



## วงจรรองความถี่แถบผ่านย่านไมโครเวฟเพื่อการสื่อสารไร้สายสมัยใหม่ Microwave Bandpass Filters for Modern Wireless Communications

สมบุญ ธีรวิสิฐพงศ์<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึง วงจรรองความถี่แถบผ่านย่านไมโครเวฟบนโครงสร้างระนาบเพื่อการสื่อสารไร้สายสมัยใหม่ จากการศึกษาพบว่า รูปแบบของเรโซเนเตอร์สามารถจำแนกออกได้เป็น 5 รูปแบบหลัก คือ เรโซเนเตอร์เส้นตรง เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ขั้น เรโซเนเตอร์อินเตอร์ดิจิทัล เรโซเนเตอร์รูปปิ่นปักผม และเรโซเนเตอร์วงแหวน โดยลักษณะทางกายภาพของเรโซเนเตอร์เหล่านั้นก็ได้ถูกแสดงไว้อย่างชัดเจนด้วยแล้ว นอกจากนี้ ยังได้มีนำเสนอวงจรรองที่น่าสนใจมาแสดงในบทความนี้ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ประสิทธิภาพของวงจรรองที่ได้รับการปรับปรุง คือ ความกะทัดรัด แถบความถี่ผ่านที่ชัน และการกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่ดียิ่งขึ้น

**คำสำคัญ :** วงจรรองความถี่แถบผ่าน, ไมโครสตริป, ย่านไมโครเวฟ, การสื่อสารไร้สายสมัยใหม่

### Abstract

This article describes planar microwave bandpass filters for modern wireless communications. In our study, resonator pattern can be classified into five major patterns as follows: straight-line resonator, stepped - impedance resonator, interdigital resonator, hairpin resonator, and ring resonator. Also, schematic of those patterns has been obviously shown. In addition, interesting filters have been presented in this paper that in particular shows enhanced filter performance including compactness, sharp skirt passband and excellent harmonic suppression.

**Keywords :** Bandpass Filter, Microstrip, Microwave Band, Modern Wireless Communications

---

<sup>1</sup>ดร.สมบุญ ธีรวิสิฐพงศ์. อาจารย์ประจำภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี, email: somboon@mutt.ac.th

## บทนำ

วงจรกรองความถี่แถบผ่านเป็นวงจรหนึ่งที่มีความสำคัญและถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสารต่าง ๆ อาทิ โครงข่ายเซลลูลาร์ โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย และระบบการสื่อสารดาวเทียม เป็นต้น ในทางปฏิบัตินั้น วงจรกรองจะถูกติดตั้งที่ภาคส่วนหน้า - ปลาย (Front - end Stage) ของภาครับและภาคส่ง ซึ่งภาระหน้าที่ของวงจรกรองนี้ มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบ เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกที่รับเข้ามายังภาครับผ่านทางสายอากาศ ในขณะที่เดียวกัน ก็ป้องกันสัญญาณรบกวนของระบบเองที่จะถูกส่งออกไปจากภาคส่งผ่านทางสายอากาศ ด้วยเช่นกัน ซึ่งสัญญาณรบกวนนี้ จะส่งผลกระทบต่อสัญญาณข่าวสาร (Information) ทำให้ข่าวสารที่ได้รับเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นได้ การพัฒนางจรกรองความถี่แถบผ่านบนโครงสร้างระนาบนั้น สามารถพัฒนาได้จากเรโซเนเตอร์ที่มีรูปร่าง (Pattern) ที่หลากหลาย โดยรูปร่างพื้นฐานของเรโซเนเตอร์ที่พบเห็นในหลาย ๆ งานวิจัย มักมีพื้นฐานการปรับปรุงมาจากรูปร่างหลัก 5 รูปแบบด้วยกัน คือ เรโซเนเตอร์เส้นตรง (Straight - line Resonator) เรโซเนเตอร์แบบอิมพีแดนซ์ขั้น (Stepped - impedance Resonator) เรโซเนเตอร์แบบอินเตอร์ดิจิทัล (Interdigital Resonator) เรโซเนเตอร์รูปปิ่นปักผม (Hairpin Resonator) และเรโซเนเตอร์วงแหวน (Ring Resonator) โดยรายละเอียดด้านคุณลักษณะทางกายภาพและจุดเด่นของเรโซเนเตอร์แต่ละแบบนี้ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป โดยตัวอย่างของวงจรกรองความถี่รูปแบบอย่างง่าย ในบรรจุกฎเกณฑ์ แสดงดังภาพที่ 1 (ในกรอบเส้นประที่ลูกศรชี้)

อย่างไรก็ดี คุณสมบัติพึงประสงค์ของวงจรกรองความถี่แถบผ่านที่ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงไป ไม่ว่าจะเป็นยุคใดก็ตาม นั่นคือ ผลตอบสนองของแถบความถี่ผ่านที่มีความชัน และการกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่สองที่ต้องมากกว่าสองเท่าของความถี่หลัก ( $>2f_0$ ) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการออกแบบวงจรกรอง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การออกแบบและพัฒนางจรกรองที่ดี จึงต้องคำนึงถึงคุณสมบัติสองข้อที่กล่าวมาด้วยเป็นสำคัญ

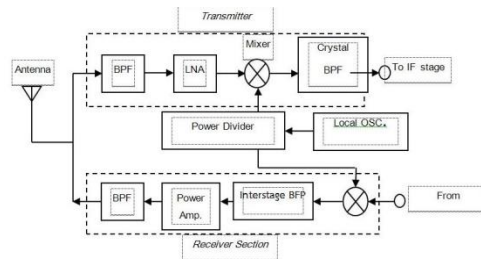


ภาพที่ 1 ตัวอย่างวงจรกรองความถี่แถบผ่านบนโครงสร้างระนาบ (ตามลูกศรชี้)  
ที่อยู่ในอุปกรณ์แปลงความถี่ลงชนิดสัญญาณรบกวนต่ำ  
(LNB, Low noise block down-converter)

ที่มา : [http://www.ask.com/wiki/Distributed\\_element\\_filter](http://www.ask.com/wiki/Distributed_element_filter)

## ความสำคัญของวงจรรองในระบบสื่อสาร

วงจรรองความถี่แถบผ่านมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย โดยมีหน้าที่ในการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการซึ่งรับเข้ามาผ่านทางสายอากาศ ดังนั้น วงจรรองที่ดีจึงต้องสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนเหล่านี้ออกไปให้ได้ทั้งหมด โดยเฉพาะสัญญาณรบกวนที่มีความถี่ตรงกับความถี่หลักและฮาร์โมนิกส์ที่สองของสัญญาณข่าวสาร จำเป็นต้องถูกกำจัดออกไปให้หมดสิ้น ซึ่งในทางปฏิบัติวงจรรองอาจมีความจำเป็นต้องใช้มากกว่าหนึ่งวงจร ดังแสดงในภาพที่ 2 แสดงวงจรรวมภาคอาร์เอฟของระบบสื่อสารไร้สายทั่วไป



ภาพที่ 2 บล็อกไดอะแกรมภาคอาร์เอฟของวงจรรวม - ส่วนของระบบสื่อสารไร้สายทั่วไป

วงจรในภาพที่ 2 แสดงให้เห็นว่าวงจรรองความถี่แถบผ่านได้ถูกนำมาใช้ในหลายภาคด้วยกัน ทั้งในส่วนของการส่ง (Transmitter Section) และรับสัญญาณ (Receiver Section) โดยในกรณีส่งสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการจะถูกกำจัดออกไปก่อนที่จะมีการส่งออกอากาศ และในกรณีรับสัญญาณรบกวนก็จะถูกกำจัดก่อนที่จะรับเข้ามาภายในภาครับด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปแล้ว วงจรรองความถี่แถบผ่านในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ใช้ในระบบสื่อสารสามารถสร้างได้จากหลากหลายโครงสร้างด้วยกัน ได้แก่ โคแอสเซียล เวฟไกด์ และระนาบ เป็นต้น ในปัจจุบันวงจรรองบนโครงสร้างระนาบได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ คือ ราคาถูก ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ง่ายต่อการผลิต และโครงสร้างที่เอื้อต่อการต่อร่วมกับอุปกรณ์ประเภท SMDs (Surface Mount Devices) ในขณะที่วงจรรองบนโครงสร้างสายโคแอสเซียล จะมีความยุ่งยากในการติดตั้งใช้งานร่วมกับแผงวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) และวงจรรองบนโครงสร้างท่อนำคลื่น (Waveguide) ก็มีข้อด้อยในด้านน้ำหนักและขนาดที่ใหญ่เกินไป

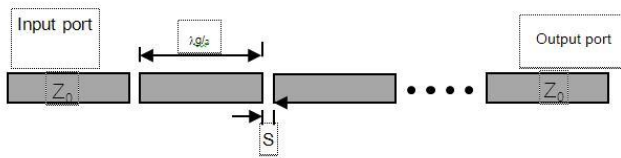
## รูปแบบพื้นฐานของเรโซเนเตอร์และวงจรรองความถี่แถบผ่านบนโครงสร้างระนาบ

นับแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีการพัฒนารูปแบบของเรโซเนเตอร์ออกมามากมาย อีกทั้งยังได้มีการพัฒนาแนวทางการออกแบบใหม่ ๆ ออกมาอีกด้วย ซึ่งทฤษฎีต่าง ๆ ที่ถูกนำเสนอมานั้น มีประโยชน์อย่างมากต่อนักวิจัยในรุ่นหลัง และยังคงมีการใช้งานกันอยู่ในทุกวันนี้ แม้ว่าปัจจุบันจะมีรูปแบบของเรโซเนเตอร์และวงจรรองที่ได้รับการพัฒนาออกมามากมายก็ตาม แต่เมื่อศึกษา

วิเคราะห์แล้ว พบว่า วงจรกรองเหล่านี้มีลักษณะรูปร่างที่อยู่บนพื้นฐาน 5 รูปแบบหลัก ดังนี้ เรโซเนเตอร์เส้นตรง (Straight - line Resonator) เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ขั้น (Stepped - Impedance Resonator) เรโซเนเตอร์อินเตอร์ดิจิทัล (Interdigital Resonator) เรโซเนเตอร์รูปปีกผม (Hairpin Resonator) เรโซเนเตอร์วงแหวน (Ring Resonator)

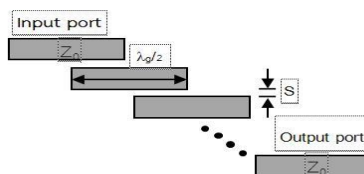
### เรโซเนเตอร์เส้นตรง (Straight - line Resonator)

เรโซเนเตอร์ชนิดนี้เป็นแบบแรกที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดย Bradley ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2497 โดยมีรูปแบบ แสดงดังภาพที่ 3 โดยเรโซเนเตอร์แต่ละตัวมีความยาวของเรโซเนเตอร์เท่ากับครึ่งคลื่น ( $\lambda_g/2$ ) ถูกนำมาต่อเรียงกัน โดยมีระยะห่างเป็น  $S$  โดยที่อิมพีแดนซ์ของพอร์ตอินพุตและเอาต์พุต ( $Z_0$ ) เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งแบนด์วิดธ์ของแถบความถี่ผ่าน (Passband) สามารถกำหนดได้จากระยะห่าง  $S$  นี้



ภาพที่ 3 รูปแบบของเรโซเนเตอร์เส้นตรงแบบคัปเปิลหลาย

สองปีถัดมาในปี พ.ศ. 2599 Cohn ได้ปรับปรุงรูปแบบการคัปเปิลของคลื่น เพื่อลดความยาวของวงจรกรองในภาพที่ 3 เป็นลักษณะการคัปเปิลแบบขนาน แสดงดังภาพที่ 4 โดยตั้งชื่อว่า “วงจรกรองเรโซเนเตอร์สายนำสัญญาณแบบคัปเปิลขนาน” โดยระยะเหลื่อมของเรโซเนเตอร์ที่ขนานกันเป็นสัดส่วนเท่ากับ  $1/4$  เท่าของคลื่น ( $\lambda_g/4$ ) สำหรับข้อดีของวงจรกรองแบบนี้ก็คือ ความยาวที่ลดลง ผลตอบสนองของแถบความถี่ผ่านที่สมมาตร และระยะห่างระหว่างเรโซเนเตอร์ที่กว้างกว่าทำให้ง่ายต่อการผลิต

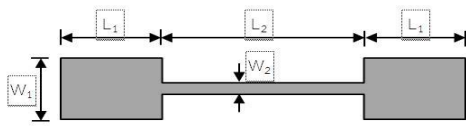


ภาพที่ 4 รูปแบบของเรโซเนเตอร์เส้นตรงแบบคัปเปิลขนาน

### เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ขั้น (Stepped - Impedance Resonator)

เรโซเนเตอร์ชนิดนี้ถูกพัฒนาและนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Riblet ในปี พ.ศ. 2503 ด้วยข้อดีของเรโซเนเตอร์ชนิดนี้ที่มีขนาดเล็กและมีคุณสมบัติของการกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่สองในตัวเอง จึงทำให้นักวิจัยชั้นนำหลายคนนำมาพัฒนางานต่อยอดเป็นจำนวนมาก โดยสามารถแบ่งประเภท

ของเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ชั้นได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ อิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Type) และอิมพีแดนซ์ต่ำ (Low Impedance Type) โดยพิจารณาจากอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณที่อยู่กึ่งกลาง หากมีความกว้างของสายนำสัญญาณแคบ ดังภาพที่ 5 (ก) นั่นคือ มีอิมพีแดนซ์สูง และในทางกลับกัน หากความกว้างมาก ดังภาพที่ 5 (ข) ก็คือ อิมพีแดนซ์ต่ำ เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ชั้นประเภทอิมพีแดนซ์สูง ดังภาพที่ 5 (ก) มีความยาวของส่วนอิมพีแดนซ์ต่ำ ( $W_1$ ) เป็น  $L_1$  และความยาวของส่วนอิมพีแดนซ์สูง ( $W_2$ ) เป็น  $L_2$  โดยความยาว  $L_2$  จะมากกว่า  $L_1$  ในขณะที่เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ชั้นประเภทอิมพีแดนซ์ต่ำ ดังภาพที่ 5 (ข) มีความยาวของส่วนอิมพีแดนซ์สูง ( $W_1$ ) เป็น  $L_1$  และความยาวของส่วนอิมพีแดนซ์ต่ำ ( $W_2$ ) เป็น  $L_2$  โดยความยาว  $L_2$  จะมากกว่า  $L_1$  ซึ่งการออกแบบขนาดความกว้างหรืออิมพีแดนซ์กับความยาวของทั้งสองส่วนจะต้องมีความสัมพันธ์กัน โดยอัตราส่วนความสัมพันธ์  $L_2/L_1$  และ  $W_1/W_2$  นี้ สามารถใช้ในการออกแบบตำแหน่งของความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่สองที่ต้องการได้ นอกจากนี้ เรโซเนเตอร์ชนิดนี้ยังได้ถูกนำไปพัฒนางจรกรงที่ใช้เรโซเนเตอร์ที่มีความยาวเต็มคลื่น ( $\lambda_g$ ) ครึ่งคลื่น ( $\lambda_g/2$ ) และหนึ่งส่วนสี่คลื่น ( $\lambda_g/4$ ) ได้อีกด้วย



(ก) ประเภทอิมพีแดนซ์สูง

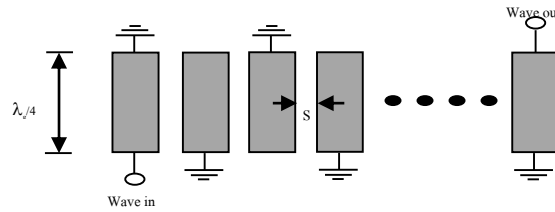


(ข) ประเภทอิมพีแดนซ์ต่ำ

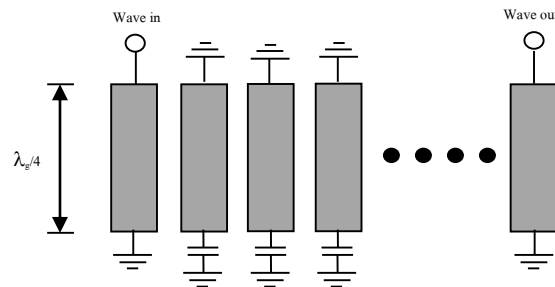
ภาพที่ 5 รูปแบบของเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ชั้น

### เรโซเนเตอร์อินเตอร์ดิจิตอล (Interdigital Resonator)

เรโซเนเตอร์ชนิดนี้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกในราวปี พ.ศ. 2505 และถูกนำมาพัฒนาเป็นวงจกรองความถี่รูปหวีในหนึ่งปีให้หลังจากนั้น ในปี พ.ศ. 2508 Wenzel ได้นำเสนอวงจรมูลของวงจกรองความถี่รูปหวีขึ้น ซึ่งช่วยให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ในขั้นตอนการออกแบบ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวงจกรองความถี่แถบผ่านย่านกว้างในอีกหกปีถัดมาด้วย สำหรับลักษณะของวงจกรองที่ใช้เรโซเนเตอร์อินเตอร์ดิจิตอล แสดงดังภาพที่ 6 และวงจกรองรูปหวี (Comb Resonator) แสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า เรโซเนเตอร์ที่ใช้มีความยาวเป็นหนึ่งส่วนสี่คลื่น ( $\lambda_g/4$ ) ทั้งหมด



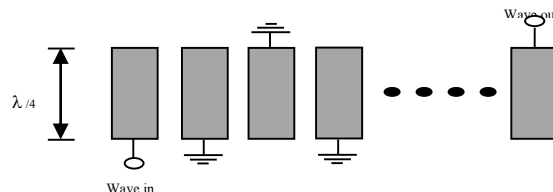
(ก) ประเภทวงจรปิด (Short-circuited transformer couple)



(ข) ประเภทวงจรเปิด (Open-circuited transformer couple)

ภาพที่ 6 รูปแบบของเรโซเนเตอร์อินเตอร์ดิจิตอล

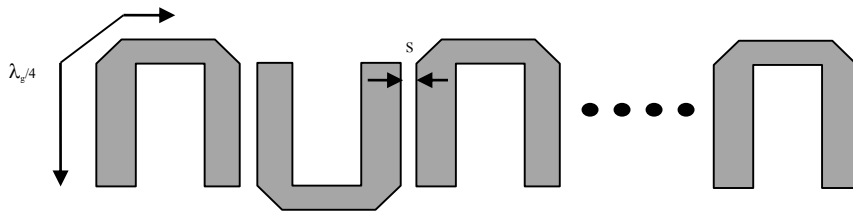
วงจรรองอินเตอร์ดิจิตอลเป็นการพัฒนามาจากวงจรรองด้วยเรโซเนเตอร์เส้นตรงแบบคัปเปิลขนาน โดยนำส่วนของการคัปเปิลแบบหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น ( $\lambda_g/4$ ) มาพัฒนา จากภาพที่ 6 ระยะห่างของเรโซเนเตอร์ถูกกำหนดด้วยตัวแปร S และแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ แบบวงจรปิด (Short - circuited) และวงจรเปิด (Open - circuited) ดังภาพที่ 6 (ก) และ (ข) ซึ่งจะมีความแตกต่างกันที่ส่วนแปลง (Transformer) ที่คัปเปิลกับเรโซเนเตอร์ที่เป็นแบบวงจรปิดและวงจรเปิดนั่นเอง สำหรับเรโซเนเตอร์รูปหวี ในภาพที่ 7 จะมีรูปแบบที่คล้ายกับเรโซเนเตอร์อินเตอร์ดิจิตอลแบบวงจรปิด โดยที่ปลายของเรโซเนเตอร์ทั้งสองด้านจะถูกต่อลงกราวด์ และมีปลายด้านหนึ่งที่ต่อกับตัวเก็บประจุก่อนลงกราวด์เพิ่มขึ้นมา



ภาพที่ 7 รูปแบบของเรโซเนเตอร์รูปหวี

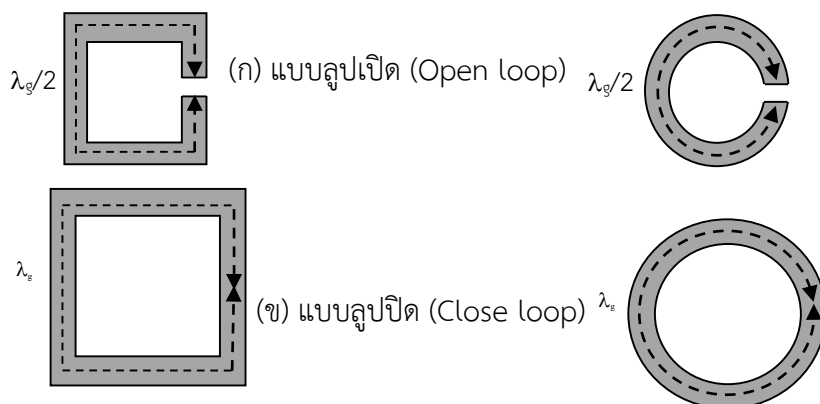
### เรโซเนเตอร์รูปปิ่นปักผม (Hairpin Resonator)

เรโซเนเตอร์ชนิดนี้พัฒนามาจากเรโซเนเตอร์เส้นตรงแบบคัปเปิ้ลขนาน โดยการพับความยาวของเรโซเนเตอร์เส้นตรงเป็นรูปปิ่นปักผม โดยมีความยาวรวมยังคงเท่าเดิม คือ ครึ่งความยาวคลื่น ( $\lambda_g/2$ ) ทำให้ขนาดของเรโซเนเตอร์และวงจรรองลดลง เรโซเนเตอร์ชนิดนี้ถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2515 โดย Cristal และ Frankel และต่อมาได้มีการนำไปพัฒนาต่อยอดอีกมากมายสำหรับรูปแบบของเรโซเนเตอร์ชนิดนี้ แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 รูปแบบของเรโซเนเตอร์รูปปิ่นปักผม

จากภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่า ความยาวของเรโซเนเตอร์เป็นความยาวครึ่งคลื่น โดยที่แบ่งพับเรโซเนเตอร์ครึ่งหนึ่งเป็นหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น ( $\lambda_g/4$ ) และมีระยะห่างระหว่างเรโซเนเตอร์เป็น  $S$  ซึ่งระยะห่างนี้กับตำแหน่งของการใส่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุต จะเป็นตัวแปรในการกำหนดแบนด์วิดท์ของวงจรรองนี้ อย่างไรก็ตาม การพับเรโซเนเตอร์ในลักษณะเช่นรูปแบบนี้ อาจทำให้เกิดคลื่นที่เหนี่ยวนำหรือคัปเปิ้ลเกิดขึ้นระหว่างแขนของเรโซเนเตอร์เองได้ ซึ่งมีผลต่อการกำหนดแบนด์วิดท์ของวงจรรองด้วย ดังนั้นการออกแบบแบนด์วิดท์ที่ต้องการอาจต้องพิจารณาระยะห่างของแขนเรโซเนเตอร์ด้วยเรโซเนเตอร์วงแหวน (Ring Resonator)



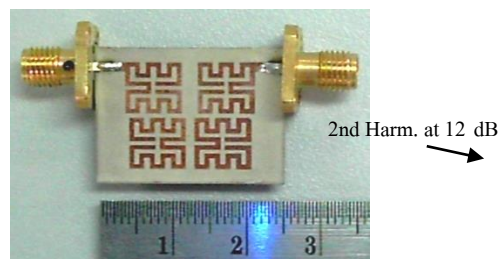
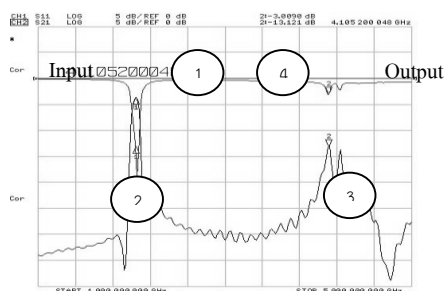
ภาพที่ 9 เรโซเนเตอร์วงแหวนแบบลูปเปิดและลูปปิด

### เรโซเนเตอร์วงแหวน (Ring Resonator)

เรโซเนเตอร์รูปแบบสุดท้ายนี้ มีรูปแบบย่อย 2 รูปแบบ คือ แบบลูปเปิด (Open Loop) และแบบลูปปิด (Close Loop) แสดงดังภาพที่ 9 ที่ประกอบด้วยเรโซเนเตอร์รูปสี่เหลี่ยม และวงกลม แบบลูปเปิดและลูปปิด โดยความยาวของเรโซเนเตอร์แบบลูปเปิดเป็นครึ่งความยาวคลื่น ( $\lambda_g/2$ ) และความยาวของเรโซเนเตอร์แบบลูปปิดเป็นหนึ่งความยาวคลื่น ( $\lambda_g$ ) เรโซเนเตอร์ชนิดนี้ได้ถูกพัฒนาต่อยอดออกเป็นหลากหลายรูปแบบด้วยกัน โดยทั่วไปแล้ว เรโซเนเตอร์แบบลูปปิดจะใช้ในการพัฒนางจรกรองแถบผ่านกว้าง (Wide Bandpass Filter) และเรโซเนเตอร์แบบลูปเปิดจะใช้ในการพัฒนางจรกรองแถบผ่านแคบ (Narrow Bandpass Filter) และวงจรถูกกรองผ่านหลายแถบ (Multi - Bandpass Filter)

### ตัวอย่างงานวิจัยที่นำเสนอ

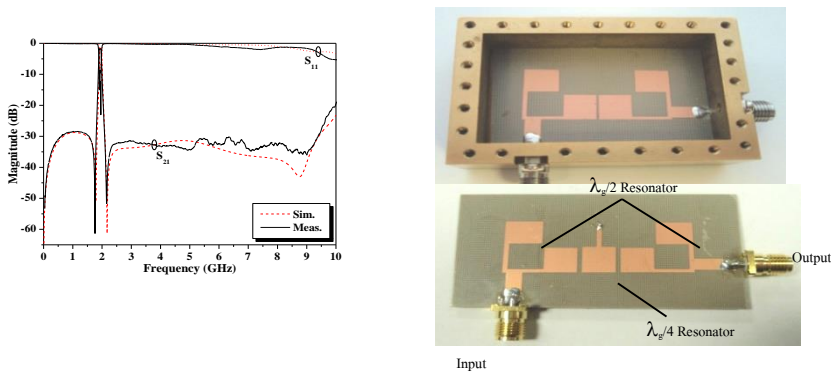
สำหรับงานวิจัยที่ยกมาในที่นี้ จะเน้นไปที่วงจรถูกกรองที่มีคุณสมบัติขนาดเล็กและสามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่สองได้ดีโดยตัวอย่างแรก แสดงดังภาพที่ 10 เป็นวงจรถูกกรองแถบผ่านที่ใช้เรโซเนเตอร์แบบลูปเปิดที่มีการปรับปรุงด้วยการพับไปมาต่อร่วมกันลักษณะไขว้ (Cross Couple) 4 ตัว โดยสัญญาณด้านเข้าที่เรโซเนเตอร์ตัวที่ 1 และสัญญาณด้านออกที่เรโซเนเตอร์ตัวที่ 4 วงจรถูกกรองนี้ได้รับการออกแบบให้ใช้กับระบบการสื่อสารไร้สายยุคที่สาม (3G) ที่ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ และมีแบนด์วิดท์ 60 เมกะเฮิรตซ์ จากผลการปรับปรุงด้วยวิธีการพับไปมานี้ ทำให่วงจรถูกกรองนี้มีข้อดีในด้านขนาดที่เล็ก กะทัดรัด นอกจากนี้ ระดับของฮาร์โมนิกส์ที่สองยังลดต่ำลงถึง 12 เดซิเบลด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นภายในเรโซเนเตอร์จากการพับไปมาหลายครั้ง อย่างไรก็ตามการกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่สองในวงจรถูกกรองนี้ ถือว่ายังไม่เพียงพอต่อความต้องการสำหรับการประยุกต์ใช้งานในเชิงพาณิชย์



ภาพที่ 10 วงจรถูกกรองแถบผ่านที่ใช้เรโซเนเตอร์พับแบบปรับสี่ตัวต่อไขว้ และผลตอบสนองทางความถี่



ตัวอย่างงานวิจัยที่สอง แสดงดังภาพที่ 11 เป็นวงจรกรองแถบผ่านที่ใช้เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ชั้นพ้อย่างง่ายต่อกัน 2 ตัว โดยมีสัญญาณด้านเข้าและออกแสดงดังรูป สำหรับผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร แสดงดังภาพที่ 11 (ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่า มีผลตอบสนองที่ดีเยี่ยม กล่าวคือ ย่านความถี่แถบผ่านมีความชัน โดยมีระดับการลดทอนที่ขอบสัญญาณ (Passband Edges) ที่มากกว่า 40 เดซิเบล อีกทั้งสัญญาณฮาร์โมนิกที่สอง ยังถูกกำจัดออกไปได้ไกลกว่า 9 กิกะเฮิรตซ์ ที่ระดับการลดทอนของการกำจัดที่มากกว่า 30 เดซิเบล



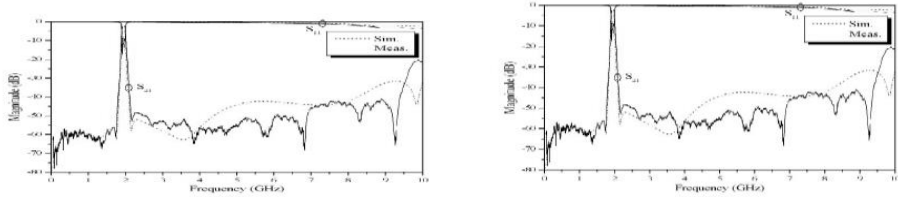
(ก)

(ข)

ภาพที่ 11 วงจรกรองความถี่แถบผ่านที่ใช้เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ชั้นพ้อย่างง่าย และผลตอบสนองทางความถี่

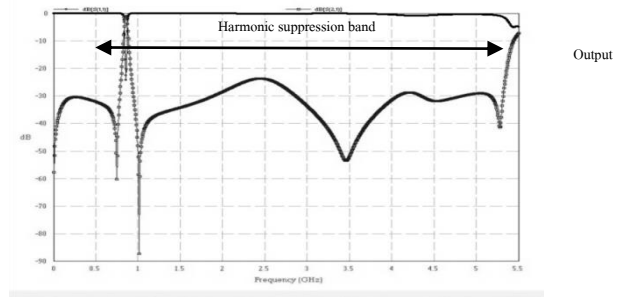
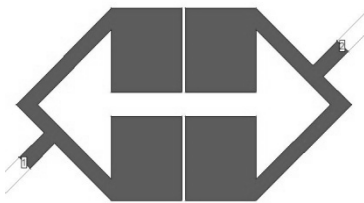
จุดเด่นของวงจรกรองในงานวิจัยนี้ คือ มีขนาดเล็ก เนื่องจากใช้เรโซเนเตอร์เพียงสองตัว มีรูปแบบของเรโซเนเตอร์อย่างง่าย ทำให้ง่ายต่อการผลิตและมีผลตอบสนองที่ดี ทั้งในย่านความถี่แถบผ่านและย่านที่ถูกกำจัดฮาร์โมนิกส์ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติเหล่านี้แล้ว ประเมินได้ว่า มีประสิทธิภาพสูงเพียงพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ได้เป็นอย่างดี จากงานวิจัยที่ยกมาสองงานข้างต้น เป็นวงจรกรองที่ใช้เรโซเนเตอร์ที่มีความยาวครึ่งคลื่น ( $\lambda_g/2$ ) เพียงอย่างเดียว แต่ในงานวิจัยที่หยิบยกมาในงานที่สามนี้ เป็นการผสมผสานการประยุกต์ใช้เรโซเนเตอร์ที่มีความยาวครึ่งคลื่นและความยาวหนึ่งส่วนสี่คลื่น ( $\lambda_g/4$ ) ร่วมกัน แสดงดังภาพที่ 12 โดยเป็นการใช้เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ชั้นแบบครึ่งคลื่นและหนึ่งส่วนสี่คลื่นต่อร่วมกัน ซึ่งให้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับการใช้เรโซเนเตอร์ครึ่งคลื่นล้วนสามตัว แต่วงจรนี้มีข้อดีกว่าในแง่ความกะทัดรัด และเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรกรอง ในภาพที่ 11 ที่ใช้เรโซเนเตอร์ครึ่งคลื่นสองตัว พบว่า ย่านแถบความถี่ผ่านมีความชันมากขึ้น โดยมีค่าการลดทอนที่ขอบสัญญาณที่มากกว่า 50 เดซิเบล ทั้งยังมีระดับการกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่มากกว่า 45 เดซิเบล ถึงความถี่ 9 กิกะเฮิรตซ์ โดยประมาณ ดังนั้น ประสิทธิภาพของวงจรกรองในงานนี้ ย่อมสูงกว่าวงจรกรองในภาพที่ 11 อย่างไม่รู้ก็ตาม ประสิทธิภาพที่สูงเช่นนี้ อาจเกินความจำเป็น

ในบางลักษณะงาน ขณะที่ในบางกรณี ก็อาจต้องการประสิทธิภาพของวงจรกรองที่สูงเช่นนี้ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้ให้เหมาะสมและความต้องการของผู้ใช้งาน



ภาพที่ 12 วงจรกรองความถี่แถบผ่านที่ใช้เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ชั้นแบบครึ่งคลื่น แบบหนึ่งส่วนสี่คลื่น และผลตอบสนองทางความถี่

ตัวอย่างงานวิจัยที่ยกมาข้างต้น โดยเฉพาะงานวิจัยที่สองและสามนั้น หากศึกษาโดยละเอียด จะพบว่า เทคนิควิธีการกำจัดฮาร์โมนิกสปีนเบื้องต้น สามารถทำได้โดยการใช้เทคโนโลยีเรโซเนเตอร์ อิมพีแดนซ์ชั้นได้ โดยการกำหนดสัดส่วนของขนาดและความยาวให้เหมาะสม ซึ่งสามารถใช้ในการ ออกแบบตำแหน่งความถี่ฮาร์โมนิกที่สองที่ต้องการได้ นอกจากนี้ ยังสามารถใช้เทคนิคการยกเลิก เงื่อนไขของการเรโซแนนซ์ในโหมดคู่ (Destruction of Even Mode Resonance Condition) ได้ อีกด้วย



Input

ภาพที่ 13 วงจรกรองความถี่แถบผ่านที่ใช้เรโซเนเตอร์สามเหลี่ยมอินพีแดนซ์ชั้น และผลตอบสนองทางความถี่

สำหรับงานวิจัยสุดท้ายที่จะกล่าวถึงนี้ มีความแตกต่างจากงานที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด โดยเป็นการใช้เรโซเนเตอร์รูปสามเหลี่ยมร่วมกับเทคโนโลยีอิมพีแดนซ์ชั้น แสดงดังภาพที่ 13 ซึ่งเป็นวงจรที่ออกแบบที่ความถี่ 850 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อใช้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุค 3G ชั้นทดลอง (3G - Trial) ในประเทศไทย โดยเป็นการใช้เรโซเนเตอร์รูปสามเหลี่ยมสองตัวต่อร่วมกัน และเมื่อ พิจารณาผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรนี้แล้ว จะเห็นได้ว่า สามารถกำจัดฮาร์โมนิกสปีนได้ไกล



ถึง 5.4 กิกะเฮิรตซ์ โดยมีระดับของการกำจัดที่มากกว่า 20 เดซิเบล ในขณะที่ระดับการลดทอนที่ขอสัญญาณแถบผ่านมากกว่า 60 เดซิเบล ซึ่งผลตอบสนองเช่นนี้ ถือว่าอยู่ในระดับที่น่าพอใจ

### บทวิเคราะห์และบทสรุป

งานวิจัยทางด้านวงจรกรองแถบผ่านบนโครงสร้างไมโครสตริปที่กล่าวในบทความนี้ สามารถสร้างได้จากหลากหลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งทั้งหมดทั้งมวลของวงจรที่พัฒนามาจากนักวิจัยหลายท่าน ล้วนแล้วแต่มีพื้นฐานมาจาก 5 รูปแบบ คือ เรโซเนเตอร์เส้นตรง เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ชั้น เรโซเนเตอร์อินเตอร์ดิจิตอล เรโซเนเตอร์รูปปิ่นปักผม และเรโซเนเตอร์วงแหวน โดยในปัจจุบันนี้เอง ก็ได้มีการพัฒนาโดยใช้รูปแบบมากกว่าสองรูปแบบมาผสมผสานเข้าด้วยกัน สำหรับตัวอย่างงานวิจัยที่น่าเสนอนั้น เป็นงานวิจัยที่มีการใช้เทคนิคการพับและเทคนิคเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์ชั้นทำให้วงจรกรองมีขนาดเล็ก นอกจากนี้ ยังมีการใช้เทคนิคการต่อตัวป้อนที่กึ่งกลางของเรโซเนเตอร์และวงจรกรองที่ใช้เรโซเนเตอร์ร่วมกัน ระหว่างเรโซเนเตอร์ครึ่งคลื่นและหนึ่งส่วนสี่คลื่น ทำให้สามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่สองได้อย่างดีเยี่ยม โดยในที่นี้ ได้ให้ค่าระดับการลดทอนของแบนด์กำจัดฮาร์โมนิกส์ที่รับได้ ควรจะมากกว่า 20 เดซิเบล และตำแหน่งของฮาร์โมนิกส์ที่ถูกกำจัดหรือเลื่อนไปควรมากกว่า 3 เท่าของความถี่แถบผ่าน เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบสื่อสารไร้สายสมัยใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### แหล่งข้อมูลอ้างอิง

- Bradley, E. A. (1956). *“Design and Development of Strip-line Filters”*. IRE Trans. Microw. Theory Tech., 4(2), 86 - 93.
- Caspi, S. & Adelman, J. (1988). *“Design of Combline and Interdigital Filters with Tapped-line Input”*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 36(4), 759 - 764.
- Chang, C.-Y. & Itoh, T. (1991). *“A Modified Parallel-coupled Filter Structure That Improves the Upper Stopband Rejection and Response Symmetry”*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 39(2), 310 - 314.
- Chang, F.-C. & Mott, H. (1972). *“Exact Design of Stepped-impedance Transformers”*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 20(9), 620 - 621.
- Chang, K. F. & Tam, K. W. (2005). *“Miniaturized Cross-coupled Filters with Second and Third Spurious Responses Suppression”*. IEEE Microw. Theory Tech., 15(2), 122 - 124.



- Chen, C.-Y. & Hsu, C.-Y. (2006). “*A Simple and Effective Method for Microstrip Dual-band Filters Design*”. IEEE Trans. Microw. Wirel. Comp. Lett., 16(5), 246 - 248.
- Choi, J. & Seo, C. (2008). “*Microstrip Square Open-loop Multiple Split - ring Resonator for Low - phase-noise VCO*”. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 56(12), 3245 - 3253.
- Cohn, S. B. (1958). “*Parallel-coupled Transmission-line-resonator Filters*”. IRE Trans. Microw. Theory Tech., 6(2), 223 - 231.
- Cristal, E. G. (1975). “*Tapped-line Coupled Transmission Lines with Applications to Interdigital and Compline Filters*”. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 23(12), 1007 - 1012.
- Cristal, E. G. & Frankel, S. (1972). “*Hairpin-line and Hybrid Hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line Filters*”. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 20(11), 719 - 728.
- Gupta, K. C., Garg, R., Bahl, I. & Bhartia, P. (1996). *Microstrip Lines and Slotlines* (2<sup>nd</sup> ed.). Boston : Artech House.
- Gysel, U. H. (1974). “*New Theory and Design for Hairpin-line Filters*”. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 22(5), 523 - 531.
- Hong, J.-S. & Lancaster, M. J. (1997). “*Theory and Experiment of Novel Microstrip Slow - wave Open-loop Resonator Filters*”. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 45(2), 2358 - 2365.
- Horton, R. (1973). “*Equivalent Representation of an Abrupt Impedance Steps in Microstrip Lines*”. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 21(8), 562 - 564.
- Hsieh, L.-H. & Chang, K. (2002). “*Equivalent Lumped Elements G, L, C, and Unloaded Q's of Closed- and Open-loop Ring Resonators*”. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 52(2), 453 - 460.
- Kuo, J.-T., Chen, S.-P. & Jiang, M. (2003). “*Parallel-coupled Microstrip Filters with Over-coupled End Stages for Suppression of Spurious Responses*”. IEEE Microw. Wirel. Comp. Lett., 13(10), 440 - 442.
- Kuo, J.-T., Jiang, M. & Chang, H.-J. (2004). “*Design of Parallel-coupled Microstrip with Suppression of Spurious Resonances Using Substrate Suspension*”. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 52(1), 83 - 89.



- Lee, S.-Y. & Tsai, C.-M. (2000). *“New Cross-coupled Filter Design Using Improved Hairpin Resonators”*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 48(12), 2482 - 2490.
- Levy, R. (1966). *“Three-wire-line Interdigital Filters and Chebycheff and Elliptic - function Characteristic for Broad Bandwidth”*. IET Electron. Lett., 2(12), 455 - 456.
- Levy, R. & Cohn, S. B. (1984). *“A History of Microwave Filter Research, Design and Development”*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 32(9), 1055 - 1067.
- Levy, R. Snyder, V. & Matthaei, G. L. (2002). *“Design of Microwave Filters”*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 50(3), 783 - 793.
- Luo, S., Zhu, L. & Sun, S. (2008). *“Stopband - extended Low - pass Filters Using Microstrip Coupled - line Hairpin Units”*. IEEE Microw. Wirel. Comp. Lett., 18(8), 506 - 508.
- Makimoto, M. & Yamashita, S. (1980). *“Bandpass Filters Using Parallel Coupled Stripline Stepped-impedance Resonators”*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 28(12), 1413 - 1417.
- Makimoto, M. & Yamashita, S. (2001). *Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication : Theory, Design and Application*. Berlin : Springer - Verlag.
- Matthaei, G. L. (1963). *“Comb-line Band-pass Filters of Narrow or Moderate Bandwidth”*. Microwave Journal, 6, 82 - 91.
- Matthaei, G. L. (1962). *“Interdigital Band-pass Filters”*. IRE Trans. Microw. Theory Tech., 10(6), 479 - 491.
- Matthaei, G. L. (2003). *“Narrow-band Fixed-tuned, and Tunable Bandpass Filters with Zig - zag Hairpin-comb Resonators”*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 51(4), 1214 - 1219.
- Matthaei, G. L. (1966). *“Short-step Chebycheff Impedance Transformer”*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 14(8) 372 - 383.
- Matthaei, G. L. & Cristal, E. G. (1965). *“Multiplexer Channel-separating Units Using Interdigital and Parallel-coupled Filters”*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 13(3), 328 - 334.



- Matthaei, G. L., Young, L. & Jones, E. M. T. (1964). *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks and Coupling Structure*. New York : McGraw - Hill.
- Ooi, B.-L. & Wang, Y. (2006). “*Novel Miniaturized Open-square-loop Resonator with Inner Split Rings Loading*”. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 54(7), 3098 - 3103.
- Rhodes, J. (1975). “*Design Formulas for Stepped-impedance Distributed and Digital Wave Maximally Flat and Chebycheff Low-pass Prototype Filters*”. IEEE Trans. Circuit and Systems, 22(11), 866 - 874.
- Riddle, A. (1988). “*High Performance Parallel Coupled Microstrip Filters*”. IEEE MTT-S Intl. Microw. Symp. Dig, 427 - 430.
- Sagawa, M., Takahashi, K. & Makimoto, M. (1989). “*Miniaturized Hairpin Resonator Filters and Their Application to Receiver Front-end MICs’* ”. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 37(12), 1991 - 1997.
- Sun. S. & Zhu, L. (2005). “*Periodically Nonuniform Coupled Microstrip Lines with Equalized Even - and Odd-mode Velocities for Harmonic Suppression in Filter Design*”. IEICE Trans. Commun., 88(6), 2377 - 2382.
- Sun, S. & Zhu, L. (2007). “*Wideband Microstrip Ring Resonator Bandpass Filters under Multi Resonances*”. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 55(10), 2176 - 2182.
- Theerawisitpong, S. (2012). *A Compact Planar Bandpass Filter Using Triangular Resonator TJMW 2012*. Bangkok : n.p.
- Theerawisitpong, S. (2012). “*Study of Second Harmonic Suppression with a Stepped - impedance Triangular Resonator for Enhancing Planar Bandpass Filter Performance*”. EECON Nakorn Nayok, Thailand, 35(2), pp. 635 - 638.
- Theerawisitpong, S., Namahoot, A. & Akkaraekthalin, P. (2004). “*A doubly - trident microstrip bandpass filter with folded cross-coupled four - pole resonators*”. IEEE Intl. Symp. Commun. Info. Tech.2004, Sapporo, Japan, pp. 953 - 956.
- Theerawisitpong, S., Ogue, M., Okawa, F., Suzuki, T., Kamei, T., Morita, N. & Utsumi, Y. (2009). “*SIR Type Bandpass Filter with Wide Suppression Bandwidth*”. IEICE MW2008-189 Tokyo, Japan. 108(452), pp. 1 - 5.



- Theerawisitpong, S., Suzuki, T., Morita, N. & Utsumi, Y. (2009). *“Microstrip bpf using SIRs with Wide and Deep Harmonics Suppression Band”*. Intl, Symp. Ant. Propaga, Bangkok, Thailand, pp. 899 - 902.
- Theerawisitpong, S., Suzuki, T., Morita, N. & Utsumi, Y. (2010). *“Design of Microstrip Bandpass Filters using SIRs with Even-mode Harmonics Suppression for Cellular System”*. IEICE Trans. Elect., 93(6), 867 - 876.
- Theerawisitpong, S., Suzuki, T. & Utsumi, Y. (2010). *“A Compact Microstrip Bandpass Filter using Stepped-impedance Resonators with Two Transmission Zeros Enabling and Even - mode Harmonics Suppression Techniques”*, EECON33 Chiangmai, Thailand, pp.1085 - 1088.
- Theerawisitpong, S., Suzuki, T. & Utsumi, Y. (2011). *“An Investigation of Second-Harmonic Shifting Characteristic of Stepped-impedance Resonators”*. PIERS 2011 Suzhou, China, pp. 528 - 532.
- Theerawisitpong, S., Suzuki, T. & Watanabe, Y. (2007). *“A Compact Modified Meander Resonator for Microwave BPF with Harmonic-suppression for 3G Mobile Communication System”*. IWAT 2007, Cambridge, U.K., pp. 299 - 302.
- Theerawisitpong, S., Suzuki, T. & Watanabe, Y. (2007). *“A Microstrip Filter with Compact Miniaturized Resonator for UMTS Application”*. IEICE SANE2006 - 140 Saitama, Japan. 106(542), pp. 37 - 41.
- Theerawisitpong, S., Suzuki, T., Yamada, H., Morita, N. & Utsumi, Y. (2008). *“A Microstrip Bandpass Filter with Ultra Wide Stopband Using Folded Stepped - Impedance Resonators”*. IEICE MW2008-80 Osaka, Japan. 108(195), pp. 7 - 12.
- Weng, M.-H., Hung, C.-Y. & Su, Y.-K. (2007). *“A Hairpin Line Diplexer for Direct Sequence Ultra Wideband Wireless Communications”*. IEEE Microw. Wirel. Comp. Lett., 17(7), 519 - 521.
- Wenzel, R. J. (1965). *“Exact Theory of Interdigital Bandpass Filters and Related Coupled Structure”*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 13(5), 559 - 575.
- Wenzel, R. J. (1971). *“Synthesis of Compline and Capacitively Loaded Interdigital Bandpass Filter of Arbitrary Bandwidth”*. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 19(8), 679 - 686.