

การออกแบบวงจรกรองความถี่แถบผ่าน บนโครงสร้างไมโครสตริปด้วยเรโซเนเตอร์

อิมพีแดนซ์แบบพับด้วยความถี่ 2.4 GHz

Design of Bandpass filter design 2.4 GHz using stepped impedance

Resonator on microstrip structure

ชัย แจ่มใส, สุขุม จุฬางตุรศิริรัตน์ และ วิชัย ครองกิจศิริ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตคลองหลวง

เลขที่ 199 ถนนพหลโยธิน-วาริชภูมิ ต. พหลโยธิน อ.พหลโยธิน จ.สระบุรี 47160 โทรศัพท์ 042-772-285

E-mail: jamsai.doy@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านแถบบนโครงสร้างไมโครสตริปโดยใช้เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบพับ ร่วมกับสแตมป์วงจรเปิดเพื่อกำจัดความถี่ปลอมเทียม มีการออกแบบที่ความถี่กลาง 2.4 GHz โดยใช้เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบพับ เพื่อเลื่อนความถี่ปลอมเทียมออกไป และใช้สแตมป์วงจรเปิดเพื่อกำจัดความถี่ปลอมเทียมที่เกิดขึ้นจากการสร้างและวัดชิ้นงาน ได้ผลดังนี้คือที่ความถี่กลาง 2.4 GHz ค่าการสูญเสียใส่แทรก (S_{21}) มีค่า -0.8 dB, ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) มีค่าต่ำกว่า 30 dB และมีค่าแบนวิดท์ 100 MHz สามารถนำไปใช้งานในย่านความถี่ไวไฟ 2.4 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 b/g

คำสำคัญ: วงจรผ่านแถบ, เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์, ความถี่ปลอมเทียม, สแตมป์วงจรเปิด

Abstract

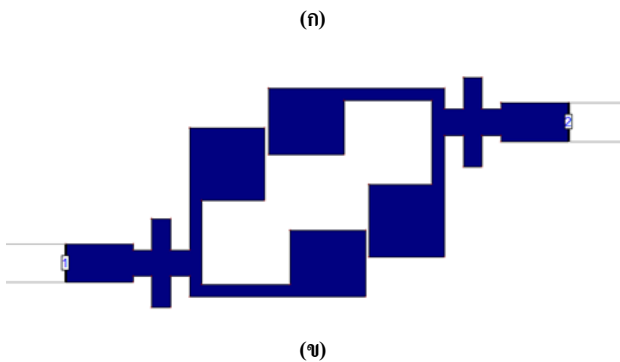
This article proposes a design of band pass filter circuits using folded stepped -impedance resonator with open stubs. The circuit has been designed at the fundamental frequency of 2.4 GHz corresponding to the IEEE 802.11 b/g standard. The measured results of the return loss (S_{11}) and insertion loss (S_{21}) value are -30 dB and -0.8 dB respectively. Bandwidth values of circuit are 100 MHz supported and covered frequency pass band.

Keywords: Bandpass filter, stepped-impedance resonator, spurious frequency, open stub

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารย่านความถี่ไมโครเวฟ (0.3 GHz-300 GHz) ได้ถูกนำมาใช้งานในระบบโทรคมนาคมอย่างกว้างขวาง ในปัจจุบันเช่น ด้านวิทยุ ระบบดาวเทียม ระบบเรดาร์ ระบบเตาไมโครเวฟ เป็นต้น และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในอนาคตโดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication Technology) ซึ่งทำให้การติดต่อสื่อสารมีความคล่องตัวสะดวกและรวดเร็ว ลดข้อจำกัดด้านระยะทางในการติดต่อสื่อสาร ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ใช้งานในด้านต่าง ๆ ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยีการสื่อสารมาประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ เช่นการสื่อสารที่อยู่ในรูปแบบสื่อผสม

(Multimedia) ที่มีการผสมผสานเข้าไปในระบบการสื่อสารของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม ระบบวิทยุสื่อสารรวมถึงระบบงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวงจรความถี่สูง ซึ่งทั้งหมดนี้ก่อให้เกิดผลกระทบในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านการศึกษา ด้านวิทยาศาสตร์ ด้านการเกษตร ด้านการแพทย์และสาธารณสุข และด้านอื่น ๆ อีกมากมาย ซึ่งรูปแบบของวงจรที่ใช้ต้องมีประสิทธิภาพและขนาดเล็ก เพื่อให้อุปกรณ์ที่ถูกสร้างมีคุณภาพในการนำไปใช้งานจริง ย่านไมโครเวฟ (300 MHz-300 GHz) [1] ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่สูงมากและมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตรถึง 1 เมตร ทำให้การออกแบบวงจรกรองความถี่นั้นทำได้ยากยิ่งขึ้นเนื่องจากเกิดส่วนประกอบแบบกระจาย (Distributed



รูปที่ 1 โครงสร้างของวงจรกรองความถี่แถบผ่านที่นำเสนอ ก) แบบ
ธรรมดา และ ข) แบบเชื่อมต่อสลับโหลดที่พอร์ต

Components) ขึ้นในวงจร จึงทำให้วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปเป็นที่นิยมนำมาใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟเนื่องจากมีลักษณะวงจรที่ออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้ส่วนประกอบแบบกลุ่มก้อน (Lumped Components) ใด ๆ ทำให้ง่ายต่อการเชื่อมต่อกับวงจรภาคอื่น ๆ ภายในเครื่องรับ-ส่งคลื่นวิทยุอีกทั้งยังมีขนาดเล็ก เกิดการสูญเสียน้อย สามารถทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟได้เป็นอย่างดี และมีต้นทุนในการสร้างที่ไม่สูงมากนัก และความต้องการของวงจรกรองผ่านแถบที่มีขนาดกะทัดรัด คุณลักษณะการตอบสนองด้านความถี่ที่ดี รวมทั้งมีการสูญเสียต่ำ จึงเป็นคุณสมบัติที่ผู้พัฒนาพยายามออกแบบให้ได้วงจรกรองผ่านแถบที่มีคุณสมบัติที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยโครงสร้างของวงจรกรองผ่านแถบนี้นั้นจึงมีมากมายหลายรูปแบบ

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวงจรกรองความถี่ย่านไมโครเวฟ ทำหน้าที่กำจัดสัญญาณรบกวนซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการออกจากระบบ แต่จะยอมให้สัญญาณเฉพาะช่วงความถี่ที่ต้องการผ่านไปได้ เรียกวงจรนี้ว่า วงจรกรองผ่านแถบความถี่ (Band Pass Filter) ส่วนใหญ่แล้ววงจรมักถูกสร้างบน สายส่งไมโครสตริป ด้วยเหตุที่เป็นสายส่งโครงสร้างระนาบที่มีความสะดวกในการเชื่อมต่อวงจรส่วนอื่น เมื่อเทียบกับสายส่งโครงสร้างระนาบอื่น

2. วงจรเรโซเนเตอร์แบบขั้น

วงจรเรโซเนเตอร์ที่มีผลตอบสนองความถี่แบบแถบผ่านสามารถสังเคราะห์ขึ้นมาจากสายส่งหรือวงจรอื่นๆ หลายรูปแบบเช่น

สายส่งไมโครสตริปหรือสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป วงจรกรองความถี่แถบผ่านที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากสายส่งหลายส่วน คือวงจรแบบพื้นฐานที่นักวิจัยแทบทุกคนต้องรู้จัก [2] การออกแบบและสร้างทำได้ง่าย แต่ก็มีปัญหาเรื่องความไม่สมมาตรของผลตอบสนองความถี่และการเกิดผลตอบสนองปลอมที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์หรือความถี่ใกล้เคียง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดผลตอบสนองปลอมที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ $2f_0$ จากเหตุผลดังกล่าวเมื่อนำสายส่งเชื่อมต่อไปสร้างวงจรเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนก็เลยทำให้ข้อด้อยดังกล่าวไปกระทบต่อการทำงานของวงจรเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนที่มีสายส่งเชื่อมต่อเป็นส่วนประกอบด้วย ที่ผ่านมามีการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวกับวงจรกรองความถี่แถบผ่านแบบวงแหวนทั้งแบบวงแหวนปิดและแบบวงแหวนเปิดรูปแบบแบบต่างๆ มาก เพราะวงจรเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนมีข้อดีหลายๆ ด้านเช่น ปัจจัยเรื่องขนาดและความยืดหยุ่นในการสังเคราะห์วงจร การทำงานของวงจรอาจจะอาศัยการกลับปลั๊ก หรือเชื่อมต่อพลังงานทั้งในรูปของการเชื่อมต่อสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ดังนั้น จึงทำให้มีการค้นคว้าและวิจัย เกี่ยวกับวงจรเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนกันอย่างมากมายทั้งคณะผู้วิจัยในประเทศและต่างประเทศ [4], [5] โดยส่วนมากงานวิจัยเหล่านี้จะมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงคุณภาพในการทำงานของวงจรด้วยการเชื่อมต่อสายส่งสลับแบบต่างๆ ทั้งภายในและภายนอกวงแหวนหรือแม้กระทั่งสายป้อนสัญญาณ (feed line) เพื่อให้วงจรที่ออกแบบมีช่วงความถี่แถบหยุดที่กว้าง โดยเฉพาะช่วงความถี่แถบหยุดด้านบน (upper stop band) ทำให้บางครั้งผู้ออกแบบวงจรอาจจะมองข้ามปัญหาที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างภายในของวงจรมันเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำสายส่งไมโครสตริปไปวางขนานในระยะใกล้ๆ กันจนทำให้มีพฤติกรรมกลายเป็นสายส่งเชื่อมต่อที่แผ่ตัวขึ้นมาจากอยู่ในวงจรเหล่านั้น ในบทความวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้นำเสนอวงจรเรโซเนเตอร์แบบขั้น (step resonator) ที่มีผลตอบสนองความถี่แบบแถบผ่านดังแสดงในรูปที่ 3 โดยวงจรดังกล่าวสร้างขึ้นมาจากสายส่งเชื่อมต่อความยาวเศษหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น มาทำการพับปลายสายส่งแล้วนำมาเชื่อมต่อในลักษณะหันหน้าเข้าหากันดังรูปที่ 1 จะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อสัญญาณและเพิ่มความชันของการตอบสนองความถี่ในช่วงความถี่ทรานซิชัน ตัวสลับโหลดที่ต่อเข้าไปจะช่วยลดผลตอบสนองความถี่ที่ความถี่ $2f_0$ และช่วยให้การปรับแต่งค่าการสูญเสียย้อนกลับของวงจรเป็นไปโดยง่ายและเพิ่มความชันของการตอบสนองความถี่ในช่วงความถี่ทรานซิชัน สลับโหลดที่ต่อเข้าไปจะช่วยลดผลตอบสนองความถี่ที่ความถี่ $2f_0$ และช่วยให้การปรับแต่งค่าการสูญเสียย้อนกลับของวงจรเป็นไปโดยง่าย โดยสลับโหลดดังกล่าวออกแบบตามเงื่อนไขที่ใช้ในการบังคับให้อัตราการแยกของสายส่งไมโครสตริปมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ความถี่ทำงาน ซึ่งเรโซเนเตอร์ที่สร้างขึ้นจะลดพฤติกรรมในการสร้างสัญญาณปลอมเทียมลงได้เป็นอย่างดี [6], [7]

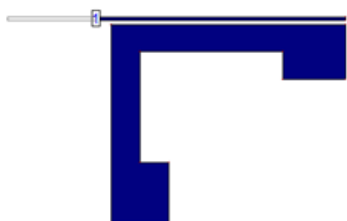
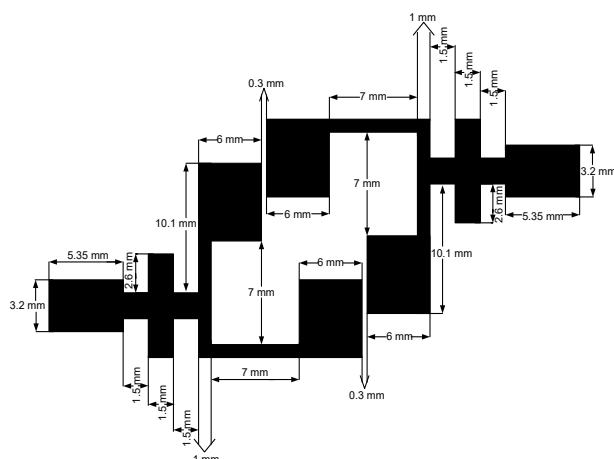
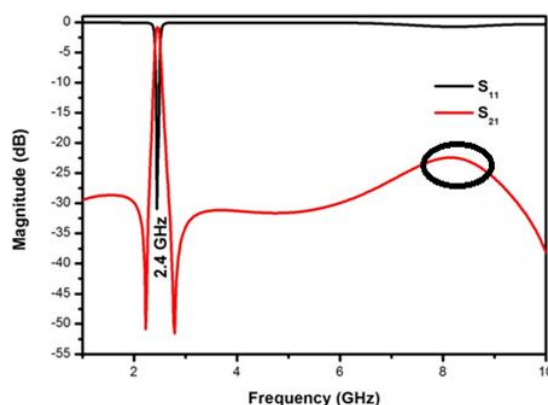


Figure 1 is a line graph showing the measured S_{11} magnitude (in dB) versus frequency (in GHz). The y-axis ranges from 0 to -14 dB, and the x-axis ranges from 2 to 10 GHz. Two resonance dips are visible: a small dip at 2.4 GHz and a large dip at 7 GHz. The legend indicates the curve is S_{11} .

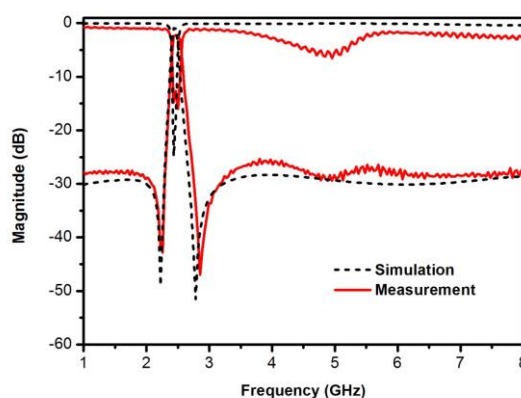
รูปที่ 3 ผลตอบสนองจากการกระตุ้นเรโซเนเตอร์ที่ทำการพับแบบ
อิมพีแดนซ์แบบขึ้น



รูปที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรโซเนเตอร์จำลอง



รูปที่ 5. ผลตอบสนองทางด้านความถี่ของเรโซเนเตอร์ที่ทำการปรับโดยการเชื่อมต่อ (Coupling) กันด้วยโปรแกรม IE3D



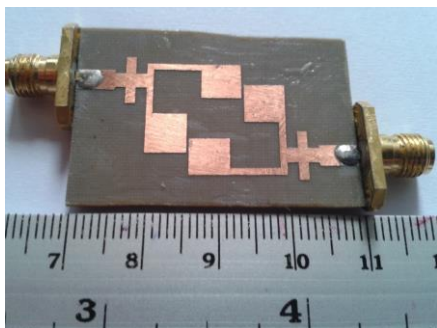
รูปที่ 6. ผลการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) และค่าการสูญเสียใส่แทรก (S_{21}) ที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงและการจำลอง

ในบทความนี้ได้ทำการออกแบบวงจรรองความถี่จากวงจรเรโซเนเตอร์ที่มีผลตอบสนองความถี่แบบผ่านแถบที่ความถี่ 2.4 GHz เฮิร์ตซ์ บนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ($\epsilon_r = 4.6, h = 1.6 \text{ mm}$, $\tan\delta = 0.02$) โครงสร้างของวงจรรองความถี่แบบธรรมดาและแบบสายส่งที่ตัดไบโพลาร์ที่พอร์ตจะแสดงดังรูปที่ 1 ก) และ 1 ข) ตามลำดับ

ในบทความวิจัยนี้วงจรต้นแบบทั้งสองวงจรสังเคราะห์ขึ้นมาจากสายส่งเชื่อมต่อแบบพัวปลายสายส่งต้นแบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อแรงดัน (voltage coupling factor : k) 3.2 เดซิเบล โดยสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานที่มีค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อจะมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของคลื่นโหมคคู่และคลื่น $Z_{0c} = 69.37$ และ $Z_{0o} = 36.03$ โอห์ม โดยแผ่นพิมพ์วงจรแบบ FR4 จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สำหรับคลื่นโหมคคู่และโหมคเดี่ยวกับ $\epsilon_{effe} = 3.642$, $\epsilon_{effo} = 2.809$ จากค่าตัวแปรทางไฟฟ้าเหล่านี้นำไปหาค่าความยาวสตับโหมคที่เข้าต่อพอร์ตเรโซเนเตอร์ได้ให้ได้ค่าที่เหมาะสมในการต่อสตับที่พอร์ตอินพุต และเอาต์พุต

เนื่องจากเมื่อเชื่อมต่อสตับโหมคเข้าไปจำเป็นต้องลดความยาวเชิงมุมของสายส่งเชื่อมต่อเพื่อให้ลดลงจากเดิมมีค่า $q = 0.5p$ เรเดียเนตเพื่อปรับจน

ให้งจรทำงานที่ความถี่ f_0 ในบทความนี้ต้องปรับลดความยาวเชิงมุมของสายส่งเชื่อมต่อที่ปลายสายให้เหลือประมาณ $q = 0.47p$ เรเดียน ตัวแปรของสายส่งเชื่อมต่อปลายสายทั้งแบบธรรมดาและแบบเชื่อมต่อสลับโหนดเข้าปลายสายในได้ทำการนำเสนอไว้ในรูปที่ 4 ส่วนผลของการจำลองการทำงานของวงจรแบบธรรมดาและแบบที่นำเสนอจะแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งวงจรที่นำเสนอมีค่าการสูญเสียแทรกสอด S_{21} และค่าการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ประมาณ 1.2 และน้อยกว่า 29 เดซิเบล ในขณะที่ความสามารถในการกีดผลตอบสนองของความถี่ปลอมเทียบกับความถี่ f_0 หรือที่ความถี่ 4.8 กิกะเฮิรตซ์ มีค่ามากกว่า 30 เดซิเบล การวัดผลการทดลองของวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้นงานชิ้นมาทดสอบในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า (E5062 Vector Network Analyzer) ที่ทำการปรับเทียบตั้งแต่ 0.1 ถึง 8.0 กิกะเฮิรตซ์ ในการวัดผลการทดลอง โดยใช้โปรแกรม Sonnet Lite™ ในการ ออกแบบวงจรและจำลองผลการทำงานของวงจร ส่วนการวิเคราะห์และแสดงผลการทำงานของวงจรใช้โปรแกรม Matlab (Student Edition) ในการแสดง ผลการวัดการทำงานของวงจรทั้งสองแสดงไว้ในรูปที่ 6 โดยวงจรที่นำเสนอมีค่าการสูญเสียแทรกสอดและค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่ f_0 เท่ากับ -2.2 และ -18 เดซิเบล ตามลำดับ ในขณะที่ความสามารถในการกีดผลตอบสนองความถี่ปลอม เทียบที่ความถี่ 4.8 กิกะเฮิรตซ์มีค่าประมาณ -28 เดซิเบลใกล้เคียงกับการจำลองการทำงาน อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตจากผลการวัดการทำงานของวงจรพบว่า เกิดผลกระทบของการเชื่อมต่อภายในวงจรซึ่งอาจจะเกิดจากหลายสาเหตุของวงจรที่ยังไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการยกตัวของผลตอบสนองความถี่ในช่วง 3.2 ถึง 4.6 กิกะเฮิรตซ์ขึ้นมา ซึ่งในอนาคตถ้าใช้ความระมัดระวังและออกแบบรายละเอียดของวงจรที่มีความเหมาะสมมากกว่านี้ผลการวัดผลการทดลองก็น่าจะสอดคล้องกับผลการจำลองการทำงาน วงจรพิมพ์ที่ใช้ในการทดลองทั้งแบบธรรมดาและแบบเชื่อมต่อ สลับโหนดเข้าที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7



รูปที่ 7. ชิ้นงานจริงการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ 2.4 GHz บนโครงสร้างไมโครสตริปด้วยเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขึ้น

4. สรุป

วงจรกรองความถี่แถบผ่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากวงจรเรโซเนเตอร์สายส่งเชื่อมต่อแบบปลายสายในรูปแบบไมโครสตริป ด้วยความยาวเศษหนึ่งส่วนที่นำเสนอ มีความสามารถในการเพิ่มความชันของผลตอบสนองความถี่ทรานซิชันและการกีดผลตอบสนองความถี่ที่ความถี่ $2f_0$ ได้มากกว่า -28 เดซิเบล นอกจากนี้การต่อเพิ่มสลับโหนดเข้าไปในวงจรแล้วนั้น ยังจะช่วยปรับปรุงลักษณะของผลตอบสนองความถี่ที่กล่าวถึง และยังช่วยให้การปรับแต่งค่าการสูญเสียย้อนกลับของวงจรได้เป็นอย่างดีอีกด้วย วงจรที่นำเสนอสามารถออกแบบสร้างได้อย่างง่าย

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยและการนำเสนอบทความในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] รองศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน “การออกแบบวงจรไมโครเวฟ,” สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ, พ.ศ. 2550
- [2] อภิรักษ์ ทาสวรรณ์และคณะ “วงจรกรองผ่านแถบกว้างบนโครงสร้างไมโครสตริปด้วยเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขึ้น” วิทยานิพนธ์ครุศาสตรอุตสาหกรรมบัณฑิตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร, พ.ศ.
- [3] นที เทนอิสระ “บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนวิชาวิศวกรรมสายอากาศ,” วิทยานิพนธ์ครุศาสตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร, พ.ศ. 2554
- [4] IE3D Users' Manual. Release8. Zeland Software Inc. Fremont CA. 2001.
- [5] S.-F. Chang, Y.-H. Jeng and J.-L. Chen, “Dual-band step-impedance band pass filter,” September. 2006.
- [6] Jia-Shen Hong and M.J Lancaster “Microstrip Filter for RF/Microwave Applications,” New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [7] Tsung-Nan Kuo, Shih-Cheng Lin, Chi-Hsueh Wang and Chun “Hsiung, New Coupling Scheme for Microstrip Band pass Filters With Quarter-Wavelength Resonators,” IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques, vol. 56, no. 12, December. 2008 (pp. 661-664).