

การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำในวงจรคลื่นระนาบ

สมศักดิ์ อรรถทิมากุล¹ และ สยาม นิพิพิทานิตย์²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ตัวเหนี่ยวนำไมโครเวฟ เพื่อหาลักษณะคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบไมโครสตริป แบบมีแอนเตอร์ และแบบกั้นหอยที่อยู่ในวงจรคลื่นระนาบ วิธีการคำนวณจะอาศัยหลักการของการวนรอบของคลื่นที่ประกอบด้วยคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านที่แพร่กระจายภายในกล่องโลหะปิด และใช้ตัวแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วในการวิเคราะห์คลื่นในโดเมนจริงหรือฟิกเชล และโดเมนทางสเปคตรัมหรือโหมด โดยทำการออกแบบเป็นโปรแกรมการจำลองที่ทำงานภายใต้โปรแกรม MATLAB ผลของงานวิจัย ได้แก่ การวิเคราะห์พารามิเตอร์การจัดกระจาย การหาคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ และการวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่นำไปเปรียบเทียบผลกับโปรแกรม SONNET Lite Version 11.54 ซึ่งพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและสอดคล้องกัน ซึ่งสามารถนำเอาวิธีการคำนวณนี้ไปใช้ประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรรวมไมโครเวฟอื่นๆได้

คำสำคัญ : ตัวเหนี่ยวนำไมโครสตริป ตัวเหนี่ยวนำ มีแอนเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำกั้นหอย การวนรอบของคลื่น

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² นักศึกษาภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2913-2500 ต่อ 3322 E-mail : ssa@kmutnb.ac.th

Planar Inductor Characteristic Analysis

Somsak Akatimagool^{1*} and Sayam Nippithanit²

Abstract

This research presents the study and analysis of the microstrip, meander and spiral inductor characteristic of planar circuit. The analysis method based on a wave iterative concept will calculate the incident, reflected and transmitted waves which propagate in a closed metallic box. The amplitude of waves presents in the real domain (pixel) and spectrum domain (modes) by using the Fast Fourier Transform (FFT). In this work we designed the graphic user interface using MATLAB[®] program. The analysis results are the scattering parameter, the inductor characteristics and the electromagnetic waveform on the inductor circuit layer. The compared results between Wave Iterative Method (WIM) and SONNET Lite program of version 11.54 are good agreement. The advantage of this research can be used efficiently in the microwave circuits analysis and design.

Keywords : Microstrip Inductor, Meander Inductor, Spiral Inductor, Wave iterative method

¹ Assistant Professor, Department of Electrical Education, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Master Degree Student, Department of Electrical Education, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding Author Tel. 0-2913-2500 ext. 3322, E-mail: ssa@kmutnb.ac.th

1. บทนำ

โครงข่ายทั่วไปประกอบด้วยอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ และอุปกรณ์แอคทีฟ การวิเคราะห์โครงข่ายเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์และออกแบบระบบ โดยส่วนใหญ่จะใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ หรือทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายในวงจรคลื่นระนาบ ซึ่งเทคนิคคำนวณทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น FDTD (Finite Differential Time Domain), TLM (Transmission Line Matrix) และ Method of Moments เป็นต้น แต่ละเทคนิค [1-3] อาจมีความยุ่งยากซับซ้อนแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน และเทคนิคการคำนวณวิธีหนึ่งที่มีการศึกษาและวิจัยขึ้น คือ การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนคลื่นระนาบที่อาศัยหลักการของคลื่นที่มีการกระทำซ้ำ (WCIP : Wave Concept Iterative Procedure) [4] ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณได้มาก และได้พัฒนาเป็นวิธีการคำนวณแบบใหม่ [5-7] ที่เรียกว่าการวนรอบของคลื่น (WIM : Wave Iterative Method) เป็นการคำนวณหาค่าขนาดของคลื่นสลับไปมาระหว่างค่าขนาดของคลื่นในโดเมนค่าจริงกับค่าขนาดของคลื่นในโดเมนสเปคตรัม ทั้งนี้เป็นการคำนวณค่าของสนามบนชั้นของวงจรถ้วนนำกับชั้นตัวกลางไดอิเล็กทริกย่านความถี่ไมโครเวฟภายในกล่องปิดที่กายภาพของวงจรถ้วนนำมีลักษณะเป็นพิกเซลจัตุรัสขนาดเล็กของตัวนำและของไดอิเล็กทริก ผลของการออกแบบและวางพิกเซลในโครงสร้างต่างๆ จะทำให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรถ้วนนำตามความต้องการ

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์พาสซีฟที่สำคัญชนิดหนึ่งของวงจรถ้วนนำ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำนำความถี่ไมโครเวฟที่สร้างอยู่บนฐานรองจะมีรูปร่างได้หลายแบบ เช่น แบบไมโครสตริป (Microstrip) แบบมีแอนเตอร์ (Meander) และแบบกันหอย (Spiral) เป็นต้น โดยที่แบบมีแอนเตอร์จะสร้างขึ้นโดยการวางตัวนำให้เป็นเส้นโค้งหักงอไปมา ส่วนแบบกันหอยเป็นการสร้างตัวนำขดเรียงรอบจากด้านนอกเข้าสู่ด้านในเป็นรูปคล้ายกันหอย และสร้างสะพานอากาศข้าม (Air bridge) เชื่อมโยงตัวนำออกมาที่ขั้วต่อกับวงจรถ้วนนำ ดังนั้นจะทำให้การ

วิเคราะห์หาคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำค่อนข้างยุ่งยาก และมีความซับซ้อน [8-10] เพราะต้องมีการคำนวณในส่วนที่เป็นสะพานอากาศข้ามแผ่นตัวนำเพิ่มเติม ดังนั้นจึงมีนักวิจัยให้ความสนใจในการคิดค้นหาเครื่องมือในการวิเคราะห์หาค่าตอบในโครงสร้างดังกล่าว [10]

จากแนวทางดังกล่าวข้างต้น บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ตัวเหนี่ยวนำแบบไมโครสตริป แบบมีแอนเตอร์ และแบบกันหอยที่ทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟโดยวิธีการวนรอบของคลื่น เพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและเปรียบเทียบผลของวงจรถ้วนนำประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าพารามิเตอร์การจัดกระจาย ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าของพารามิเตอร์แอบแฝง (Parasitic Parameters) และค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q Factor) การแสดงรูปคลื่นของสนามไฟฟ้า (Electric Field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ที่เกิดขึ้นบนตัวเหนี่ยวนำ เพื่อแสดงให้เห็นปรากฏการณ์ และคุณสมบัติการทำงานในย่านคลื่นความถี่ไมโครเวฟ โดยผลที่ได้เหล่านี้สามารถเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้กับวงจรถ้วนนำไมโครเวฟอื่น ๆ ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้และช่วยเสริมให้ผู้ที่สนใจสามารถเข้าใจปรากฏการณ์อันเป็นจริงได้มากขึ้นกว่าการศึกษาเฉพาะสมการหรือสูตรคำนวณทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียว

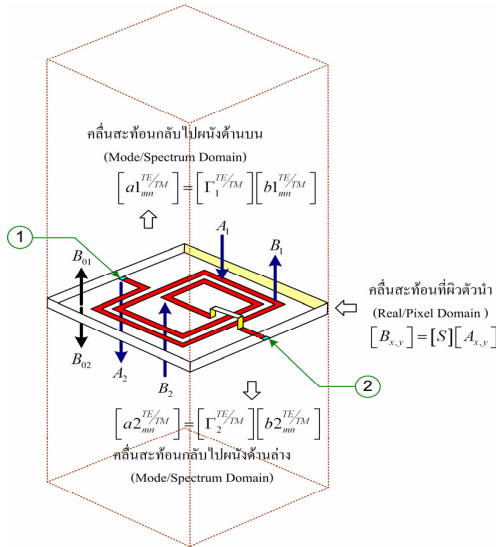
2. การคำนวณแบบวนรอบของคลื่น

หลักการแพร่กระจายของคลื่นในโครงสร้างวงจรถ้วนนำไมโครเวฟที่เรียกว่า WIM (Wave Iterative Method) เป็นการคำนวณขนาดของคลื่นในค่าจริงหรือโดเมนพิกเซล (Pixel) ที่ปรากฏบนพื้นที่ของตัวนำ และโดเมนทางโหมดหรือสเปคตรัมที่แพร่กระจายในอากาศว่างและตัวกลางไดอิเล็กทริก [6-7] ดังภาพที่ 1

จากภาพที่ 1 คลื่น $B_{x,y}$ ที่สะท้อนออกจากผิวตัวนำจะเปลี่ยนเป็นค่าในรูปของโหมดหรือสเปคตรัมโดยการแปลงสภาพฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) และคลื่น $b_{mn}^{TE/TM}$ จะแพร่กระจายไปสะท้อนกลับที่ผนังด้านบนของกล่องโลหะด้วยสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $(\Gamma_{mn}^{TE/TM})$ ดังสมการที่ (1)

$$\Gamma_{mn}^{TE/TM} = \frac{Y_0 - Y_{mn}^{TE/TM}}{Y_0 + Y_{mn}^{TE/TM}} \quad (1)$$

เมื่อ Y_0 คือ สมการแอดมิตแตนซ์ที่โหมดพื้นฐาน
 $Y_{mn}^{TE/TM}$ คือ สมการแอดมิตแตนซ์ของโหมด TE และ TM ในโดเมนสเปคตรัม



ภาพที่ 1 การแพร่กระจายคลิ่นในกล่องตัวนำ

ดังนั้นจะได้คลิ่นที่ตกกระทบบนชั้นของตัวนำในรูปของ โหมด หรือ โดเมนสเปคตรัม มีค่าเท่ากับ $a_{mn}^{TE/TM} = \Gamma^{TE/TM} b_{mn}^{TE/TM}$ ซึ่งที่ชั้นตัวนำ คลิ่นจะถูกแปลงสภาพกลับในรูปของค่าจริงหรือพิทเชล โดยจะใช้การแปลงสภาพฟูเรียร์อย่างรวดเร็วย้อนกลับ (FFT⁻¹) กลับมาเป็นคลิ่น $A_{x,y}$ ที่ปรากฏบนพิทเชลตัวนำ ซึ่งคลิ่นดังกล่าวจะสะท้อนกลับขึ้นไปในอากาศด้านบนอีกครั้ง และจะมีคลิ่นอีกส่วนหนึ่งส่งผ่านชั้นไดอิเล็กทริกไปด้านล่าง โดยการเคลื่อนที่ผ่านชั้นตัวนำจะใช้สมการของความสัมพันธ์ของโครงข่ายสองขั้วของวงจรตัวนำในการอธิบายผลของเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ของคลิ่นที่เกิดขึ้นหรือแพร่กระจายในบริเวณรอยต่อ โดยสมการของความสัมพันธ์พารามิเตอร์กระจายกระจายของข่ายงานเป็นดังสมการที่ (2)

$$[S] = [B_{x,y}] [A_{x,y}]^{-1} \quad (2)$$

ผลรวมของขนาดจริงของสนามไฟฟ้า ($\vec{E}(x,y)$) ที่ปรากฏบนพื้นที่ตัวกลางในเทอมของฟังก์ชันของ

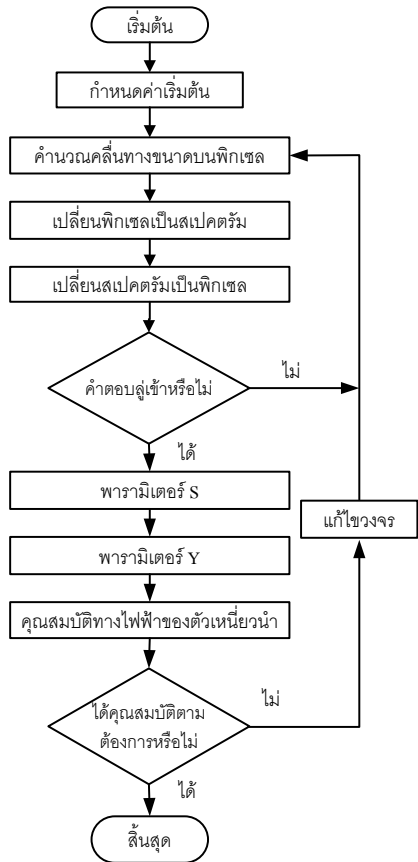
สนามไฟฟ้าทางสเปคตรัมในโหมด TE และโหมด TM ที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นตัวนำ เป็นดังสมการที่ (3)

$$\vec{E}(x,y) = \sum_{m,n} a_{mn}^\alpha f_{mn}^\alpha(x,y) \quad (3)$$

ผลรวมของฟังก์ชันของสนามแม่เหล็ก ($\vec{H}(x,y)$) ที่ปรากฏบนพื้นที่ตัวนำในเทอมของฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าและแอดมิตแตนซ์ เป็นดังสมการที่ (4)

$$\vec{H}(x,y) = \sum_{m,n} a_{mn}^\alpha Y_{mn}^\alpha f_{mn}^\alpha(x,y) \quad (4)$$

เมื่อ $A_{x,y}$ คือคลิ่นตกกระทบในโดเมนค่าจริง
 $B_{x,y}$ คือคลิ่นสะท้อนในโดเมนค่าจริง
 $b_{mn}^{TE/TM}$ คือคลิ่นสะท้อนในโดเมนสเปคตรัม
 $a_{mn}^{TE/TM}$ คือคลิ่นตกกระทบในโดเมนสเปคตรัม
 $f_{mn}^\alpha(x,y)$ คือสมการของฟังก์ชันการทดสอบหรือสมการพื้นฐานของสนามไฟฟ้าตามขวางในกล่องตัวนำ



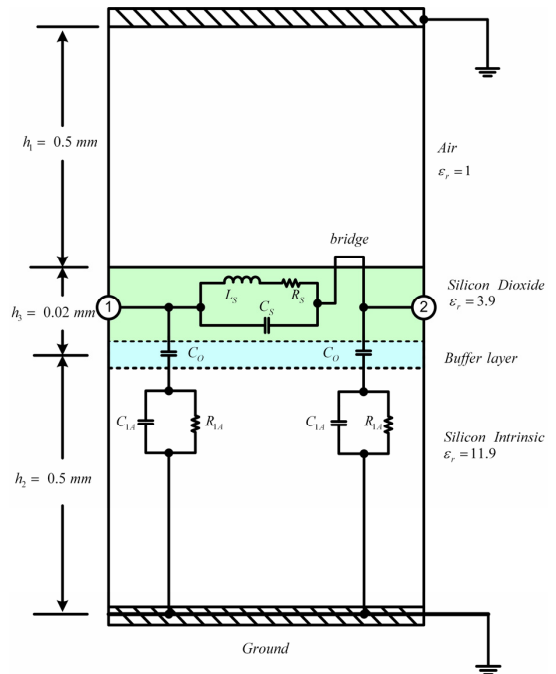
ภาพที่ 2 ขั้นตอนของการคำนวณแบบวนรอบ

แผนภูมิในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์หาคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำแสดงดังภาพที่ 2 จะเริ่มต้นจากการออกแบบโครงสร้างวงจรตัวเหนี่ยวนำ ที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นกำหนดค่าเริ่มต้น และคำนวณหาขนาดของคลื่นที่แพร่กระจายในกล่องตัวนำที่คำนวณในโดเมนสเปคตรัมและที่ปรากฏบนชั้นตัวนำ ที่คำนวณในโดเมนทางพิกเซล และ จะคำนวณหาขนาดของคลื่นในแต่ละรอบของการแพร่กระจายคลื่นจนกระทั่งคำตอบเข้าสู่ค่าคงที่ จากนั้นวิเคราะห์หาค่าของพารามิเตอร์กระจัดกระจาย และค่าแอดมิตแดนซ์ของข่ายงานทางไฟฟ้า เพื่อคำนวณหาค่าของอุปกรณ์พาสซีฟต่างๆ เช่น ตัวเหนี่ยวนำ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ในวงจรเทียบเคียงของตัวเหนี่ยวนำ นั้นเอง และในการออกแบบโครงสร้างของวงจรตัวเหนี่ยวนำอาจมีการเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ แบบลองผิดลองถูกเพื่อให้ได้วงจรที่ต้องการ

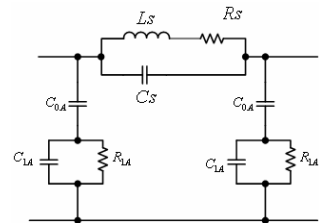
3. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ พิจารณาจากตัวนำสตริปที่วางเรียงกันในกล่องตัวนำ ซึ่งจะเห็นว่าวงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 3 ในส่วนชั้นตัวนำจะมีลักษณะเป็นตัวนำสตริปทำให้เกิดค่าของความเหนี่ยวนำ (L_S) และความต้านทาน (R_S) สำหรับวงจรไฟฟ้าในชั้นรอยต่อ (Buffer Layer) เกิดขึ้นจากรอยต่อของชั้นกลางกับชั้นล่าง เนื่องจากวัสดุไดอิเล็กทริกด้านบนเป็นคอนเดนเซอร์กับไดอิเล็กทริกชั้นล่างผลของรอยต่อเล็กๆ ที่แนบอยู่ใกล้กันทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้า C_0 ขึ้น และสำหรับวงจรไฟฟ้าในชั้นล่างที่เกิดขึ้นจากตัวกลางไดอิเล็กทริก ที่คั่นกลางระหว่างสายส่งไมโคร สตริปและวัสดุไดอิเล็กทริก กับแผ่นโลหะที่ต่อลงกราวด์ ทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้า C_{1A} และค่าของ R_{1A}

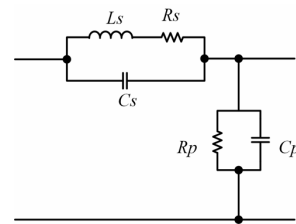
สำหรับการวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำในกล่องโลหะปิด ดังแสดงในภาพที่ 4 จะเห็นว่าประกอบด้วยส่วนของอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ที่ต่อในลักษณะอนุกรมและขนานกัน นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าของตัวประกอบคุณภาพ (Q) ได้อีกด้วย



ภาพที่ 3 วงจรเทียบเคียงของตัวเหนี่ยวนำในกล่องปิด



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4 วงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ

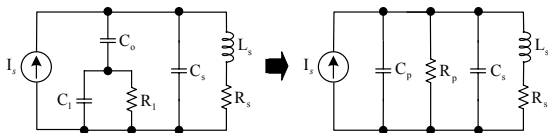
ภาพที่ 4 (ก) แสดงวงจรเทียบเคียงของวงจรตัวเหนี่ยวนำในวงจรคลื่นระนาบ เมื่อทำการลดรูปวงจรใหม่ จะแสดงในภาพที่ 4 (ข) ซึ่งจะได้สมการของตัวต้านทาน

และตัวเก็บประจุที่ต่อแบบขนาน ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$R_p = \frac{1}{\omega^2 R_{1A} C_{0A}^2} + \frac{R_{1A} (C_{0A}^2 + 2C_{0A} C_{1A} + C_{1A}^2)}{C_{0A}^2} \quad (5)$$

$$C_p = (\omega^2 R_{1A}^2) \left\{ \frac{C_{0A} C_{1A} + C_{0A} C_{1A}^2}{(C_{0A} + C_{1A})^2} \right\} \quad (6)$$

ตัวประกอบคุณภาพ(Q)เป็นค่าตัวเลขที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของระดับการสะสมและคายพลังงานที่เกิดขึ้นและการสูญเสียในวงจรโครงข่ายงาน ซึ่งอุปกรณ์ที่มีผลต่อการสะสมพลังงานประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (L_s , C_p และ C_s) และอุปกรณ์ที่เกิดการสูญเสีย คือตัวต้านทาน (R_s และ R_p) โดยปกติค่าของตัวประกอบคุณภาพควรมีค่าสูงจะทำให้วงจรมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำต้องคำนึงถึงค่าตัวประกอบคุณภาพด้วย



ภาพที่ 5 วงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้า

ภาพที่ 5 แสดงวงจรเทียบเคียงที่ลดรูปจากภาพที่ 4 โดยมีโครงสร้างเป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุทำให้เกิดการสะสมพลังงานขึ้นในโครงข่าย และตัวความต้านทานทำให้เกิดพลังงานสูญเสียในรูปของความร้อน ดังนั้นสมการการคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพจะได้ดังสมการ (7)

$$Q = (2\pi) \left(\frac{E_{magnetic} - E_{electric}}{E_{heat}} \right) \quad (7)$$

พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ แสดงดังสมการที่ (8)

$$E_{magnetic} = \frac{V^2}{2} \left\{ \frac{L_s}{(\omega L_s)^2 + R_s^2} \right\} \quad (8)$$

พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ แสดงดังสมการที่ (9)

$$E_{electric} = \frac{V^2}{2} (C_s + C_p) \quad (9)$$

พลังงานที่สูญเสียในตัวต้านทาน แสดงดังสมการที่ (10)

$$E_{heat} = \frac{\pi V^2}{\omega} \left\{ \frac{(\omega L_s)^2 + R_s^2 + R_s R_p}{R_p \left\{ (\omega L_s)^2 + R_s^2 \right\}} \right\} \quad (10)$$

ดังนั้นสมการตัวประกอบคุณภาพ (Q) จะได้ดังนี้

$$Q = \frac{\omega L_s}{R_s} \left\{ \frac{R_p}{R_s \left\{ \left(\frac{\omega L_s}{R_s} \right)^2 + 1 \right\} + R_p} \right\} \left\{ 1 - \frac{R_s^2 (C_s + C_p) - \omega^2 L_s (C_s + C_p)}{L_s (C_s + C_p)} \right\}$$

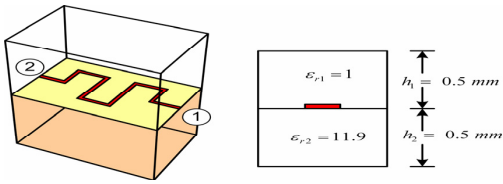
4. ผลของการวิจัย

บทความวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวเหนี่ยวนำแบบต่างๆ ในวงจรคลื่นระนาบ (Planar Circuit) และปรากฏการณ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนวงจรตัวเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ เช่น แบบมีแอนเตอร์ และแบบกันหอย เป็นต้น โดยใช้วิธีการคำนวณแบบการวนรอบของคลื่น (WIM) โดยการออกแบบตัวเหนี่ยวนำวางในกล่องโลหะปิดขนาด 64×64 พิกเซล ใช้ไดโอดเล็กตริกเป็นชนิด Silicon มีค่า ϵ_{r2} เท่ากับ 11.9 มีค่า Dielectric Loss Tangent เท่ากับ 0.004 และมีค่า Dielectric Conductance เท่ากับ 4.4×10^{-4} S/m ชั้นของอากาศด้านบนมีค่า ϵ_{r1} เท่ากับ 1 ตัวนำแบบสตริปเป็นทองแดงมีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ 5.8×10^7 S/m ความหนาเท่ากับ $0.1 \mu\text{m}$

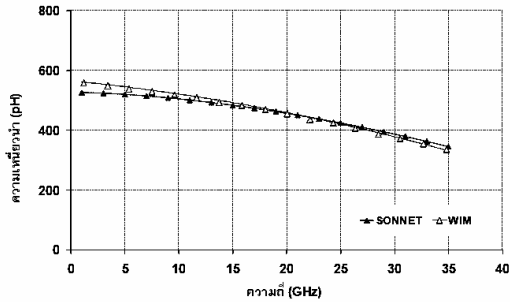
4.1 การวิเคราะห์ตัวเหนี่ยวนำแบบมีแอนเตอร์

ตัวเหนี่ยวนำแบบมีแอนเตอร์ถูกออกแบบในกล่องโลหะปิดขนาด $0.512 \times 0.512 \text{ mm}^2$ โดยออกแบบให้ตัวเหนี่ยวนำมีความกว้างของตัวนำสตริป (w) เท่ากับ 4 พิกเซล หรือกว้าง $32 \mu\text{m}$ มีความยาวทางกายภาพ (l) เท่ากับ 1.152 mm ออกแบบให้กล่องปิดด้านบนและล่างเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติแบบไม่มีการสูญเสีย แสดงดังภาพที่ 6

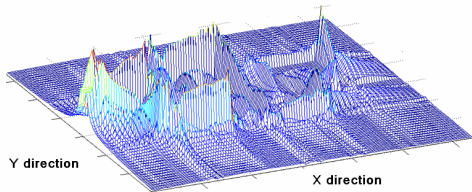
ภาพที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบความเหนี่ยวนำของแบบมีแอนเตอร์ ขนาดความกว้าง (w) ของตัวนำเท่ากับ $32 \mu\text{m}$ ผลการเปรียบเทียบโดยการคำนวณด้วยโปรแกรม SONNET และโปรแกรม WIM ให้ค่าความเหนี่ยวนำสอดคล้องกัน



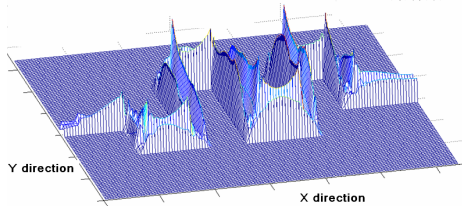
ภาพที่ 6 ตัวเหนี่ยวนำแบบมีแอนเดอร์



ภาพที่ 7 การเปรียบเทียบค่าตัวเหนี่ยวนำมีแอนเดอร์



(ก) สนามไฟฟ้า



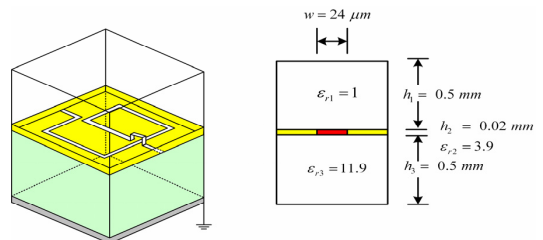
(ข) สนามแม่เหล็ก

ภาพที่ 8 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของ
ตัวเหนี่ยวนำแบบมีแอนเดอร์

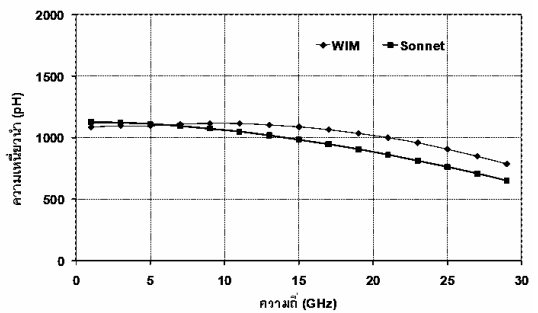
ภาพที่ 8 (ก) แสดงสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนชั้นตัวนำ ซึ่งอยู่รอบ ๆ พื้นที่พิกเซลของตัวนำ โดยค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีศักยภาพไฟฟ้าเทียบกับผนังไฟฟ้าข้างกล่องตัวนำ โดยที่ขอบของพิกเซลตัวนำจะมีค่าศักดาสูงสุดและค่าจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อมีระยะห่างออกไป และภาพที่ 8 (ข) แสดงค่าขนาดของสนามแม่เหล็กที่มีค่าเฉพาะพื้นที่บนพิกเซลของตัวนำเท่านั้น

4.2 การวิเคราะห์ตัวเหนี่ยวนำแบบกันหอย

ตัวเหนี่ยวนำแบบกันหอยมีจำนวนรอบเท่ากับ 1 รอบ ออกแบบในกล่องโลหะปิดขนาด 0.512×0.512 mm² มีความกว้างตัวนำสตริป (w) เท่ากับ 24 μ m ลักษณะของกันหอยมีการวนรอบตัวนำจากด้านนอกวนเข้าไปสู่ศูนย์กลาง มีการแบ่งเป็นชั้นต่าง ๆ จำนวน 3 ชั้น รวมเป็นความสูงกล่องปิดทั้งหมดเท่ากับ 1.02 mm ดังภาพที่ 9 และผลการวิเคราะห์ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าด้วยโปรแกรม SONNET และโปรแกรม WIM ในย่านความถี่ทำงาน 1 – 28 GHz ดังในภาพที่ 10

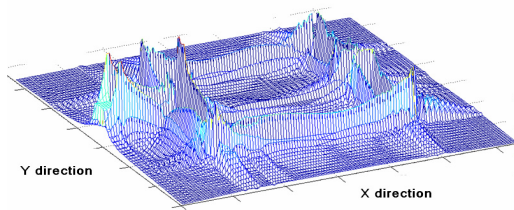


ภาพที่ 9 ตัวเหนี่ยวนำแบบกันหอย

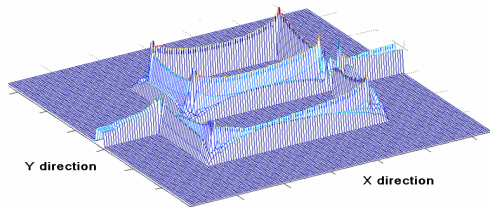


ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบค่าตัวเหนี่ยวนำแบบกันหอย

ภาพที่ 10 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ (L_s) จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Sonnet Lite พบว่าได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 1,020 pH เปรียบเทียบผลกับการคำนวณด้วยโปรแกรม WIM ในย่านความถี่ทำงาน 1 – 30 GHz พบว่าได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 1,106 pH เห็นได้ว่าโปรแกรมคำนวณทั้ง 2 โปรแกรมได้ค่าความเหนี่ยวนำใกล้เคียงกัน แต่ที่ความถี่สูงอาจมีค่าแตกต่างกันบ้างเนื่องจากปัญหาของการลู่ออกค่าตอบ (Convergence) ในโปรแกรมคำนวณที่ต้องใช้จำนวนรอบของการคำนวณมาก ๆ ที่ความถี่สูง ๆ แต่ในโปรแกรมใช้จำนวนรอบที่เท่ากันในทุกย่านความถี่



(ก) สนามไฟฟ้า



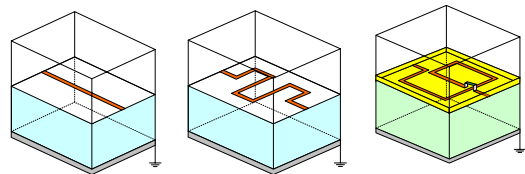
(ข) สนามแม่เหล็ก

ภาพที่ 11 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของ
ตัวเหนี่ยวนำแบบกันหอย

ภาพที่ 11 (ก) แสดงสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนชั้นตัวนำซึ่งอยู่รอบๆ พื้นที่พิกเซลของตัวนำและภาพที่ 11(ข) แสดงค่าขนาดของสนามแม่เหล็กที่มีค่าเฉพาะพื้นที่บนพิกเซลของตัวนำที่ผลลัพธ์สอดคล้องกับทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กล่าวถึงสภาพบนพื้นที่แผ่นตัวนำจะมีความหนาแน่นของกระแสไหลผ่านโดยที่รอบๆ จากขอบของตัวนำจะมีสนามไฟฟ้าพุ่งห่างออกไป

4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำต่าง ๆ

การวิเคราะห์ผลเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จากการที่ตัวนำมีความยาวกายภาพเท่ากับ 1.712 mm มีความกว้างตัวนำ(w)เท่ากับ 24 μm มีความหนา(t) เท่ากับ 0.1 μm เช่นกัน ผลของการเปรียบเทียบกับโปรแกรม WIM และ Sonnet Lite ของตัวเหนี่ยวนำแบบไมโครสตริป แบบมีแอนเตอร์ และแบบกันหอย ในย่านความถี่ใช้งาน 1-30 GHz ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำจำนวน 3 แบบ ได้แก่ แบบไมโครสตริป แบบมีแอนเตอร์ และแบบกันหอย แสดงดังในภาพที่ 12



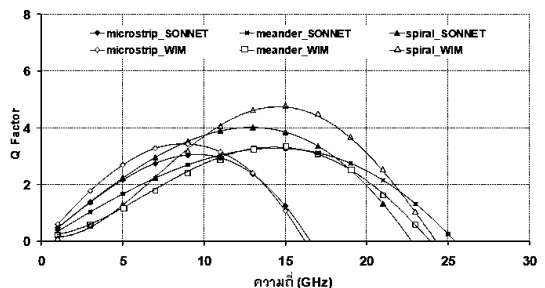
(ก) ไมโครสตริป (ข) มีแอนเตอร์ (ค) กันหอย

ภาพที่ 12 ตัวเหนี่ยวนำแบบต่างๆ

ตารางที่ 1 ผลของการเปรียบเทียบของตัวเหนี่ยวนำ

ชนิด	วิธีการคำนวณ	R_s (Ω)	C_p (fF)	L_s (pH)	Q_m	f_{Q_m} (GHz)
Microstrip	SONNET	12	100	1,069	3	9
	WIM	10	104	1,080	3.4	9
Meander	SONNET	12	62	712	3.3	15
	WIM	10	68	720	3.4	15
Spiral	SONNET	14	48	1,139	4	13
	WIM	15	36	1,249	4.8	15

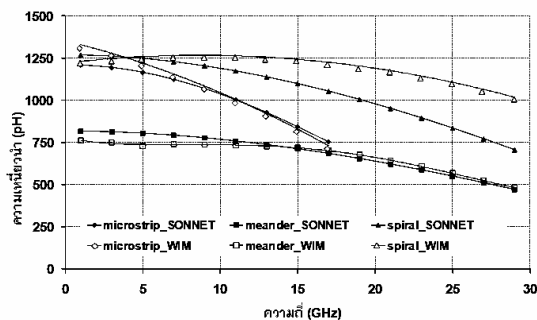
จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบจากการวิเคราะห์ที่ได้โดยวิธีของ WIM และโปรแกรม Sonnet lite จะให้ผลที่ใกล้เคียงกันและพบว่าตัวเหนี่ยวนำแบบกันหอยจะให้ค่าของความเหนี่ยวนำและตัวประกอบคุณภาพสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบไมโครสตริปและแบบมีแอนเตอร์ซึ่งเหมาะสมต่อการออกแบบไปใช้งานย่านความถี่ไมโครเวฟ



ภาพที่ 13 ตัวประกอบคุณภาพของวงจรถั้วเหนี่ยวนำ

ผลของการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบคุณภาพและค่าความเหนี่ยวนำของวงจรถั้วเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ

ในย่านความถี่ใช้งาน 10– 30 GHz ดังในภาพที่ 13 และภาพที่ 14 ตามลำดับ



ภาพที่ 14 ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวเหนี่ยวนำ แบบ ไมโครสตริป แบบมีแอนเตอร์ และแบบกันหอย ที่มีความยาวทางกายภาพที่เท่ากัน โดยพบว่าตัวเหนี่ยวนำแบบกันหอยให้ค่าความเหนี่ยวนำประมาณ 1.25 pH และค่าตัวประกอบคุณภาพมีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.8 ที่ความถี่ใช้งาน 15 GHz โดยจะมีค่ามากกว่าแบบไมโครสตริป และแบบมีแอนเตอร์ ที่มีค่าความเหนี่ยวนำในช่วง 0.72-1 pH ตัวประกอบคุณภาพเท่ากับ 3.4 ดังนั้นสรุปได้ว่าตัวเหนี่ยวนำแบบกันหอยสามารถทำงานที่ย่านความถี่สูงๆ ได้ดีกว่าตัวเหนี่ยวนำแบบอื่นๆ ในเงื่อนไขที่ขนาดความยาวของตัวนำในวงจรของตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากัน สำหรับผลการเปรียบเทียบกับโปรแกรม Sonnet Lite จะให้ค่าที่สอดคล้องกันอย่างมาก

5. สรุปผล

การวิเคราะห์คุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำในวงจรคลื่นระนาบโดยวิธีวนรอบของคลื่น เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่เกิดขึ้นในตัวเหนี่ยวนำแบบต่างๆ ได้แก่ แบบไมโครสตริป แบบมีแอนเตอร์ และแบบกันหอย ผลการเปรียบเทียบกับโปรแกรม SONNET Lite Version 11.54 พบว่าจะให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องใกล้เคียงกันมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% ในช่วงของความถี่ใช้งานตลอดจนผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถแสดงให้เห็นรูปคลื่นของสนามไฟฟ้าและของสนามแม่เหล็กบนตัว

เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในกล่องโลหะปิดได้ และมีความสอดคล้องกับทางทฤษฎีของทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ประโยชน์ของงานวิจัย ดังที่ได้นำเสนอมาสามารถนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมจำลองสำหรับใช้เป็นสื่อประกอบการเรียนการสอนในรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟที่ผู้เรียนสามารถเข้าใจโครงสร้างของวงจรและวิเคราะห์หาคูณลักษณะของวงจรตัวเหนี่ยวนำในรูปแบบต่างๆ ได้ตามต้องการ แต่อย่างไรก็ตามจะมีข้อจำกัดในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำเป็นวงจรจริงเพื่อใช้ทดสอบวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ขยายงาน เนื่องจากขนาดของวงจรต้องมีขนาดเล็กมาก ($\ll \lambda/4$) เมื่อเปรียบเทียบกับย่านความถี่ที่ใช้งาน โดยจะมีขนาดประมาณในหน่วยของไมโครเมตรถึงมิลลิเมตรเท่านั้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในการให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัย

7. บรรณานุกรม

- [1] Wenhua Yu, Raj Mittra, "A Conformal FDTD Software Package Modeling Antennas and Microstrip Circuit Components", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol.42, No.5, October 2000.
- [2] Thomas Becks, Ingo Wolff, "Analysis of 3 D Metallization Structures by a Full Wave Spectral Domain Technique", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 40, No.12, December 1992.
- [3] H. Baudrand, "The Wave Concept in Electromagnetic Problems : Application in Integral Methods". Asia Pacific Microwave Conference APMC'96, New Delhi, 1996.
- [4] D.Bajon, H.Baudrand, "Application of Wave Concept Iterative Procedure (WCIP) to Planar Circuits", Micritec'2000, Hannover, pp.864-868, September 2000.

- [5] S.Akatimagool, "Electromagnetic Software Tools of Microwave Multi-layer Integrated Circuits and Components", The Journal of King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, 2005.
- [6] S.Akatimagool and S.Kamkleing, "A Planar Source Characteristics Analysis for Wave Iterative Method Simulation", ECTI-CON 2007, Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Chiengrai, 9-12 May 2007.
- [7] Sommart Kamkleing and Somsak Akatimagool, "Microwave Filter Education Supported by Wave Iterative Simulation Program", Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2008), Krabi, Thailand, 14-17 May 2008.
- [8] James C. Rautio, Veysel Demir, "Microstrip Conductor loss Models for Electromagnetic Analysis", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, March 2003.
- [9] Samir M. Hammadi, Samir M. El-Ghazaly, "Air Bridged Gate MESFET: A New Structure to Reduce Wave Propagation Effects in High Frequency Transistors", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, NO.6, June 1999.
- [10] James C.Rautio, "Free EM Simulator Analysis Spiral Inductor on Silicon", Microwave & RF Magazine, pp.165-172, September, 1999.