



การพัฒนาอัลกอริทึมของการวนรอบคลื่นในโครงสร้างหลายตัวกลางสำหรับวิเคราะห์สายอากาศโมโนโพลระนาบที่มีการป้อนพลังงานด้วยสายส่งไมโครสตริป

The Development of Wave Iterative Method of Multi Medium Structure for Microstrip Fed Planar Monopole Antenna Analysis

พินิจ เนื่องภิรมย์^{1*} และสมศักดิ์ อรรคทิมากุล²

Received: January, 2017; Accepted: March, 2017

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาอัลกอริทึมของการวนรอบคลื่นแบบใหม่สำหรับวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงสร้างหลายตัวกลางที่สามารถออกแบบระนาบตัวนำหลาย ๆ ชั้นได้ โดยอาศัยหลักการของพารามิเตอร์การจัดกระจายในการกำหนดพารามิเตอร์ของตัวกลางที่แยกเป็นวัสดุฉนวน ตัวนำ และแหล่งจ่าย ร่วมกับวิธีการวนรอบคลื่นแบบเดิมที่ใช้หลักการของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่านภายในวงจรสายส่ง จากนั้นพัฒนาในรูปแบบของโปรแกรมจำลองที่สามารถเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานได้ทางกราฟิกด้วยฟังก์ชัน GUI ของโปรแกรม MATLAB ผลการวิเคราะห์สายอากาศโมโนโพลระนาบที่มีการป้อนพลังงานด้วยสายส่งไมโครสตริปโดยใช้โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลอง CST และการวัดจริงด้วยเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานเวกเตอร์ พบว่าสายอากาศมีผลการทำงานที่สอดคล้องกันทำให้ผลการตอบสนองที่มีแถบความถี่กว้าง

คำสำคัญ : อัลกอริทึมของการวนรอบคลื่น; โครงสร้างหลายตัวกลาง; สายอากาศโมโนโพลระนาบที่มีการป้อนพลังงานด้วยสายส่งไมโครสตริป

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

² คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* Corresponding Author E - mail Address: elecprnt@rmutl.ac.th

Abstract

This paper presents the development of the novel algorithm of the Wave Iterative Method (WIM) for analyzing electromagnetic wave of multi medium electromagnetic structures to design the multi-layers conductor plane. The developed algorithm is based on the scattering parameters in determining the medium parameters that consist of dielectric conductor and planar source, and the iterative method using the principles of the incident, reflected and transmitted waves on transmission line circuit. Then a simulator was developed on the graphic user interface (GUI) of MATLAB program. Finally, we found that the analyzed results of the proposed antenna using developed simulator, the CST simulator and measurements with vector network analysis were in agreement with wide band frequency response.

Keywords: Wave Iterative Algorithm; Multi-Medium Structure; Microstrip Fed Planar Monopole Antenna

บทนำ

ปัจจุบันวงจรไมโครเวฟมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนานวัตกรรมและส่งผลต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศเป็นอย่างสูง โดยเฉพาะด้านการสื่อสารโทรคมนาคมที่พบว่ามีอุปกรณ์ใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟมากขึ้น (300MHz - 300GHz) ไม่ว่าจะเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Phone) เทคโนโลยีสื่อสารไร้สายบลูทูธ (Bluetooth Technology) เทคโนโลยีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย (Wireless Internet Technology) การสื่อสารผ่านระบบดาวเทียม (Satellite Communication) ไปจนถึงการประยุกต์ใช้ในการแพทย์ เกษตรกรรม และการศึกษา

การสร้างนวัตกรรมทางด้านวงจรไมโครเวฟ เริ่มจากการออกแบบด้วยวิธีการทางทฤษฎีและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบัน เช่น โปรแกรม Sonnet, HFSS และ CST เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ผลทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ผลการตอบสนองต่อความถี่ เป็นต้น จากนั้นนำไปสร้างเป็นชิ้นงานเพื่อวัดและทดสอบด้วยเครื่องมือวัดในลำดับต่อไป เมื่อพิจารณาโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ที่นำมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์วงจรเหล่านั้น พบว่าแต่ละโปรแกรมมีข้อจำกัดในการศึกษาและพัฒนาใช้งาน ใช้งบประมาณในการจัดซื้อจำนวนมาก ดังนั้นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) จึงมีความสำคัญที่สามารถนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบวงจรไมโครเวฟได้ เช่น Finite Element Method (FEM) [1], Method of Moments (MOM) [2], Finite Differential Time Domain (FDTD) [3] และ Transmission Line Matrix (TLM) [4] ซึ่งวิธีเชิงตัวเลขดังกล่าวสามารถพัฒนาและออกแบบเป็นโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ได้เช่นกัน

วิธีเชิงตัวเลขสำหรับวิเคราะห์วงจรด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ แต่ละวิธีมีข้อจำกัดและความเหมาะสมสำหรับวงจรที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันและขึ้นอยู่กับความถนัดของผู้ใช้งาน ดังนั้นที่ผ่านมาผิมนักวิจัยได้คิดค้นวิธีเชิงตัวเลขใหม่ โดยใช้หลักการของวิธีกระทำซ้ำ (Iterative Method) ที่คำนวณบนพื้นฐานของทฤษฎีสายส่ง (Transmission Line Theory) โดยกำหนดให้คลื่นตกกระทบ (Incident Wave) เดินทางผ่านตัวกลางต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน และก่อให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับและคลื่นส่งผ่านในทิศทางต่าง ๆ การวิเคราะห์จะใช้พารามิเตอร์กระจาย (Scattering Parameter) ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นเพื่อใช้สำหรับคำนวณหาผลลัพธ์ของคลื่น จนได้ค่าที่ลู่เข้าหาคำตอบที่ต้องการ (Convergence) รูปแบบการคำนวณจะประกอบไปด้วย 2 โดเมน ได้แก่ โดเมนจริง (Real Domain) ที่มีลักษณะการคำนวณบนพื้นที่ของวงจรที่แบ่งออกเป็นพิกเซล (Pixel) และโดเมนสเปกตรัม (Spectrum Domain) ที่ประกอบด้วยคลื่นในรูปแบบโมด (Mode) ของ TE และ TM การคำนวณคลื่นระหว่างสองโดเมนจะใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) และผลรวมของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับที่เกิดขึ้นบนพื้นที่วงจรสามารถคำนวณหาค่าของสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก ผลการตอบสนองทางความถี่ และพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องได้ [5]

วิธีการวนรอบของคลื่น มีการประยุกต์ใช้สำหรับวิเคราะห์และออกแบบวงจรไมโครเวฟอย่างหลากหลาย เช่น งานวิจัยของ Hanen และคณะ [6] ได้นำไปวิเคราะห์วงจรวงจรรองความถี่แถบผ่าน (Band-Pass Filter) บนวัสดุประเภทไมโครสตริป มีผลการตอบสนองความถี่ในย่าน 27.7 - 29.7 GHz เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบของโปรแกรมจำลอง HFSS ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน งานทางด้านสายอากาศ D'Assuncao และคณะ [7] ได้ออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศแบบแพตช์และปรับปรุงให้มีขนาดเล็กที่ใช้โครงสร้างของการลาดเอียง (Taper) โดยมีผลการตอบสนองต่อความถี่ที่ 2.43 และ 4.00 GHz ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวนรอบคลื่นมีความสอดคล้องกันกับผลที่วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายทางไฟฟ้า นอกจากวงจรไมโครเวฟพื้นฐานแล้ว วิธีการวนรอบของคลื่นยังประยุกต์ใช้งานกับวงจรประเภทอื่น ๆ เช่น วงจรประเภท RFID [8] โครงสร้างวงจรที่ใช้วัสดุพื้นผิวที่ขึ้นกับความถี่ (Frequency Selective Surface) [9] - [10] การวิเคราะห์วัสดุชั้นตัวกลางในตัวนำคลื่น (Substrate Integrated Waveguide) [11] วงจรที่มีขนาดที่แตกต่างกัน (Multi-Scale) [12] และวงจรทางด้านวิศวกรรมไมโครเวฟอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมาก

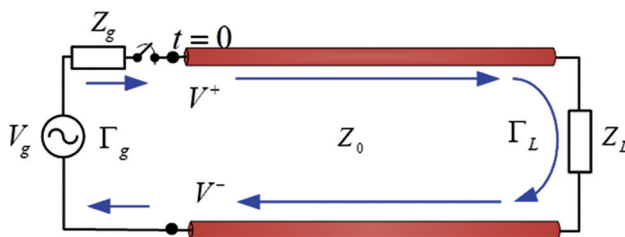
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการวนรอบของคลื่น พบว่าส่วนใหญ่นักวิจัยมีการออกแบบโครงสร้างของวงจรไมโครสตริปที่มีตัวกลางเป็นฐานรอง (Substrate) ของชั้นวงจรตัวนำและวางบนระนาบกราวด์แบบเต็มพื้นที่ของแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งในรูปแบบการคำนวณด้วยวิธีการวนรอบของคลื่นจะสามารถแทนที่ด้วยการเทียบเคียงทางไฟฟ้าของวงจรสายส่งและกำหนดเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่น วิธีการนี้มีข้อดีคือช่วยลดตัวแปรของการคำนวณหรือลดจำนวนชั้นวงจร (Layer) ให้น้อยลง ซึ่งส่งผลให้รูปแบบการคำนวณง่ายขึ้นและใช้เวลาอันน้อยลง ดังนั้นถ้าผู้ใช้ต้องการออกแบบโครงสร้างของระนาบกราวด์ที่มีรูปแบบที่หลากหลายและแตกต่างกัน [13] วิธีการวนรอบของคลื่นแบบเดิมจะไม่รองรับการคำนวณของวงจรในลักษณะดังกล่าว ซึ่งจำเป็นต้องมีการพัฒนารูปแบบการคำนวณที่ยืดหยุ่นต่อการใช้งานดังกล่าว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการออกแบบวงจรที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาอัลกอริทึมของการวนรอบคลื่นแบบใหม่ ให้สามารถรองรับการออกแบบระบบการวนค้ของวงจรที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบและโครงสร้างได้ตามต้องการเพื่อให้สอดคล้องกับโครงสร้างของวงจรไมโครเวฟที่มีความซับซ้อนมากขึ้นในปัจจุบัน โดยจะอาศัยหลักการของทฤษฎีการวนรอบของคลื่น (Wave Iterative Method) ร่วมกับวิธีของเมตริกซ์กระจาย (Scattering Matrix Method) โดยการคำนวณในรูปแบบของชั้นตัวนำที่วางอยู่บนตัวกลางที่มีหลาย ๆ ชั้น (Multi-Medium) ของวงจรประเภทไมโครสตริป

หลักการของทฤษฎีการวนรอบคลื่น

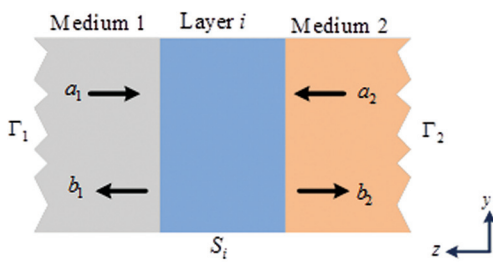
ทฤษฎีการวนรอบของคลื่นในปัจจุบัน ถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ ๆ ได้แก่ ทฤษฎีการวนรอบของคลื่นสำหรับวิเคราะห์วงจรประเภทท่อนำคลื่น (Waveguide) [14] และทฤษฎีการวนรอบของคลื่นสำหรับวิเคราะห์วงจรความถี่สูงประเภทไมโครสตริป (Microstrip) [15] โดยทั้งสองรูปแบบที่กล่าวมา ใช้หลักการพื้นฐานของการคำนวณเดียวกัน แต่แตกต่างกันที่มีการกำหนดโครงสร้างของแหล่งจ่ายและคุณสมบัติของวัสดุตัวกลางที่ไม่เหมือนกันด้วยการสร้างเป็นเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) ในบทความวิจัยนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการวนรอบของคลื่นสำหรับวงจรไมโครสตริป เนื่องจากเป็นวงจรที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการทำงานของวงจรไมโครเวฟอย่างแพร่หลาย และกำลังเป็นที่สนใจในการใช้พัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่อย่างต่อเนื่อง

หลักการของทฤษฎีการวนรอบคลื่นพัฒนามาจากหลักการพื้นฐานของคลื่นที่เดินทางภายในสายส่ง (Transmission Line) ซึ่งพบว่าเมื่อป้อนแหล่งจ่าย (Source) ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ภายใน (Z_g) เข้ากับสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Z_0) ที่ปลายสายต่อกับภาระโหลด (Z_L) ในช่วงเวลาเริ่มต้นจะมีคลื่นตกกระทบ (Incident Wave) (V^+) เดินทางจากแหล่งจ่ายไปยังภาระโหลด และในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ของทั้ง 3 ค่า อยู่ในสภาวะไม่แมตช์ (Miss Match) จะส่งผลให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับ (Reflected Wave) (V^-) จากภาระโหลดกลับมายังแหล่งจ่ายอีกครั้ง ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของโหลด (Γ_L) ในกรณีเดียวกันคลื่นสะท้อนกลับที่เดินทางมายังแหล่งจ่าย จะถูกย้อนกลับเป็นคลื่นตกกระทบอีกครั้ง ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแหล่งจ่าย (Γ_g) และจะเกิดปรากฏการณ์แบบนี้ซ้ำ ๆ จนกระทั่งผลลัพธ์เกิดการลู่เข้าสู่ค่าตอบ (Convergence) นั่นเอง ดังแสดงหลักการดังรูปที่ 1

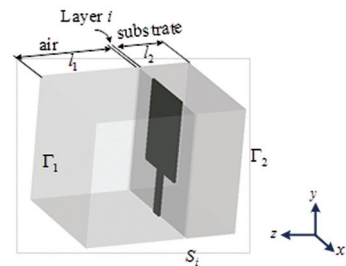


รูปที่ 1 คลื่นที่เดินทางบนสายส่ง

จากหลักการของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนไปและกลับในสายส่ง เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวงจรไมโครเวฟสามารถแบ่งโครงสร้างออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชั้นของตัวนำ (Conductor) และชั้นของไดอิเล็กตริก (Dielectric) ซึ่งอาจมีมากกว่า 1 ชั้นก็ได้ ดังนั้นการแพร่กระจายของคลื่นภายในโครงสร้างดังกล่าวจะปรากฏคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนกลับ และคลื่นส่งผ่าน (Transmitted Wave) เนื่องจากคลื่นจากแหล่งจ่ายจะแพร่กระจายและตกกระทบในตัวกลาง กรณีที่ตัวกลางเป็นตัวนำจะเกิดคลื่นสะท้อนกลับ แต่กรณีที่ชั้นไดอิเล็กตริกจะเกิดคลื่นส่งผ่าน ด้วยเหตุนี้ในกรณีของตัวกลางที่มีหลายชั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดคุณสมบัติของตัวกลางแต่ละชั้นด้วยพารามิเตอร์การจัดกระจาย (Scattering Parameter) แสดงดังรูปที่ 2 (ก) สำหรับการวิเคราะห์ที่โครงสร้างวงจรไมโครเวฟที่เป็นการผสมผสานกันระหว่างชิ้นส่วนของวงจรไมโครสตริปในท่อนำคลื่นพบว่า โครงสร้างภายในจะมีชั้นตัวกลางที่เป็นอากาศ และชั้นที่เป็นวัสดุวงจรไมโครสตริปที่ประกอบไปด้วยตัวนำและวัสดุฐานรอง แสดงดังรูปที่ 2 (ข)



(ก) ตัวกลางที่อยู่ภายในสายส่ง



(ข) โครงสร้างของวงจรไมโครสตริป

รูปที่ 2 โครงสร้างตัวกลางและวงจรไมโครสตริป

หลักการของการวนรอบคลื่นเมื่อประยุกต์ใช้กับตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นทั้งตัวนำและไดอิเล็กตริก ดังรูปที่ 2 (ก) จะพบว่าต้องมีการนำหลักการของการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์การจัดกระจาย สมการความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การจัดกระจาย เขียนได้ดังนี้ [14]

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{21}a_2 \quad (1)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (2)$$

จากสมการของการหาค่าพารามิเตอร์การจัดกระจาย สามารถสรุปความหมายของตัวแปรโดยภาพรวมได้ดังนี้

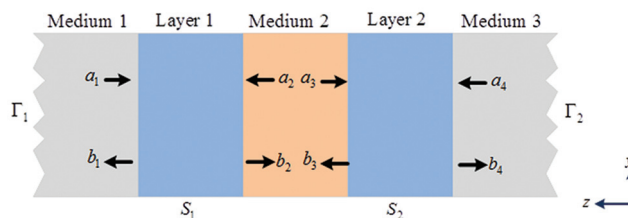
$$S_{ii} = \left. \frac{B_i}{A_i} \right|_{A_j=0} \quad \text{หมายถึง} \quad \text{ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection Coefficient)}$$

$$S_{ij} = \left. \frac{B_j}{A_i} \right|_{A_j=0} \quad \text{หมายถึง} \quad \text{ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission Coefficient)}$$

ดังนั้นเมื่อทำการหาความสัมพันธ์ของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนกลับ และคลื่นส่งผ่านในแต่ละรอบ จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้นั่นเอง

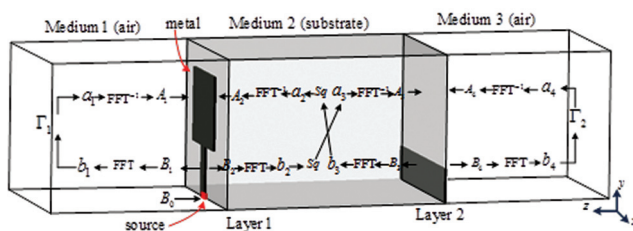
อัลกอริทึมของการวนรอบคลื่นสำหรับวิเคราะห์วงจรสายส่งแบบหลายตัวกลาง

การวนรอบของคลื่นในสายส่งสำหรับการประยุกต์ใช้กับวงจรไมโครสตริป ที่มีการกำหนดโครงสร้างของวงจรในรูปแบบของชั้นตัวนำและชั้นของไดอิเล็กตริก ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับในวัสดุตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริก จะถูกกำหนดเพื่อคำนวณหาคลื่นตกกระทบ และมีคลื่นสะท้อนกลับที่แพร่กระจายออกมาจากตัวกลางที่เปรียบเสมือนการกำหนดกระนาบกราวด์แบบเต็มแผ่นให้กับวงจรประเภทไมโครสตริปนั่นเอง แสดงดังรูปที่ 2 (ข) ด้วยเหตุนี้เองจึงเป็นข้อจำกัดสำหรับวงจรบางประเภท เช่น สายอากาศ ที่ต้องการปรับโครงสร้างระนาบกราวด์ร่วมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้น ในหัวข้อนี้จะนำเสนออัลกอริทึมของการวนรอบคลื่นแบบใหม่ที่สามารถกำหนดและวิเคราะห์วงจรไมโครสตริปในวงจรสายส่งที่สามารถกำหนดกระนาบกราวด์ได้ แสดงหลักการดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างวงจรสายส่งแบบหลายตัวกลาง

แนวคิดของทฤษฎีการวนรอบของคลื่นสำหรับวิเคราะห์วงจรที่มีการควบคุมกระนาบกราวด์ จะอาศัยการคำนวณพารามิเตอร์กระจายแบบหลายตัวกลางที่มีวัสดุฐานรอง หรือไดอิเล็กตริก (Medium 2) คั่นกลางระหว่างตัวนำ และที่ด้านบนและด้านล่างของวงจรจะถูกเชื่อมต่อกับตัวกลางที่เป็นอากาศ (Medium 1, 3) แสดงดังรูปที่ 3 และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างสายอากาศที่มีการควบคุมกระนาบกราวด์ร่วม จะได้ผลแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 หลักการของคลื่นที่เกิดขึ้นภายในวงจรแบบหลายตัวกลาง

หลักการของทฤษฎีการวนรอบคลื่นแบบหลายตัวกลาง สำหรับวิเคราะห์วงจรไมโครสตริปที่สามารถกำหนดระนาบกราวด์ร่วมได้ ที่ใช้หลักการของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนกลับ และคลื่นส่งผ่านที่เดินทางภายในวงจรสายส่งโครงสร้างของวงจรถูกกำหนดด้วยเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) และเขียนสมการในรูปของเมทริกซ์ของพารามิเตอร์กระจายที่แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งจ่าย (Source) ตัวนำ (Conductor) วัสดุฐานรอง (Substrate) รูปแบบการคำนวณ แบ่งออกเป็น 2 โดเมน ได้แก่ โดเมนสเปกตรัม (Spectrum Domain) ในรูปแบบของโหมด (Mode) สำหรับคลื่นที่แพร่กระจายในตัวกลาง เช่น อากาศ หรือ วัสดุฐานรอง และโดเมนจริง (Real Domain) ที่มีการกำหนดพื้นที่ออกเป็นพิกเซล (Pixel) สำหรับวิเคราะห์คลื่นที่มีการแพร่กระจายจากโครงสร้างของวงจร โดยอัลกอริทึมของการวนรอบคลื่นที่นำเสนอสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

- 1) กำหนดแหล่งจ่าย (B_0)
- 2) แปลงคลื่นจากโดเมนจริงให้เป็นโดเมนสเปกตรัม: $b_i = [FFT]B_i$
- 3) คำนวณคลื่นตกกระทบและคลื่นส่งผ่าน $a_1 = [\Gamma_1]b_1, a_2 = [Sq]^{-1}b_3, a_3 = [Sq]^{-1}b_2, a_4 = [\Gamma_2]b_4$
- 4) แปลงคลื่นตกกระทบโดเมนสเปกตรัมเป็นโดเมนจริง: $A_i = [FFT]^{-1}a_i$
- 5) คำนวณคลื่นสะท้อนกลับ $B_i = S \cdot B_0$
- 6) คำนวณซ้ำในข้อที่ 2 ถึง 5 จนกว่าผลลัพธ์จะเข้าสู่ค่าตอบ
- 7) หาผลรวมของคลื่น

กระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

- 1) การกำหนดแหล่งจ่าย (Source) แหล่งจ่ายสำหรับวงจรสายอากาศไมโครสตริป (B_0) ดังรูปที่ 4 ที่มีการแพร่กระจายออกมาจากตัวนำ กำหนดในรูปแบบของโดเมนจริง เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (3) [15]

$$B_{0x,y} = \frac{1}{1 + n_1 + n_2} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{Z_{01}} \\ 1/\sqrt{Z_{02}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } n_1 = \frac{Z_0}{Z_{01}}, n_2 = \frac{Z_0}{Z_{02}}, Z_{0i} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{ri}}{\epsilon_0 \epsilon_{ri}}}$$

โดยที่

i หมายถึง จำนวนลำดับชั้นของวงจร

x, y หมายถึง ทิศทางของคลื่นตามแนวแกน x และแกน y ของโดเมนจริง

- 2) การแปลงสภาพระหว่างโดเมน รูปแบบการแปลงสภาพระหว่างโดเมนจากโดเมนจริงเป็นโดเมนสเปกตรัม ใช้หลักการของการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) โดยเขียนสมการได้ดังสมการที่ (4) [15]

$$\begin{bmatrix} b_{mn}^{TE} \\ b_{mn}^{TM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ymn} & -K_{xmn} \\ K_{xmn} & K_{ymn} \end{bmatrix} FFT \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

ในทำนองเดียวกันกับการแปลงโดเมนสเปคตรัมให้เป็นโดเมนจริง ใช้วิธีการแปลงกลับฟูเรียร์
ย้อนกลับอย่างรวดเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform : FFT^{-1}) เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ymn} & K_{xmn} \\ -K_{xmn} & K_{ymn} \end{bmatrix} FFT^{-1} \begin{bmatrix} a_{mn}^{TE} \\ a_{mn}^{TM} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{เมื่อ } K_{xmn} = \frac{m}{a} \frac{1}{\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}} \text{ และ } K_{ymn} = \frac{n}{b} \frac{1}{\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}$$

m, n หมายถึง ลำดับของโหมด

a, b หมายถึง ความกว้างและความยาวของโครงสร้างวงจรไมโครสตริบ

3) การคำนวณคลื่นตกกระทบและคลื่นส่งผ่าน คลื่นสะท้อนกลับที่มีการแพร่กระจายออกจาก
โครงสร้างวงจรที่เป็นตัวนำจะมีการกระจายไปใน 2 ทิศทาง ได้แก่ ทิศทางตรงกันข้าม (คลื่นตกกระทบ)
และทิศทางเดียวกัน (คลื่นส่งผ่าน) สมการสำหรับการคำนวณจะอาศัยคุณสมบัติสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ
และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ที่สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (6)

3.1 กรณีคลื่นตกกระทบ (a_1, a_4)

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

เมื่อ Γ หมายถึงสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของโดเมนสเปคตรัม หาค่าได้จากสมการที่ (7)

$$\Gamma_i^{TE/TM} = \frac{1 - Z_{0i} Y_{m,n}^{TE/TM}}{1 + Z_{0i} Y_{m,n}^{TE/TM}} \quad (7)$$

โดยที่ $TE_{m,n}, TM_{m,n}$ หมายถึง ลำดับของโหมดแอดมิตแดนซ์ ที่เกิดขึ้นภายในกล่องตัวนำ

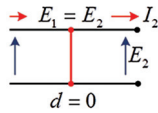
$$Y_{m,n}^{TE} = \frac{\gamma}{j\omega\mu_0\mu_r}, Y_{m,n}^{TM} = \frac{j\omega\epsilon_0\epsilon_r}{\gamma}, \gamma = \sqrt{\left(\frac{\pi m}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi n}{b}\right)^2 - k_0^2\epsilon_r}, k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}.$$

3.2 กรณีคลื่นส่งผ่าน (a_2, a_3)

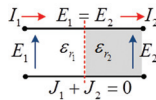
$$\begin{bmatrix} a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & S_q \\ S_q & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

เมื่อ $S_q = \frac{1}{\cosh(\gamma h_i) + \sinh(\gamma h_i)}$ และ h_i หมายถึงความหนาของวัสดุฐานรอง

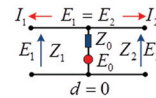
4) การคำนวณคลื่นสะท้อนกลับ คลื่นสะท้อนกลับมีการแพร่กระจายออกจากโครงสร้างของวงจรที่ประกอบไปด้วย แหล่งจ่าย ตัวนำ และไดอิเล็กทริก ที่เกิดจากคุณสมบัติของคลื่นตกกระทบ และโครงสร้างของวงจรที่ถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์การจัดกระจายและเงื่อนไขขอบ สามารถเขียนเป็นวงจรเทียบเคียง แสดงดังรูปที่ 5



(ก) ตัวนำ



(ข) ไดอิเล็กทริก



(ค) แหล่งจ่าย

รูปที่ 5 วงจรเทียบเคียงของวงจรสายส่งแบบสองตัวกลางที่แตกต่างกัน

รูปที่ 5 แสดงวงจรเทียบเคียงของวงจรสายส่งแบบสองตัวกลางที่แตกต่างกันสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศที่กำหนด ซึ่งภายในโครงสร้างของวงจรประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ตัวนำ ไดอิเล็กทริก และแหล่งจ่าย เงื่อนไขขอบและสมการพารามิเตอร์การจัดกระจายของแต่ละโครงสร้างเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (9) [15]

กรณีที่ 1: ที่รอยต่อของตัวนำ (Conductor: C) ค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันและเท่ากับศูนย์ จะได้เงื่อนไขขอบ $E_1 = E_2 = 0$ เขียนความสัมพันธ์ของคลื่นได้ดังสมการที่ (9)

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}_C = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}_M \quad (9)$$

กรณีที่ 2: โครงสร้างของไดอิเล็กทริก (Dielectric: D) ที่บริเวณรอยต่อของวงจร เงื่อนไขขอบ; $E_1 = E_2$ และ $J_1 + J_2 = 0$ เขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (10)

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}_D = \begin{bmatrix} 1 - n^2/n^2 + 1 & 2n/n^2 + 1 \\ 2n/n^2 + 1 & n^2 - 1/n^2 + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}_D \quad (10)$$

กรณีที่ 3: แหล่งจ่ายของวงจรสำหรับวงจรไมโครสตริป (Source: S) พิจารณารูปที่ 5 (ค) เงื่อนไขขอบ; $E_1 = E_2 = E_0 - Z_0(J_1 + J_2)$ เขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (7)

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}_S = \begin{bmatrix} \frac{-1 + n_1 - n_2}{1 + n_1 + n_2} & \frac{2n_3}{1 + n_1 + n_2} \\ \frac{2n_3}{1 + n_1 + n_2} & \frac{-1 - n_1 + n_2}{1 + n_1 + n_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}_S \quad (11)$$

เมื่อ E_0 หมายถึง แหล่งจ่ายในรูปแบบของสนามไฟฟ้า
 Z_0 หมายถึง อิมพีแดนซ์ภายในแหล่งจ่าย

$$n = \sqrt{\frac{Z_{01}}{Z_{02}}} \quad \text{และ} \quad n_3 = \frac{Z_0}{\sqrt{Z_{01}Z_{02}}} \quad (12)$$

5) การหาผลรวมของคลื่น กระบวนการวนรอบของคลื่นเมื่อผลลัพธ์เข้าสู่ค่าตอบ (Convergence) การหาผลรวมของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนกลับ จะสามารถนำไปแสดงผลเป็นค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (13) - (14)

$$E_{(x,y)}^k = \sqrt{Z_{0i}} (A_i^k + B_i^k) \quad (13)$$

$$J_{(x,y)}^k = (A_i^k + B_i^k) / \sqrt{Z_{0i}} \quad (14)$$

สามารถคำนวณค่าแอดมิตแตนซ์ได้จากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ดังสมการที่ (15)

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

ในทำนองเดียวกันค่าอิมพีแดนซ์หาได้จากอัตราส่วนของค่าสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ (16)

$$Z = \sum_{x,y} \left(\frac{E_{(x,y)}}{J_{(x,y)}} \right) \quad (16)$$

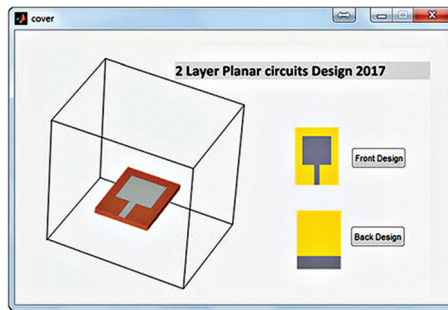
การหาผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรในรูปแบบของพารามิเตอร์จัดกระจายสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (17)

$$S = [Z_0 - Z][Z_0 + Z]^{-1} \quad (17)$$

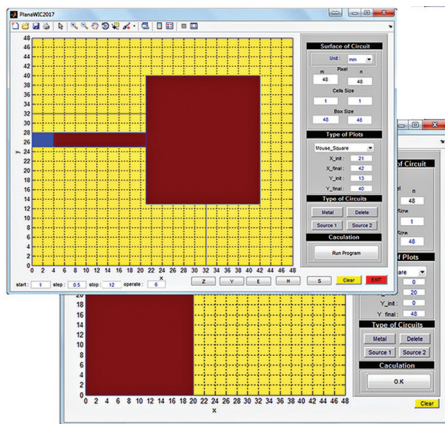
ผลของวิธีเชิงตัวเลข

การพัฒนาอัลกอริทึมของการวนรอบคลื่นสำหรับวงจรแบบหลายตัวกลาง เพื่อแก้ปัญหาของวิธีการเดิมคือ ไม่สามารถควบคุมระยะนาบกราวด์ร่วมที่วางอยู่ในระนาบด้านหลังได้ ทำให้การพัฒนาวงจรไมโครเวฟมีข้อจำกัด ในบทความนี้จึงนำเสนอเทคนิคของการออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมของการวนรอบคลื่นให้สามารถควบคุมระยะนาบกราวด์ร่วมโดยอาศัยหลักการในการกำหนดคุณสมบัติของโครงสร้างวงจรด้วยพารามิเตอร์จัดกระจาย หาผลรวมของคลื่นทั้งหมดและแสดงผลของสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า และผลการตอบสนองทางความถี่ สำหรับกรณีศึกษาวงจรสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมที่มีการป้อนสายส่งแบบไมโครสตรูป

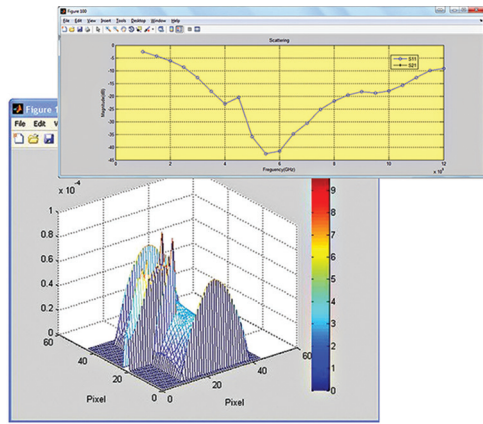
อัลกอริทึมของการวนรอบคลื่นและสมการในการคำนวณถูกนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์ทั้งวงจรสายอากาศไมโครสตรูป โดยสร้างเป็นโปรแกรมจำลองด้วยฟังก์ชัน GUI ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งประกอบไปด้วยหน้าต่างสำหรับปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ เช่น ขนาด จำนวนพิกเซล และการเขียนโครงสร้างของสายอากาศ หน้าต่างแสดงผล และหน้าต่างเมนูสำหรับการควบคุมโปรแกรม แสดงดังรูปที่ 6



(ก) หน้าต่างโปรแกรมหลัก

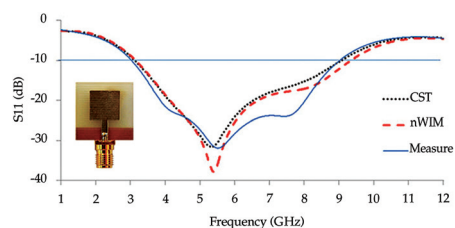
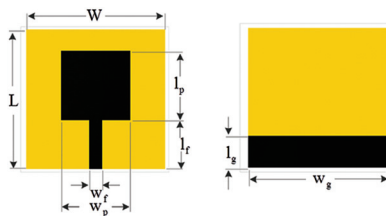


(ข) หน้าต่างการออกแบบวงจร
รูปที่ 6 โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้น



(ค) หน้าต่างการแสดงผลฟรี

การทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมจำลองที่พัฒนามบนพื้นฐานของอัลกอริทึมของการวนรอบ คลื่นแบบใหม่ สำหรับวงจรไมโครสตริปที่สามารถปรับขนาดของระนาบกราวด์ได้ ในบทความนี้ได้ยกตัวอย่าง กรณีศึกษาของวงจรสายอากาศโมโนโพลาร์นาบที่มีการป้อนพลังงานด้วยสายส่งไมโครสตริป โดยมีขนาด ดังนี้ $W = 20$ มม. $L = 20$ มม. $W_p = 10$ มม. $l_p = 10$ มม. $w_f = 1.86$ มม. $l_f = 7$ มม. $w_g = 20$ มม. และ $l_g = 4.5$ มม. แสดงดังรูปที่ 7 (ก)



(ก) โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอ (ข) ผลการตอบสนองต่อความถี่ของสายอากาศ (S11)
รูปที่ 7 โครงสร้างและผลการตอบสนองทางความถี่ของสายอากาศที่สร้างขึ้น

การสร้างสายอากาศที่นำเสนอบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 จะใช้หัวต่อ SMA สำหรับการเชื่อมต่อสัญญาณจากเครื่องมือวัดสัญญาณกับตัวสายอากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างการจำลองของรูปที่ 4 จะพบว่าโครงสร้างวงจรชั้นที่ 1 และ 2 (Layer1, 2) เปรียบเสมือนกับโครงสร้างของสายอากาศและระนาบกราวด์ในรูปที่ 7 (ก) ส่วนแหล่งจ่าย (Source) เปรียบเสมือนกับจุดเชื่อมต่อพลังงานจาก SMA จากนั้นทำการวัดการตอบสนองต่อความถี่ด้วยเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานเวกเตอร์ (Network Analyzer) การเปรียบเทียบผลการวัดและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST และโปรแกรมจำลอง GUI ที่พัฒนาบนพื้นฐานของวิธีการวนรอบคลื่นแบบใหม่ (New Wave Iterative Method: nWIM) ผลจากการวิเคราะห์พบว่าสายอากาศมีการตอบสนองที่ช่วงความถี่ 3.1 - 9.4 GHz ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 5.2 GHz สูงกว่าผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST ประมาณ 100 MHz และต่ำกว่าผลการวัดประมาณ 50 MHz โดยภาพรวมพบว่าผลการเปรียบเทียบด้วยอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกันกับโปรแกรมจำลองและการวัดจริง

สรุปผล

บทความนี้นำเสนออัลกอริทึมของวิธีการวนรอบคลื่นแบบใหม่ สำหรับแก้ปัญหาวิธีการแบบเดิมที่ไม่สามารถควบคุมระนาบกราวด์ที่วางอยู่ในชั้นตัวกลางของวงจรไมโครสตริบได้ ผลจากการออกแบบระนาบกราวด์ตามที่ผู้ใช้ต้องการจะทำให้วงจรมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและรูปแบบการทำงานของวงจรจะแตกต่างไปจากเดิม เช่น ทำให้ผลการตอบสนองทางความถี่ในแถบความถี่ที่กว้างขึ้นที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบแถบความถี่กว้างมาก (Ultra-Wideband) หรือใช้สำหรับวิเคราะห์ท่วงจรประเภทอภิวัด (Meta-Materials) ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของวิธีการวนรอบคลื่นแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปสร้างเป็นโปรแกรมจำลองด้วยฟังก์ชัน GUI ของ MATLAB เพื่อนำไปวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริบแบบสี่เหลี่ยมที่มีการควบคุมโครงสร้างของระนาบกราวด์ได้ ผลการเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ (CST) และการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานเวกเตอร์ พบว่าวงจรสายอากาศที่สร้างขึ้นมีความสอดคล้องกันที่ผลการตอบสนองทางความถี่ที่มีแถบความถี่ไม่น้อยกว่า 500 MHz ดังนั้นวิธีการวนรอบของคลื่นสำหรับวิเคราะห์ท่วงจรแบบหลายตัวกลางมีความถูกต้องที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์ท่วงจรไมโครเวฟอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

References

- [1] S. Yan and J.-M. Jin. (2015). Theoretical Formulation of A Time - Domain Finite Element Method for Nonlinear Magnetic Problems in Three Dimensions (Invited Paper). Progress In Electromagnetics Research. Vol. 153. pp. 33-55
- [2] S. Hatamzadeh-Varmazyar, M. Naser-Moghadasi, and Z. Masouri. (2008). A Moment Method Method Simulation of Electromagnetic Scattering from Conduction Bodies. Progress In Electromagnetics Research. Vol. 81. pp. 99-119

- [3] W. Wang, P. Liu, and Y. Qin. (2013). An Unconditional Stable 1D-FDTD Method for Modeling Transmission Lines based on Precise Split-Step Scheme. *Progress In Electromagnetics Research*. Vol. 135. pp. 245-260
- [4] J. Zhang, M.Y. Koledintseva, G. Antonini, J.L. Drewniak, A. Orlandi, and K.N. Rozanov. (2010). Planar Transmission Line Method for Characterization of Printed Circuit Board Dielectrics. *Progress In Electromagnetics Research*. Vol. 102. pp. 267-286
- [5] A. Gharsallah, A. Gharbi, and H. Baudrand. (2001). Efficient Analysis of Multiport Passive Circuits Using the Iterative Technique. *Electromagnetics*. Vol. 21. No. 1. pp. 73-84
- [6] H. Hanen, L. Iassaad, G. Ali, and G. Abdelehafidh. (2013). Design of Pass Band Filter Based on NRD-Guide with the Iterative Method. In *2013 International Conference on Computer Applications Technology (ICCAT)*. pp. 1-5
- [7] A.D'Assuncao, G. Fontgalland, M. Titaouine, H. Baudrand, and D. Gomes Neto. (2009). Analysis of Tapered Microstrip Patch Antenna by the Wave Concept Iterative Procedure. In *Proceeding of 2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2009)*. Vol. 4. pp. 62-66
- [8] A.D' assuncao, A. Neto, H. Baudrand, G. Fontgalland and P. Lacouth. (2011). Numerical characterization of RFID tags using WCIP. *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011)*. pp. 12-16
- [9] E. A. El Amjed Hajlaoui, H. Trabelsi, A. Gharsallah, and H. Baudrand. (2008). Analysis of Novel Dual-Resonant and Dual-Polarized Frequency Selective Surface using Periodic contribution of Wave Concept Iterative Process: PPMS-WCIP. In *2008 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications*. pp. 1-6
- [10] S. Aroussi, L. Latrach, N. Sboui, A. Gharsallah, A. Gharbi, and H. Baudrand. (2011). Efficient Analysis of Complex FSS Structure Using the WCIP Method. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. Vol. 3. pp. 447-451
- [11] J. Hajri, H. Hrizi, N. Sboui, and H. Baudrand. (2015). Efficient Study of Substrate Integrated Waveguide Devices. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*. Vol. 9. No. 2. pp. 375-379
- [12] H. Megnafi, N. Boukli Hacene, A. Benomar, H. Baudrand and N. Raveu. (2011). Analysis of Microstrip Cascaded Quadruplet Filters by a Multi-Scale Wave Concept Iterative Procedure (M.WCIP). *Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*. pp. 93-96

- [13] M.G. Al-Halawani, M. Al-Najjar, and M.K. Abdelazeez. (2016). Microstrip Antenna Design for UWB Applications. In 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). pp. 43-44
- [14] S. Akatimagool and S. Choocadee. (2013). Wave Iterative Method for Electromagnetic Simulation. In Wave Propagation Theories and Applications. Vol. 1. pp. 331-352
- [15] S. Khamkleang and W. Nuansoi. (2012). Analysis of Microstrip Low-Pass Elliptic Filter by Wave Iterative Method (WIM). In 2012 Spring Congress on Engineering and Technology. pp. 1-4