) พบว่ามีการกระจายตัวบนพื้นที่ของตัวนำโดยมีค่าต่ำสุดที่ขอบของตัวนำและมีการแบ่งแผ่นของพื้นที่ตัวนำเป็น 2 ส่วนที่แต่ละส่วนมีประจุกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ

รูปที่ 14 แสดงกราฟผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุแบบสมมาตรส่วนเดียว ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้น พบว่าวงจรให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ในลักษณะเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม WIM โปรแกรมจำลอง CST และทางทฤษฎี [20] จะได้ว่าค่าของความถี่ตัดที่  $-3$  dB มีค่าเท่ากับ 8.25 GHz, 8.3 GHz และ 8.18 GHz ตามลำดับ โดยที่ผลการคำนวณทั้ง 3 แบบจะมีความสอดคล้องกันและมีค่าความคลาดเคลื่อนของการประมวลผลไม่เกิน  $\pm 0.8\%$  [20]

รูปที่ 15 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ตามการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ d/b (ความกว้างของช่องแคบไดโพลทริกต่อความสูงท่อนำคลื่น) ผลที่ได้พบว่า เมื่อปรับค่าอัตราส่วนของ d/b เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของวงจรช่องแคบเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของความถี่ที่สูงขึ้นค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์จะมีค่าลดลงซึ่งแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องและสอดคล้องตามหลักการทางทฤษฎีของวงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุ [20] นั่นเอง



รูปที่ 15 ผลการเปรียบเทียบค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน d/b

## 5. สรุป

บทความวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพวิธีการวนรอบของคลื่น (WIM) ที่พัฒนาขึ้นในรูปแบบของโปรแกรมจำลอง ที่พบว่าสามารถวิเคราะห์ห้วงจรช่องแคบในรูปแบบโครงสร้างต่างๆ ภายในท่อนำคลื่นได้อย่างถูกต้อง ตามหลักการทางทฤษฎีสสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และให้ผลที่สอดคล้องกันกับการคำนวณโดยใช้โปรแกรมจำลองทางพาณิชย์โดยวิธีการดังกล่าวมีจุดเด่นที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ห้วงจรไมโครเวฟในท่อนำคลื่นแบบอื่นๆ ได้ รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ เพื่อช่วยส่งเสริมให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้และเข้าใจการทำงานของวงจรความถี่สูงไมโครเวฟได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้โปรแกรมที่พัฒนา

โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้ได้เน้นการปรับปรุงกระบวนการของการวิเคราะห์คลื่นที่มีความละเอียดอย่างสมบูรณ์แบบ (Full Wave Analysis) ที่ไม่มีการคำนึงถึงคลื่นจางหาย (Evanescent Wave) ที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่น และมีการลดความซับซ้อนในแต่ละขั้นตอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณที่รวดเร็วขึ้นมากกว่าแบบเดิม [3] ประมาณ 20% แต่อย่างไรก็ตามโปรแกรมห่วงจรดังกล่าวมีข้อจำกัดในการกำหนดแหล่งจ่ายพลังงานที่เป็นแบบอุดมคติ ดังนั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานที่เป็นสายอากาศไมโครเวฟได้ นอกจากนั้นแล้วการกำหนดโครงสร้างของวงจรช่องแคบ



ในท่อนำคลื่นที่มีความซับซ้อนมากๆ หรือใช้จำนวนพิกเซลมากๆ โปรแกรมจะใช้เวลาการคำนวณมากหรืออาจจำเป็นต้องกำหนดจำนวนรอบมากๆ เพื่อให้โปรแกรมลู่เข้าสู่คำตอบที่ต้องการ สำหรับกรณีที่โปรแกรมไม่สามารถเข้าสู่คำตอบที่ถูกต้อง (Divergence) อาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การกำหนดโครงสร้างวงจรไม่เหมาะสม วงจรมีรายละเอียดมากเกินไป เป็นต้น ซึ่งโปรแกรมจะหยุดการคำนวณทันที ดังนั้นการพัฒนางานวิจัยในอนาคต จะทำการปรับปรุงให้มีระบบการตรวจสอบและแจ้งเตือนข้อผิดพลาดในการประมวลผลและการใช้งานในลำดับต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Li, J. Fu, and X. Wu, "Analysis of High-Power Rectangular Waveguide Filter with Capacitive Coupling Iris for Satellite," in *Power and energy engineering conference (APPEEC)*, 2009, pp.1-4.
- [2] S. Akatimagool and S. Choocadee, "Wave Iterative Method for Electromagnetic Simulation," in *Wave propagation theories and applications, intech book*, pp. 331-352, February 2013.
- [3] S. Choocadee and S. Akatimagool, "Development of Efficient EM Simulation Tool for Capacitive and Inductive Obstacle Analysis," in *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2010, pp.1154-1158.
- [4] A. K. Mills and W. J. Chappell, "On the use of Commercial FEM Electromagnetic Software in an Undergraduate Curriculum," in *IEEE AP-S Int. Symp.*, Monterey, CA, June 2004, pp. 3365-3368.
- [5] William B J Zimmerman, *Multiphysics Modeling with Finite Element Methods*, Singapore, World Scientific Publishing Company, 2006.
- [6] S. Choocadee and S. Akatimagool, "Design and Implementation of Band Pass Filter in Waveguide using Simulation Tools," in *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2011, pp. 248-251.
- [7] Eng-Kee and L. Er-Ping, "Application of Integrated Transmission Line Modeling and Behavioral Modeling on Electromagnetic Immunity Synthesis," in *Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2011.
- [8] L. Hai, *et al.*, "Multi-target Scattering Analysis Based on Generalized Higher-order Finite-Difference Time-domain Method," in *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2010.
- [9] E. Lezar and D.B. Davidson, "GPU-Accelerated Method of Moments by Example: Monostatic Scattering," *Antennas and Propagation Magazine (IEEE)*, vol. 52, no. 6, pp. 120-135, 2010.
- [10] S. Akatimagool, D. Bajon, and H. Baudrand, "Analysis of Multi-layer Integrated Inductors with Wave Concept Iterative Procedure (WCIP)," *Microwave Symposium Digest*, IEEE MTT-S International, 2001.
- [11] S. Kamkleing and S. Akatimagool, "Microwave Filter Education Supported by Wave Iterative Simulation Program," in *International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2008.
- [12] S. Thanaputtiwiro, *et al.*, "Analysis of Low Pass Filter Circuit using Wave Iterative Simulation," in *The 1<sup>st</sup> International Conference on Technical Education*, November 2013, pp. 150-153.
- [13] S. Choocadee and S. Akatimagool, "Waveguide Filter Design (WFD) Tool in the Teaching of



- Microwave Engineering,” *Technical Education Journal, King Mongkut’s University of Technology North Bangkok*, vol. 1, no. 2, pp. 11–17, July–Dec. 2010 (in Thai).
- [14] S. Chocadee and S. Akatimagool, “The Develop of Simulated Program for Study and Analysis of Waveguide Filter Using Wave Iterative Method,” *The Journal of King Mongkut’s University of Technology North Bangkok*, vol. 22, no. 3, pp. 560–571, Sep.–Dec. 2012 (in Thai).
- [15] E. Richalot *et al.*, “Modeling of Arbitrary Shaped Radiating Structures by The Wave Concept Iterative Process,” *Microwave Symposium Digest 2000*, IEEE MTT-S International, pp. 113–116, 2000.
- [16] Somsak Akatimagool and Pinit Nuangpirom, *The Usability of GUI function on MATLAB Program*, Bangkok: KMUTNB Book Center, King Mongkut University of Technology North Bangkok, 2014 (in Thai).
- [17] S. Akatimagool and P. Nuangpirom, “Waveguide Iris Simulation Tool using Wave Iterative Method for Microwave Engineering Course,” in *Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, October 2014.
- [18] P. Nuangpirom and S. Akatimagool, “A Simulation of Inductive Iris Characteristics in Microwave Engineering Course,” in *International Conference on Technical Education (ICTeched)*, November 2014.
- [19] P. Nuangpirom and S. Akatimagool, “A Synthesis of Waveguide Capacitive Iris using WIM Algorithm,” in *International Conference on Technical Education (ICTeched)*, November 2014.
- [20] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, Short Run Press Ltd., London, UK, 1986.