

การออกแบบไมโครสตริปเรโซเนเตอร์ขนาดกะทัดรัดสำหรับการสื่อสารไร้สาย

Design of Compact Microstrip Resonators for Wireless Communications

ศกดิ์ชัย ตันติวิวัฒน์

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อ.เมือง จ.สงขลา 90000

Sugchai Tantivivat

Faculty of Industrial Education and Technology Rajamangala University of Technology Srivijaya,
Ratchadamnoennok Rd, Boryang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand.

Tel: 08-8782-6442 E-mail: sugchai.t@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการทบทวนวรรณกรรมสำหรับการออกแบบไมโครสตริปเรโซเนเตอร์เพื่อลดขนาดของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านให้มีขนาดกะทัดรัดสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งประกอบด้วยคุณลักษณะของไมโครสตริปเรโซเนเตอร์ ชนิดต่างๆ ทั้งแบบที่ให้ผลตอบสนองโมดเดี่ยวและแบบที่ให้ผลตอบสนองหลายโมด นอกจากนี้มีตัวอย่างและแนวทางการวิเคราะห์ผลตอบสนองค่าพารามิเตอร์กระจายของเรโซเนเตอร์แบบสองโมดและสามโมด การวิเคราะห์ผลตอบสนองจากการจำลองนั้น สามารถสังเกตเห็นได้ว่าการออกแบบด้วยเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบหลายโมดนั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากการเรโซแนนซ์แบบโมดคู่และโมดคี่ซึ่งอยู่บนพื้นฐานการเรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบโมดเดี่ยว และยังสามารถลดขนาดในการออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่านได้ เนื่องจากจำนวนของเรโซเนเตอร์ลดลง **คำหลัก** ไมโครสตริปเรโซเนเตอร์ เรโซเนเตอร์ขนาดกะทัดรัด วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน การสื่อสารไร้สาย

Abstract

This article aims to review a design of microstrip resonators in order to reduce size of microstrip bandpass filters in wireless communication systems. The filter features included characteristics of various types of resonators, i.e., single-mode resonators and multi-mode resonators. In addition, by adjusting the structural parameters of the dual-mode and tri-mode

resonators, the scattering parameters can be shifted to higher and lower frequencies. Consequently, each of the designed resonators occupies a very small size because a total number of resonators is reduced.

Keywords: microstrip resonators, compact resonators, bandpass filters, wireless communications.

1. บทนำ

ปัจจุบันความก้าวหน้าของระบบสื่อสารและอุปกรณ์ไร้สายได้เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งนำไปสู่ความต้องการในการออกแบบวงจรต่างๆ เพื่อให้รองรับกับการใช้งานโดยสื่อหรืออุปกรณ์ที่ทันสมัยในปัจจุบันได้แก่ เรดาร์ การออกอากาศของโทรทัศน์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบสื่อสารดาวเทียม โทรศัพท์มือถือและการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ไร้สาย ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นสื่อและอุปกรณ์ที่ใช้งานย่านความถี่วิทยุ พบว่าเมื่อมีการประยุกต์ใช้งานในการสื่อสารไร้สายกับย่านความถี่หลายย่านความถี่นั้น ทำให้เกิดความแออัดของสัญญาณ ดังนั้นเพื่อลดปัญหาในการใช้งานของสื่อและอุปกรณ์เหล่านี้ จะต้องคำนึงถึงการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่เหมาะสมมาใช้ในระบบการสื่อสาร สำหรับวงจรกรองความถี่ที่ได้รับความนิยมในการออกแบบคือ วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (bandpass filter) เนื่องจากเป็นวงจรที่สามารถกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการออกจากระบบและกรองความถี่ที่ต้องการให้ผ่านไปได้ ซึ่งโดยส่วนใหญ่วงจรกรองแถบความถี่ผ่านในระบบการสื่อสารไร้สายนั้นจะออกแบบบนโครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ขนาดเล็ก น้ำหนัก

เบา ความสูญเสียต่ำ สะดวกในการสร้างชิ้นงานและเชื่อมต่อกับวงจรส่วนอื่น [1-2] เมื่อพิจารณาวิธีการสำหรับการออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ประเด็นที่นักวิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญนั้นประกอบด้วย การออกแบบที่สามารถควบคุมความถี่เรโซแนนซ์และแถบความถี่ผ่านได้ง่าย มีผลตอบสนองย่านหยุดแถบความถี่กว้าง รวมถึงขนาดของวงจรที่มีขนาดกะทัดรัด [3-5]

ดังนั้นบทความนี้จึงรวบรวมและเสนอความคิดเห็นในวรรณกรรมที่ผ่านมาในอดีต โดยมุ่งเน้นถึงประเด็นของการออกแบบเรโซเนเตอร์ที่มีขนาดกะทัดรัดและการพิจารณาถึงความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์ชนิดต่างๆ ส่วนแรกเป็นการจัดหมวดหมู่ของเรโซเนเตอร์โดยใช้ลักษณะโมดของการเรโซแนนซ์เป็นส่วนพิจารณา เพื่อเป็นแนวทางพื้นฐานสำหรับการประยุกต์การออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ประกอบด้วย คุณสมบัติของเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบโมดเดียว (single-mode) [6-16] และเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบหลายโมด (multi-mode) [17-55] ในส่วนที่สองเป็นการออกแบบและวิเคราะห์ผลตอบสนองการเรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบสองโมดและสามโมดเบื้องต้น เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ในการออกแบบ และส่วนสุดท้ายเป็นการอภิปรายและสรุปผลเพื่อเป็นแนวทางต่อการออกแบบเรโซเนเตอร์ที่สามารถนำไปออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่มีขนาดกะทัดรัด

2. ไมโครสตริปเรโซเนเตอร์

การออกแบบเรโซเนเตอร์สำหรับวงจรกรองผ่านแถบความถี่นั้น ในกรณีของการออกแบบด้วยเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบโมดเดียวจำนวนของเรโซเนเตอร์เป็นตัวกำหนดจำนวนของโพลในการเรโซแนนซ์ แต่กรณีของการออกแบบด้วยเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบหลายโมดจะให้ค่าโพลที่ขึ้นอยู่กับการเรโซแนนซ์ของความถี่แต่ละโมด ดังนั้นในส่วนนี้จึงพิจารณาถึงการจัดกลุ่มชนิดของไมโครสตริปเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองที่แตกต่างกันตามการเรโซแนนซ์ของความถี่มูลฐานที่เกิดขึ้น

2.1 เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบโมดเดียว (single-mode resonators)

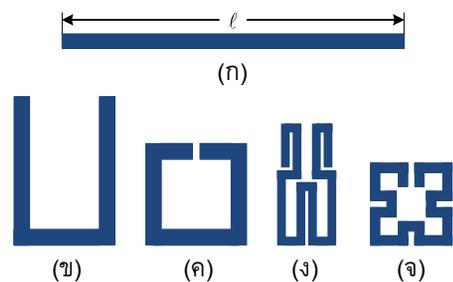
2.1.1 เรโซเนเตอร์แบบมีความยาวครึ่งคลื่น (half-wavelength resonators)

ลักษณะของเรโซเนเตอร์แบบมีความยาวครึ่งคลื่นเป็นเรโซเนเตอร์ที่มีความยาวเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาว

คลื่นในความถี่ใช้งาน ($\lambda_g / 2$) โดยปลายของสายส่งทั้งสองข้างจะอยู่ในลักษณะของสายแบบเปิดวงจร (open-circuit) ดังรูปที่ 1 ซึ่งจะมีสมการในการเรโซแนนซ์ของความถี่มูลฐาน (fundamental frequency, f_0) ตามสมการที่ (1) ดังนี้

$$f_0 = \frac{c}{2l\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

เมื่อ c คือความเร็วของแสงในอากาศว่าง l คือความยาวของสายส่งไมโครสตริป ϵ_{eff} คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของสายส่งไมโครสตริป



รูปที่ 1 เรโซเนเตอร์แบบความยาวครึ่งคลื่น (ก) ลักษณะทั่วไปของเรโซเนเตอร์แบบครึ่งคลื่น (ข) Hairpin line resonator (ค) Open loop resonator (ง) Folded line resonator (จ) Meander line resonator

รูปที่ 1(ก) เป็นลักษณะทั่วไปของเรโซเนเตอร์แบบมีความยาวครึ่งคลื่นเห็นได้ว่า โครงสร้างนั้นมีขนาดใหญ่พอสมควร ดังนั้นรายละเอียดใน [1] ได้มีการกล่าวถึงการลดขนาดเรโซเนเตอร์ดังกล่าวให้มีขนาดที่เล็กลง เช่น Hairpin line resonator ดังรูปที่ 1(ข) Open loop resonator ดังรูปที่ 1(ค) นอกจากนี้งานวิจัยได้มีการพัฒนาต่อยอดในเรื่องความกะทัดรัดของขนาดเรโซเนเตอร์สามารถทำได้โดยการพับ Folded line resonator ดังรูปที่ 1(ง) หรือทำสายส่งให้เป็นแบบขดคววน Meander line resonator

2.1.2 เรโซเนเตอร์แบบมีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (quarter-wavelength resonators)

เรโซเนเตอร์ชนิดนี้เป็นเรโซเนเตอร์ที่ลักษณะของสายส่งทั้งสองข้างนั้น เป็นสายส่งแบบเปิดวงจร (open-circuit) หนึ่งข้าง และลัดวงจร (short-circuit) หนึ่งข้าง โดยมีความยาวเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น ($\lambda_g / 4$) ปลายสายส่งมีการต่อลงกราวด์ของปลายสาย (grounded-end) [6-7] ดังรูปที่ 2 มีสมการในการเรโซแนนซ์ของความถี่มูลฐาน (f_0) ตามสมการที่ (2) ดังนี้

$$f_0 = \frac{c}{4l\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2)$$

โดยขนาดของเรโซเนเตอร์ที่มีการลัดวงจรนั้น มีขนาดที่เล็กลงแต่การสร้างวงจรมัน มีความยุ่งยากขึ้น เนื่องจากต้องมีการ Via hole ของสายส่ง จากขนาดดังรูปที่ 2(ก) สามารถทำให้เรโซเนเตอร์มีขนาดเล็กลงโดยการพับเพื่อให้อยู่ในลักษณะที่เล็กลงได้ดังรูปที่ 2(ข)



รูปที่ 2 เรโซเนเตอร์แบบมีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (ก) ลักษณะทั่วไปของสายส่งแบบหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (ข) เรโซเนเตอร์แบบหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นที่มีการพับ

2.1.3 เรโซเนเตอร์แบบขั้น (SIRs)

เรโซเนเตอร์แบบขั้น (stepped impedance resonators) เป็นเรโซเนเตอร์ที่ประกอบด้วยขนาดอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันสองส่วนหรืออาจมีขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ต่างกันหลายๆ ส่วนขึ้นอยู่กับการออกแบบแสดงดังรูปที่ 3 โดยในการออกแบบโครงสร้างนั้นจะประกอบด้วย 2 ลักษณะคือ ลักษณะของเรโซเนเตอร์แบบขั้นที่มีการเปิดวงจรและลัดวงจรของปลายสายส่ง โดยความยาวของสายส่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนอิมพีแดนซ์และสัดส่วนของความยาวทางไฟฟ้า จุดเด่นของเรโซเนเตอร์ ชนิดนี้คือการควบคุมการเรโซแนนซ์ของความถี่ฮาร์โมนิกส์ และยัง สามารถลดขนาดวงจรได้อีกด้วยเพราะความแตกต่างของสัดส่วนอิมพีแดนซ์ [8]

เรโซเนเตอร์แบบขั้นที่แสดงดังรูปที่ 3(ก) เป็นเรโซเนเตอร์พื้นฐานที่ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์สองส่วนที่มีค่าแตกต่างกันโดยจะมีลักษณะแบบสมมาตรของอิมพีแดนซ์ Z_1, Z_2 และมีค่าความยาวทางไฟฟ้า θ_1, θ_2 ที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถหาเงื่อนไขการเรโซแนนซ์ได้จากตามสมการที่ (3)

$$K = \tan \theta_1 \tan \theta_2 \quad \text{และ} \quad -\cot \theta_1 \tan \theta_2 \quad (3)$$

เมื่อ K คือ สัดส่วนอิมพีแดนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบขั้น

$$K = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (4)$$

หากให้ค่าสัดส่วนของความยาวทางไฟฟ้าเป็น α สามารถแทนค่าของสัดส่วนความยาวทางไฟฟ้าได้ดังนี้

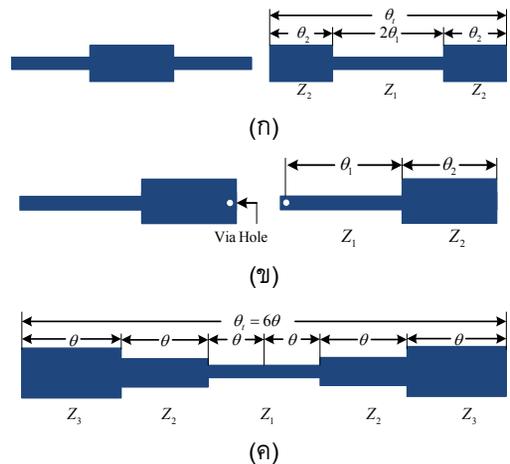
$$\alpha = \frac{\theta_2}{\theta_1 + \theta_2} \quad (5)$$

จากสมการที่ (4) และสมการที่ (5) แทนลงในเงื่อนไขการเรโซแนนซ์ได้ว่า

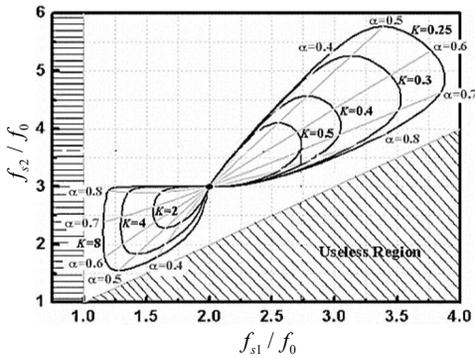
$$K \cdot \cot\left(\frac{1}{2}\alpha \cdot \theta_i\right) = \tan\left(\frac{1}{2}(1-\alpha) \cdot \theta_i\right) \quad (6)$$

$$K \cdot \cot\left(\frac{1}{2}\alpha \cdot \theta_i\right) = -\cot\left(\frac{1}{2}(1-\alpha) \cdot \theta_i\right) \quad (7)$$

เมื่อสมการที่ (6) และสมการที่ (7) แสดงให้เห็นถึงเงื่อนไขการเรโซแนนซ์ของโหมดคี่และโหมดคู่ ตามลำดับ จากสมการที่ (6) และ (7) นั้นบทความ [9] ได้วิเคราะห์รายละเอียดของกราฟผลตอบแทนเรโซเนเตอร์แบบขั้น ดังรูปที่ 4 ซึ่งกราฟนั้นได้วิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนอิมพีแดนซ์และสัดส่วนของความยาวทางไฟฟ้าทั้งแบบโหมดคู่และโหมดคี่ นั้นสามารถวิเคราะห์ความถี่มูลฐาน (f_0) และความถี่ฮาร์โมนิกส์ (f_s) ซึ่งทำให้การวิเคราะห์เพื่อการออกแบบวงจรมันง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น



รูปที่ 3 ประเภทของเรโซเนเตอร์แบบขั้น (ก) เรโซเนเตอร์แบบขั้นที่มีการเปิดวงจรของปลายสายส่ง (ข) เรโซเนเตอร์แบบขั้นที่มีการลัด วงจรของปลายสายส่ง (ค) เรโซเนเตอร์แบบขั้นสามส่วน



รูปที่ 4 ผลตอบสนองของเรโซเนเตอร์แบบขั้นที่เกิดจากการปรับสัดส่วนอิมพีแดนซ์และสัดส่วนของความยาวทางไฟฟ้า

เรโซเนเตอร์แบบขั้นที่แสดงดังรูปที่ 3(ข) เป็นเรโซเนเตอร์ที่มีการลัดวงจรของปลายสายส่งหนึ่งข้างสามารถหาเงื่อนไขการเรโซแนนซ์ได้จากสมการที่ (3) ในส่วนของการเรโซแนนซ์ของควมถี่ฮาร์โมนิกส์สามารถวิเคราะห์กราฟได้จากบทความ [10-11] โดยที่อัตราส่วนของความถี่เรโซแนนซ์สามารถหาได้จากสมการที่ (8)

$$\frac{f_{s1}}{f_0} = \frac{\pi}{\tan^{-1} \sqrt{K}} - 1 \quad (8)$$

เรโซเนเตอร์แบบขั้นที่แสดงดังรูปที่ 3(ค) เป็นเรโซเนเตอร์แบบขั้นที่เพิ่มลำดับความต่างของอิมพีแดนซ์เป็นสามส่วนซึ่งการวิเคราะห์นั้นอาจซับซ้อนขึ้นแต่ข้อดีคือการปรับค่าสัดส่วนอิมพีแดนซ์และค่าความยาวทางไฟฟ้านั้นสามารถปรับและออกแบบได้หลากหลายยิ่งขึ้น โดยเรโซเนเตอร์ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ Z_1, Z_2, Z_3 และมีค่าความยาวทางไฟฟ้า $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ สามารถวิเคราะห์สมการในสภาวะของการเรโซแนนซ์ได้จาก [12-13]

$$\frac{Z_1}{Z_2} \tan \theta_1 \tan \theta_2 + \frac{Z_2}{Z_3} \tan \theta_2 \tan \theta_3 + \frac{Z_1}{Z_3} \tan \theta_1 \tan \theta_3 = 1 \quad (9)$$

เมื่อกำหนดให้ค่าความยาวทางไฟฟ้าแต่ละส่วนให้มีความเท่ากันโดย $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta$ สามารถหาค่าความยาวทางไฟฟ้ารวมของเรโซเนเตอร์และอัตราส่วนของความถี่ในสมการที่ (10) ถึงสมการที่ (12)

$$\theta_r = 6\theta = 6 \tan^{-1} \sqrt{\frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2 + 1}} \quad (10)$$

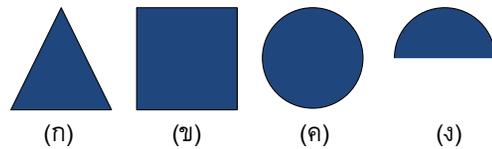
$$\frac{f_{s1}}{f_0} = \frac{\tan^{-1} \sqrt{\frac{1 + K_1 + K_1 K_2}{K_2}}}{\tan^{-1} \sqrt{\frac{K_1 K_2}{1 + K_1 + K_2}}} \quad (11)$$

$$\frac{f_{s2}}{f_0} = \frac{\pi}{2 \tan^{-1} \sqrt{\frac{K_1 K_2}{1 + K_1 + K_2}}} \quad (12)$$

เมื่อ $K_1 = \frac{Z_3}{Z_2}$ และ $K_2 = \frac{Z_2}{Z_1}$ คือสัดส่วนของอิมพีแดนซ์

2.1.4 เรโซเนเตอร์แบบแพทช์ (patch resonators)

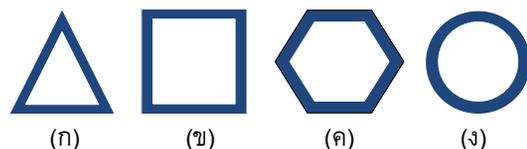
เรโซเนเตอร์แบบแพทช์เป็นเรโซเนเตอร์ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงเรขาคณิตแสดงดังรูปที่ 5 ข้อดีของการออกแบบด้วยเรโซเนเตอร์ชนิดนี้เป็นเรโซเนเตอร์ที่มีความสูญเสียต่ำ แต่ขนาดของเรโซเนเตอร์นี้จะมีขนาดที่ใหญ่และมีผลข้างเคียงที่เกิดจากการแผ่กระจายของคลื่น [14]



รูปที่ 5 รูปทรงต่างๆ ของเรโซเนเตอร์แบบแพทช์ (ก) สามเหลี่ยม (ข) สี่เหลี่ยม (ค) วงกลม (ง) ครึ่งวงกลม

2.1.5 เรโซเนเตอร์แบบวงแหวน (ring resonators)

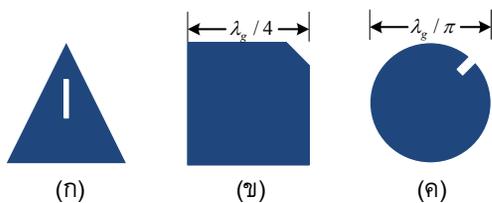
เรโซเนเตอร์แบบวงแหวนมีลักษณะเป็นวงรอบปิดแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งอาจอยู่ในรูปทรงแบบสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยมหรือแปดเหลี่ยม หรือวงกลม เป็นต้น โดยเรโซเนเตอร์ชนิดนี้มีความยาวเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่นของความถี่ใช้งาน (λ_g) ซึ่งจากโครงสร้าง รูปที่ 6(ง) การออกแบบวงจรของความถี่ที่ประยุกต์ใช้ด้วยเรโซเนเตอร์วงแหวนแบบวงกลมนั้นอาจมีข้อจำกัดในเรื่องการคัปปลิ่งผ่านของสัญญาณเนื่องจากมีรูปร่างที่เป็นโค้งแต่ลักษณะของเรโซเนเตอร์ชนิดนี้เหมาะกับการออกแบบวงจรชนิด Branch-line coupler หรือเพื่อออกแบบเป็น Common port ของวงจร ดังรายละเอียดใน [15-16] จะเห็นว่าขนาดของเรโซเนเตอร์เมื่อเทียบกับโครงสร้างอื่นๆ แล้วเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนจะมีขนาดที่ใหญ่แต่สามารถนำมาประยุกต์ให้เป็นเรโซเนเตอร์ที่มีผลตอบสนองแบบสองโมด สามารถอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 6 รูปทรงต่างๆ ของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวน (ก) สามเหลี่ยม (ข) สี่เหลี่ยม (ค) หกเหลี่ยม (ง) วงกลม

2.2 เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบสองโหมด (dual-mode resonators)

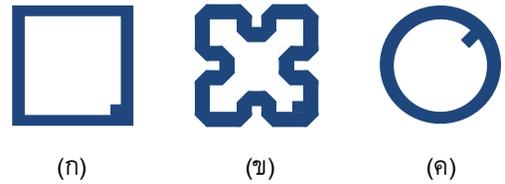
เรโซเนเตอร์แบบสองโหมดมีลักษณะที่แตกต่างกับเรโซเนเตอร์ที่เป็นแบบโหมดเดียวเพราะการเรโซแนนซ์ของความถี่มูลฐานนั้นเป็นการเรโซแนนซ์ในลักษณะแบบโหมดคู่และโหมดคี่ ซึ่งสามารถลดขนาดของวงจรได้เนื่องจากจำนวนของเรโซเนเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบลดลงโดยจะแบ่งเป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการนำเรโซเนเตอร์แบบแพทช์หรือริงมาดัดแปลงเพื่อก่อให้เกิดการเรโซแนนซ์แบบสองโหมด [17-27] เช่น การตัดหรือเจาะรูจากรูปที่ 7 การเพิ่มสตัปจิงรูปที่ 8 และโครงสร้างที่ประยุกต์จิงรูปที่ 9 ตามลำดับ และนอกจากนี้ในส่วนที่สองเป็นการนำเรโซเนเตอร์แบบ Open-loop resonators, Hairpin line resonators หรือ Stepped-impedance resonators มาดัดแปลง [28-43] กรณีของการนำเรโซเนเตอร์ ประเภทนี้มาใช้งานเสมือนกับการรวมเรโซเนเตอร์ทั้ง 2 รูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นเรโซเนเตอร์แบบปลายสายส่งเปิดวงจรแสดงได้จิงรูปที่ 10 หรือปลายสายส่งลัดวงจรแสดงได้จิงรูปที่ 11 จะเห็นว่าการออกแบบในลักษณะนี้เป็นการผสมผสานระหว่างเรโซเนเตอร์ที่มีความยาวทั้ง $\lambda_g/2$ และ $\lambda_g/4$ มาประยุกต์เพื่อให้เกิดผลตอบสนองของการเรโซแนนซ์เป็นแบบสองโหมด



รูปที่ 7 เรโซเนเตอร์สองโหมดแบบแพทช์ที่มีการตัดหรือเจาะรูจากรูป (ก) สามเหลี่ยม (ข) สี่เหลี่ยม (ค) วงกลม

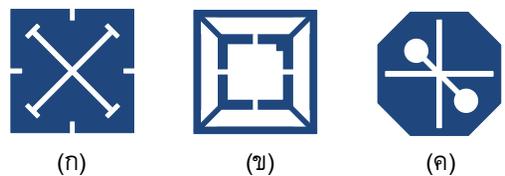
เรโซเนเตอร์แบบสองโหมดที่มีการเจาะรูแบบสามเหลี่ยมจิงรูปที่ 7(ก) เป็นเรโซเนเตอร์ที่ได้มีการวิเคราะห์โดย [17] ซึ่งได้มีการพัฒนาให้การเรโซแนนซ์เป็นแบบสองโหมด เพื่อนำมาประยุกต์เป็นวงจรกรองความถี่ขนาดกะทัดรัดโดยการตัดปลายและการเจาะรู และในรูปที่ 7(ข) [18] ได้วิเคราะห์เพิ่มเติมจากการออกแบบของแพทช์เรโซเนเตอร์แบบสี่เหลี่ยมและในส่วนจิงรูปที่ 7(ค) [19] ได้วิเคราะห์เรโซเนเตอร์แบบสองโหมดแบบวงแหวนรูปวงกลมและ [20] ได้พัฒนาเพิ่มเติมเป็น

วงจรถ่ายที่เพิ่มจำนวนของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่มีขนาดกะทัดรัดเป็นสองแถบความถี่



รูปที่ 8 เรโซเนเตอร์สองโหมดแบบวงแหวนที่มีการเพิ่ม stub perturbations (ก) สี่เหลี่ยม (ข) สี่เหลี่ยมแบบขดวงวน (ค) วงกลม

การนำเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนมาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาให้เป็นเรโซเนเตอร์แบบสองโหมด ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่ม Stub perturbations ซึ่งแสดงจิงรายละเอียดใน [21] เป็นการวิเคราะห์จิงรูปที่ 8(ก) และนอกจากนี้ได้มีการพัฒนาโดย [22-23] เพื่อลดขนาดของวงจรโดยการออกแบบเรโซเนเตอร์เป็น Meander loop จิงรูปที่ 8 (ข) ตามลำดับ และในส่วนจิงรูปที่ 8(ค) [24] ได้วิเคราะห์เรโซเนเตอร์สองโหมดแบบวงแหวนรูปวงกลมและได้พัฒนาเพิ่มเติมเป็นวงจรถ่ายที่เพิ่มจำนวนโพลในการเรโซแนนซ์จากการแปลงลักษณะของเรโซเนเตอร์เป็นเรโซเนเตอร์แบบวงแหวน 2 วงซ้อนกัน (double-ring) เพื่อลดขนาดวงจร



รูปที่ 9 เรโซเนเตอร์สองโหมดที่พัฒนาเพิ่มเติม (ก) แพทช์แบบสี่เหลี่ยมและมีการเจาะรู (ข) วงแหวนสี่เหลี่ยมและมีการเพิ่ม stub perturbations (ค) แพทช์แบบหกเหลี่ยมที่มีการเจาะรู

นอกจากนี้โครงสร้างพื้นฐานของเรโซเนเตอร์แบบแพทช์หรือริงที่นำมาดัดแปลงเพื่อก่อให้เกิดผลตอบสนองการเรโซแนนซ์แบบสองโหมด ยังมีการออกแบบเพิ่มเติมโดย [25-27] สามารถแสดงโครงสร้างของเรโซเนเตอร์ได้จิงรูปที่ 9 (ก) ถึงโครงสร้างจิงรูปที่ 9 (ค) ตามลำดับ

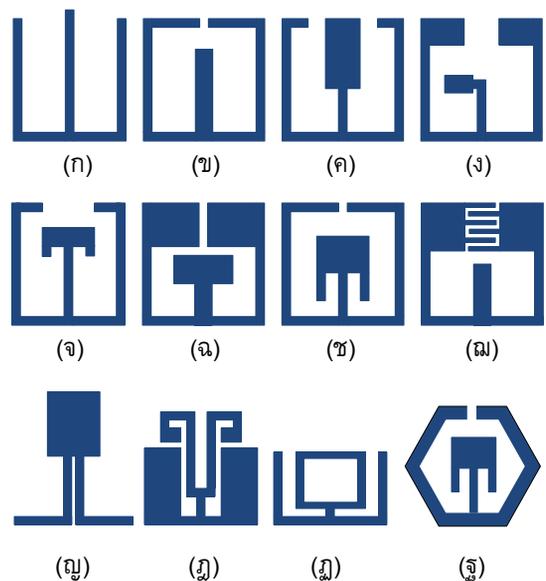
ประเด็นของการออกแบบเรโซเนเตอร์ให้เป็นแบบสองโหมดอีกรูปแบบหนึ่ง สามารถทำได้โดยการนำเรโซเนเตอร์แบบ Open-loop resonators, Hairpin line resonators

หรือเรโซเนเตอร์ชนิด Stepped-impedance resonators มาดัดแปลง ซึ่งการออกแบบลักษณะนี้เป็นที่นิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากการออกแบบนั้นไม่ซับซ้อนและสามารถลดขนาดให้กะทัดรัดด้วยการพับหรือทำให้สายสัญญาณนั้นเป็นลักษณะของการขดวงวน ตัวอย่างการออกแบบด้วยสายส่งที่ไม่มีการลัดวงจรแสดงดังรูปที่ 10 โดยรูปที่ 10(ก) และรูปที่ 10(ข) เป็นการออกแบบโดยการประยุกต์จากเรโซเนเตอร์แบบ Hairpin line resonators และ Open-loop resonators และมีการเพิ่มสตัปโพลด์เพื่อทำการเปลี่ยนเรโซเนเตอร์นั้นให้มีผลตอบสนองแบบสองโหมด [28-29] ซึ่งจากตัวอย่างเป็นเรโซเนเตอร์ลักษณะพื้นฐานที่สามารถประยุกต์หรือต่อยอดได้ง่าย และในส่วนของลักษณะการออกแบบในรูปแบบอื่นๆ นั้น สามารถออกแบบได้โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเรโซเนเตอร์เพียงเล็กน้อย เช่น รูปที่ 10(ค) และรูปที่ 10(ง) โดย [30-31] ออกแบบด้วยการใช้สตัปโพลด์แบบเรโซเนเตอร์แบบขั้นเพื่อปรับจูน ความถี่ด้วยสตัปส่วนอิมพีแดนซ์ รูปที่ 10(จ) รูปที่ 10(ฉ) และรูปที่ 10(ช) โดย [32-34] ออกแบบโดยใช้สตัปที่แปลงเป็นโพลด์แบบคาปาซิทีฟ รูปที่ 10(ฉ) เป็นการออกแบบโดยใช้ Open-loop resonators แต่ [35] มีการประยุกต์เพิ่มเติมโดยแปลงเป็นเรโซเนเตอร์แบบอินเตอร์ดิจิตอล และ รูปที่ 10(ญ) ถึง รูปที่ 10(ฐ) เป็นการประยุกต์เพิ่มเติมโดย [36-39] เพื่อให้มีความสะดวกในการออกแบบเฉพาะตามความต้องการ รูปที่ 10(ญ) และรูปที่ 10(ฎ) เป็นการออกแบบด้วยการใช้โพลด์คาปาซิทีฟ [36-37] และรูปที่ 10(ฏ) นั้นเป็นการปรับปรุงโพลด์ด้วยเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนเพิ่มเติมเพื่อวิเคราะห์ค่าของทรานสมิซชันซีโรและวิเคราะห์ถึง Source-loaded coupling [38] นอกจากนี้ อาจมีการออกแบบประยุกต์เพื่อให้มีขนาดเล็กลงโดยการปรับเรโซเนเตอร์ให้เป็นลักษณะต่างๆ เช่นกรณีของ [39] รูปที่ 10(ฐ) สามารถออกแบบโดยการปรับเรโซเนเตอร์แบบ Open-loop ให้มีลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยมได้เช่นกัน

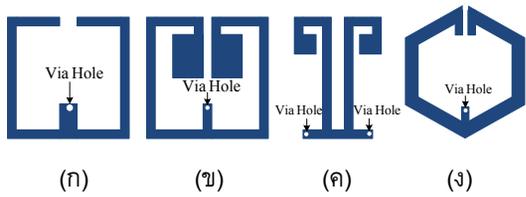
ในส่วนของ การออกแบบโดยใช้เรโซเนเตอร์ที่มีการเป็นแบบปลายสายส่งลัดวงจรนั้นสามารถออกแบบแสดงโครงสร้างดังรูปที่ 11 ซึ่งการลัดวงจรของเรโซเนเตอร์นั้น อาจทำให้โครงสร้างเล็กลงเนื่องจากสตัปโพลด์นั้นมีความยาวที่สั้นลงตามผลตอบสนองของสายส่งแบบลัดวงจร การวิเคราะห์นั้นไม่ซับซ้อนการวิเคราะห์ผลตอบสนองมีความคล้ายคลึงกับวงจรแบบสายส่งปลายเปิดหากพิจารณาโครงสร้างตามรายละเอียดดัง รูปที่ 11(ก) ถึง รูปที่ 11(ง)

จากการออกแบบของ [40-43] จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างของเรโซเนเตอร์นั้นเสมือนกับการออกแบบวงจรปลายสายส่งแบบเปิดวงจร

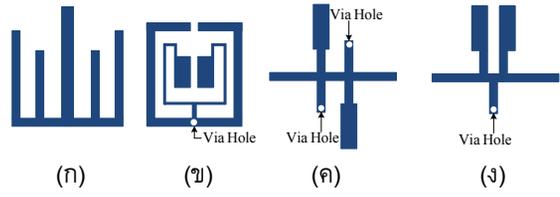
ประโยชน์ของเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบสองโหมดคือ การตอบสนองที่มีการเรโซแนนซ์ของความถี่มูลฐานเป็นสองความถี่ โดยที่เรโซเนเตอร์แบบสองโหมดหนึ่งตัวสามารถเทียบได้กับการตอบสนองของการเรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบโหมดเดียวสองตัว จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างนั้นเมื่อเทียบกันแล้วสามารถลดขนาดในการออกแบบได้ครึ่งหนึ่ง ซึ่งการออกแบบนั้นไม่ซับซ้อนเนื่องจากเป็นโครงสร้างพื้นฐานและผลตอบสนองนั้นเกิดจากการวิเคราะห์ด้วยเรโซเนเตอร์ให้ผลตอบสนองแบบโหมดเดียว ซึ่งสามารถนำแนวทางการออกแบบนี้พัฒนาสู่การออกแบบวงจรที่ขนาดกะทัดรัดได้ ในกรณีที่ ต้องการออกแบบเรโซเนเตอร์ให้ได้ผลตอบสนองแบบสามโหมดหรือมากกว่าสามโหมดก็สามารถออกแบบได้เช่นกัน โดยที่สามารถนำแนวทางการวิเคราะห์พื้นฐานของเรโซเนเตอร์แบบโหมดเดียวและเรโซเนเตอร์ให้ผลตอบสนองแบบสองโหมดมาประยุกต์ร่วมกันได้ ซึ่งจะกล่าวและยกตัวอย่างในการออกแบบโครงสร้างต่างๆ ในส่วนของหัวข้อถัดไป



รูปที่ 10 เรโซเนเตอร์แบบสองโหมดที่ไม่มีการลัดวงจรปลายสายส่ง



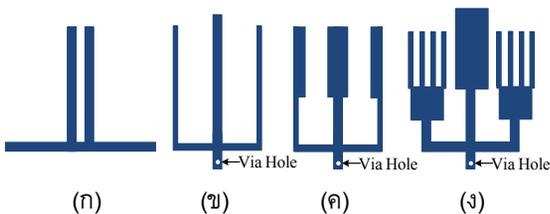
รูปที่ 11 เรโซเนเตอร์แบบสองโหมดที่มีการลัดวงจรปลายสายส่ง



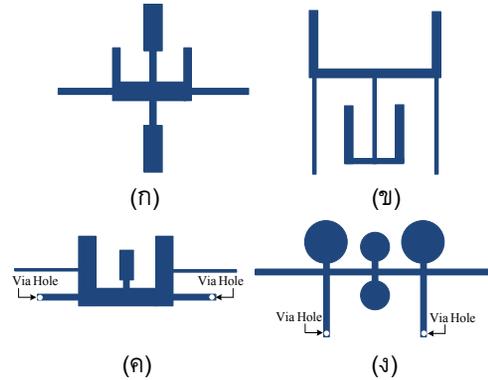
รูปที่ 13 เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบสี่โหมด

2.3 เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบหลายโหมด (multi-mode resonators)

นอกจากการวิเคราะห์เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบโหมดเดียวและแบบสองโหมดแล้วสามารถนำแนวทางมาประยุกต์ให้เรโซเนเตอร์นั้นสามารถลดขนาดให้เล็กลงได้ โดยการใช้เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบหลายโหมด โดยการออกแบบสามารถออกแบบโครงสร้างได้ดังรูปที่ 12 โดยรูปที่ 12(ก) ถึง รูปที่ 12(ง) ให้ผลตอบสนองแบบสามโหมด [44-47] โดยรูปที่ 12(ก) เป็นเรโซเนเตอร์แบบสามโหมดที่ออกแบบโดย [44] ซึ่งใช้สายส่งที่เป็นแบบเปิดวงจรของปลายสายส่ง รูปที่ 12(ข) เป็นการออกแบบโดย [45] ซึ่งใช้เรโซเนเตอร์แบบลัดวงจรของปลายสายส่ง โดยรูปที่ 12(ค) และรูปที่ 12(ง) เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะประยุกต์เพิ่มโดย [46-47] สามารถออกแบบด้วยการใช้เรโซเนเตอร์แบบขั้นและแบบอินเตอร์ดิจิตอลตามลำดับ และรูปที่ 13(ก) ถึง รูปที่ 13(ง) เป็นโครงสร้างที่ให้ผลตอบสนองแบบสี่โหมด [48-51] ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองมากกว่าสี่โหมด แสดงได้ดังรูปที่ 14 ตามรายละเอียดการออกแบบใน [52-55] อย่างไรก็ตามสำหรับการออกแบบวงจรความถี่ผ่านด้วยเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบหลายโหมดนั้น เป็นการออกแบบที่ทำให้ขนาดกะทัดรัดและเล็กลงได้ แต่ในการวิเคราะห์ก็จะต้องทำให้ง่ายขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 12 เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบสามโหมด



รูปที่ 14 เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบห้าโหมด

3. การออกแบบด้วยเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบหลายโหมด

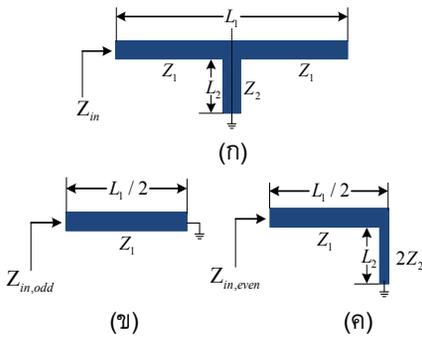
3.1 การออกแบบด้วยเรโซเนเตอร์แบบสองโหมด

รูปที่ 15(ก) เป็นโครงสร้างทั่วไปของเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบสองโหมดที่มีสลับแบบลัดวงจร ซึ่งโครงสร้างนั้น ประกอบด้วยเรโซเนเตอร์ที่มีความยาวครึ่งคลื่น และโครงสร้างมีสลับแบบลัดวงจรของปลายสายส่ง เมื่อ Z_1 , L_1 , Z_2 และ L_2 คือ ค่าอิมพีแดนซ์และค่าของความยาวสายส่ง การวิเคราะห์นั้นสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี คือการเรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบโหมดคู่ ดังรูปที่ 15(ข) และการเรโซแนนซ์แบบโหมดคี่ ดังรูปที่ 15(ค) สามารถวิเคราะห์การเรโซแนนซ์แบบโหมดคู่ ได้ดังสมการที่ (13)

$$Z_{in,odd} = -jZ_1 \cot(\theta_1), Z_{in,odd} = jZ_1 \tan(\theta_1 / 2) \quad (13)$$

จากเงื่อนไขการเรโซแนนซ์ของโหมดคี่ $Z_{in,odd} = \infty$ จะเห็นว่าคำตอบของความยาวทางไฟฟ้า $\theta_1 = \pi$ นั่นคือการเรโซแนนซ์ของสายส่งแบบเปิดวงจรที่มียาวครึ่งคลื่นนั่นเอง ดังนั้นสมการเรโซแนนซ์สามารถหาได้จากสมการที่ (14)

$$f_{odd} = \frac{c\theta_1}{2\pi L_1 \sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{c}{2L_1 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (14)$$



รูปที่ 15 เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบสามโหมด

การเรโซแนนซ์แบบโหมดคู่สามารถหาได้จากสมการที่ (15)

$$Z_{in,even} = Z_1 \frac{Z_1 \tan(\theta_1 / 2) + 2Z_2 \tan \theta_2}{j2Z_2 \tan(\theta_1 / 2) \tan \theta_2 - Z_1} \quad (15)$$

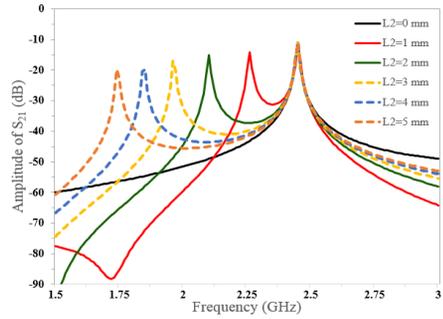
จากเงื่อนไขการเรโซแนนซ์ของโหมดคู่ $Z_{in,even} = \infty$ สามารถหาเงื่อนไขการเรโซแนนซ์ได้ดังสมการที่ (16)

$$\tan(\theta_1 / 2) \tan \theta_2 = \frac{Z_1}{2Z_2} \quad (16)$$

สมการเรโซแนนซ์สามารถหาได้จากสมการที่ (17)

$$f_{even} = \frac{c}{2(L_1 + 2L_2)\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (17)$$

การจำลองผลตอบสนองการเรโซแนนซ์ของควมถี่สามารถทำได้ดังตัวอย่าง เช่นต้องการออกแบบวงจรที่ย่านความถี่ใช้งาน WLAN ซึ่งมีความถี่กลางเท่ากับ 2.45 GHz ค่าการเรโซแนนซ์ของโหมดคู่ สามารถคำนวณค่าความยาวทางไฟฟ้าของสายส่งแบบเปิดวงจร โดยใช้สมการที่ (1) หรือสมการที่ (14) ในการคำนวณตัวอย่างนี้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการออกแบบเรโซเนเตอร์ที่ถูกสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีความหนาของฐานรอง $h = 0.8$ mm และค่า $\epsilon_r = 2.2$ เมื่อกำหนดให้ค่า $Z_1 = 113.60 \Omega$ (หนา 0.50 mm) จะได้ค่า $\epsilon_{eff} = 1.73$ และค่าความยาว $L_1 = 46.60$ mm ซึ่งมีค่าความยาวคลื่นประมาณ $\lambda_g / 2$ (มีรายละเอียดการคำนวณเพิ่มเติมใน [1] หรือสามารถคำนวณด้วยโปรแกรม AppCAD) กรณีที่มีการเพิ่มและปรับความยาวของสายส่งที่มีการลัดวงจร L_2 สามารถพิจารณาตามสมการที่ (17) เมื่อจำลองด้วยโปรแกรมจำลองทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (อาจใช้ได้หลายโปรแกรม เช่น โปรแกรม CST, IE3D, Sonnet, HFSS เป็นต้น) จะเห็นว่าผลตอบสนองของโหมดคู่ นั้นเกิดเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 16

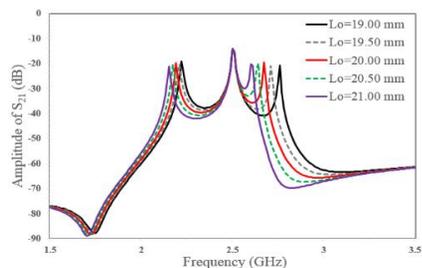
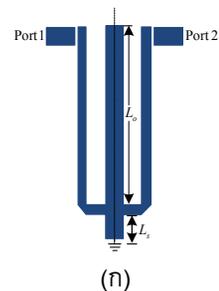


รูปที่ 16 การเรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์เมื่อมีการปรับสตัป

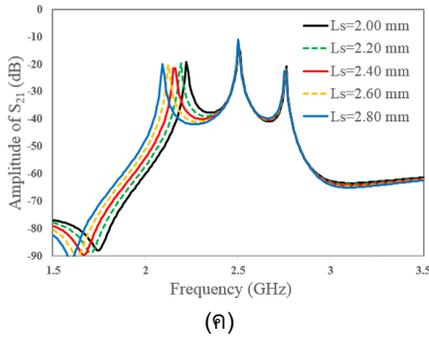
จากรูปที่ 16 จะเห็นว่าเมื่อไม่มีความยาวสตัป L_2 การเรโซแนนซ์จะเรโซแนนซ์เพียงโหมดเดียวแต่เมื่อเพิ่มสตัปที่มีความยาว L_2 จะมีการเรโซแนนซ์เพิ่มอีกหนึ่งโหมดและเมื่อปรับความยาวของสตัปแล้วสามารถสังเกตเห็นจากการจำลองได้ว่า เมื่อความยาวสตัปเพิ่มขึ้นความถี่ของการเรโซแนนซ์ของโหมดคู่จะลดลงตามลำดับ โดยที่ความถี่การเรโซแนนซ์ของโหมดคู่ก็เสมือนไม่มีการเปลี่ยนแปลง

3.2 การออกแบบด้วยเรโซเนเตอร์แบบสามโหมด

หัวข้อนี้เป็นการอธิบายเพิ่มเติมในส่วนของการออกแบบเรโซเนเตอร์แบบสามโหมด โดยการวิเคราะห์นั้นจะซับซ้อนขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่ยังอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีของผลตอบสนองของเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบสองโหมด สามารถออกแบบเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบสามโหมดดังรูปที่ 17 จะเห็นว่าขนาดของเรโซเนเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มสตัปซึ่งสามารถเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 11(ก) และรูปที่ 12(ข) ที่ให้ผลตอบสนองแบบสองโหมดและสามโหมด ตามลำดับ



(ข)



รูปที่ 17 เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบสามโหมด (ก) โครงสร้างของเรโซเนเตอร์แบบลวดวงจร (ข) ผลตอบสนองเมื่อปรับความยาว L_0 (ค) ผลตอบสนองเมื่อปรับความยาว L_s

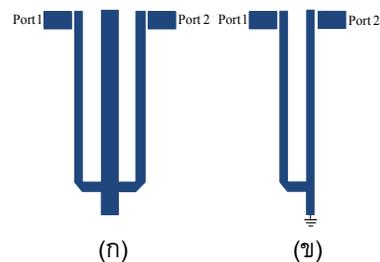
โครงสร้างของเรโซเนเตอร์รูปที่ 17(ก) มีผลการจำลองผลตอบสนองดังรูปที่ 17(ข) และรูปที่ 17(ค) จะเห็นได้ว่าผลของการเกิดเรโซแนนซ์มีทั้งหมด 3 โหมด และเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ของความยาวสายส่ง ผลตอบสนองนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น เมื่อปรับความยาวสายส่ง L_0 ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์โหมดที่หนึ่ง f_{m1} ความถี่เรโซแนนซ์โหมดที่สาม f_{m3} มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่ลดลงตามลำดับ โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์โหมดที่สอง f_{m2} นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อปรับความยาวสายส่ง L_s ความถี่ f_{m1} มีการเปลี่ยนแปลงการเรโซแนนซ์ของความถี่ลดลงตามความยาวของ L_s โดยความถี่โหมดอื่นไม่เปลี่ยนแปลง

อย่างไรก็ตามในการออกแบบ ควรคำนึงถึงการวิเคราะห์การเรโซแนนซ์ของแต่ละโหมดความถี่ที่เกิดขึ้น สามารถวิเคราะห์ด้วยการคัปปลิงพอร์ตอินพุต (loose coupling) เพื่อทดสอบการเรโซแนนซ์ โดยโครงสร้างนี้สามารถวิเคราะห์การเกิดเรโซแนนซ์จากส่วนต่างๆ ของเรโซเนเตอร์ ได้ดังรูปที่ 18 ซึ่งจากรูปที่ 18(ก) เป็นการเรโซแนนซ์แบบโหมดคี่และรูปที่ 18(ข) เป็นการเรโซแนนซ์แบบโหมดคู่ของเรโซเนเตอร์แบบสองโหมด ตามลำดับสามารถใช้ทฤษฎีเทียบเคียงของการเรโซแนนซ์แบบสองโหมดจากเรโซเนเตอร์ ในรูปที่ 10(ก) และ รูปที่ 11(ก) มาประกอบกับการวิเคราะห์ผลตอบสนองได้ดังรูปที่ 19 โดยการคัปปลิงจากพอร์ตอินพุตดังรูปที่ 18 นั้น สามารถสังเกตเห็นว่าเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบสามโหมดเกิดจากการเรโซแนนซ์ ของการรวมโหมดการเรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบสองโหมด ซึ่งสามารถวิเคราะห์จากผลตอบสนองทั้งกรณีของโหมดคี่และโหมดคู่ ดังรูปที่ 19

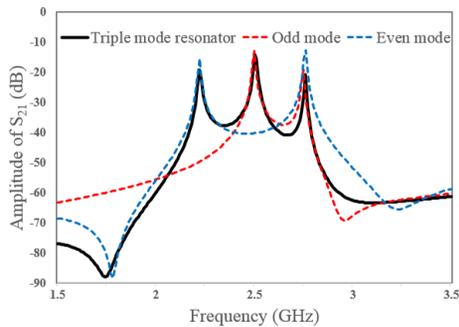
4. การอภิปรายผล

การออกแบบวงจรความถี่ด้วยเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบหลายโหมด จะเห็นได้ว่าสามารถลดขนาดในการออกแบบวงจรความถี่ได้ เนื่องจากจำนวนของเรโซเนเตอร์นั้นลดลง สำหรับการวิเคราะห์ไม่ซับซ้อนซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากผลตอบสนองของเรโซเนเตอร์พื้นฐานแบบโหมดเดียว ทั้งเป็นแบบเปิดวงจรที่มีความยาว $\lambda_g / 2$ และเป็นแบบลวดวงจรที่มีความยาว $\lambda_g / 4$ ซึ่งมีลักษณะพื้นฐานของเรโซเนเตอร์แบบ Open-loop resonators, Hairpin line resonators, Stepped-impedance resonators, Patch resonators หรือลักษณะแบบวงแหวน Ring resonators การออกแบบนั้น นอกจากออกแบบด้วยการใช้เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบหลายโหมดแล้ว ยังสามารถลดขนาดวงจรโดยการพับ หรือการทำให้สายส่งเป็นแบบขดทวน Meander line

การออกแบบของเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบหลายโหมดประเด็นสำหรับการออกแบบนั้นจะต้องเข้าใจและสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการเรโซแนนซ์ของความถี่ที่เกิดขึ้นแต่ละโหมดความถี่นั้นเกิดจากส่วนใด ด้วยวิธีการ loose coupling ซึ่งจากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าการเรโซแนนซ์นั้นเกิดจากการวิเคราะห์แบบโหมดคี่และโหมดคู่ โดยปกติของการออกแบบนั้น สามารถปรับพารามิเตอร์แค่บางตัวก็ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยที่ความถี่การเรโซแนนซ์ของโหมดอื่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 18 การคัปปลิงด้วยพอร์ตอินพุตเพื่อทดสอบการเรโซแนนซ์ (ก) การเรโซแนนซ์แบบโหมดคี่ (ข) การเรโซแนนซ์แบบโหมดคู่



รูปที่ 19 ผลตอบสนองของค่าความสูญเสียจากการใส่แทรก

5. สรุป

บทความนี้ทบทวนรายละเอียดและคุณลักษณะเฉพาะของเรโซเนเตอร์ชนิดต่างๆ ประกอบด้วยเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบโมดเดี่ยวและแบบหลายโมดรวมถึงการปรับโครงสร้างให้มีขนาดกะทัดรัด นอกจากนี้ได้วิเคราะห์ถึงการเรโซแนนซ์ผลตอบสนองของเรโซเนเตอร์แบบสองโมดและสามโมดเบื้องต้น เนื่องจากเรโซเนเตอร์ที่มีผลตอบสนองแบบหลายโมดสามารถลดขนาดของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านได้ อย่างไรก็ตามในการออกแบบถึงแม้ต้องการวงจรที่มีขนาดกะทัดรัดแต่จะต้องคำนึงประเด็นของ การควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ การให้ผลตอบสนองที่มีย่านหยุดแถบความถี่กว้าง หรือประเด็นของการวิเคราะห์ในส่วนของการานสมิซชันซีไร่ ล้วนเป็นสิ่งจำเป็นทั้งสิ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hong J. S. Microstrip Filters for RF/ Microwave Applications, 2nd Ed. New Jersey: Wiley. 2011.
- [2] Pozar D. M. Microwave Engineering, 2nd ed. New York, Wiley. 1998.
- [3] Yang T., Tamura M., Itoh, T. Compact hybrid resonator with series and shunt resonances used in miniaturized filters and balun filters. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2010; 58(2):390-402.
- [4] Chen F. C., Chu Q. X., Li Z. H. and Wu X. H. Compact dual-band bandpass filter with controllable bandwidths using stub-loaded multiple-mode resonator. IET. Microwaves, Antennas & Propagation. 2012; 6(10):1172-1178.
- [5] Xu J., Wu W., Miao C. Compact and Sharp Skirts Microstrip Dual-Mode Dual-Band Bandpass Filter Using a Single Quadruple-Mode Resonator (QMR). IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2013; 61(3):1104-1113.
- [6] Chang C. Y., Chen C. C. A novel coupling structure suitable for cross-coupled filters with folded quarter-wave resonators. IEEE Microwave Wireless Compon. Lett. 2003; 13:517-519.
- [7] Chen C. C., Chen Y. R., Chang C. Y. Miniature microstrip cross-coupled filters using quarter-wave or quasi-quarter wave resonators. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2003; 51(1):120-131.
- [8] Sagawa M., Makimoto M., Yamashita S. Geometrical structure and fundamental characteristics of microwave stepped-impedance resonators. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1997; 45(7):1078 -1085.
- [9] Chen C. F., Huang T. Y., Wu R. B. Design of dual- and triple-passband filters using alternately cascade multiband resonators. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2006; 54(9): 3550-3558.
- [10] Lin S. C., Deng P. H., Lin Y. S., Wang C. H., Chen C. H. Wide-stopband micro-strip band-pass filters using dissimilar quarter wave length stepped impedance resonators. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2006; 54(3):1011-1018.
- [11] Kuo T. N., Li W. C., Wang C. H., Chen C. H. Wide-stopband microstrip bandpass filters using quarter-wavelength stepped-impedance resonators and bandstop embedded resonators. IEEE Microwave Wireless Compon. Lett. 2008; 18(6):389-391.
- [12] Zhang H., Chen K. J. A tri-section stepped-impedance resonator for cross-coupled bandpass filters. IEEE Microwave Wireless Compon. Lett. 2005; 15(6):401-403.

- [13] Hsu C. I. G., Lee C. H., Hsieh Y. H. Tri-band bandpass filter with sharp passband skirts designed using tri-section SIRs. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2008; 18(1):19-21.
- [14] Cuhaci M., James D. S. Radiation from triangular and circular resonators in microstrip. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* 1977; 438-441.
- [15] Wang W. H., Shen T. M., Huang T. Y., Wu R. B. Miniaturized rat-race coupler with bandpass response and good stopband rejection. *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.* 2009; 709-712.
- [16] Zewani M., Hunter I.C. Design of ring-manifold microwave multiplexers. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.* 2006; 689-692.
- [17] Hong J. S., Li S. Theory and experiment of dual-mode microstrip triangular patch resonators and filters. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2004; 52(4):1237-1243.
- [18] Hsieh L. H., Chang K. Dual-mode elliptic-function bandpass filter using one single patch resonator without coupling gaps. *Electron. Lett.* 2000; 36(24):2022-2023.
- [19] Serrano A. L. C., Corraera F. S., Vuong T. P., Ferrari P. Analysis of a reconfigurable bandpass circular patch filter. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2010; 58(12):3918-3924.
- [20] Zhang R., Zhu L., Luo S. Dual-mode dual-band bandpass filter using a single slotted circular patch resonator. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2012; 22(5):233-235.
- [21] Hong J. S., Lancaster M. J. Bandpass characteristics of new dual-mode microstrip square loop resonators. *Electronics Lett.* 1995; 31:891-892.
- [22] Hong J. S., Lancaster M. J. Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a novel meander loop resonator. *Microwave and Guided Wave Lett.* 1995; 5(11):371-372.
- [23] Djoumessi E. E. 2011. Compact packaged diplexer based on highly selective dual-mode bandpass filter. *IEEE Microwave Mag.* 2011; 12(1):89-93.
- [24] Liu J. C., Lu P. C., Shie C. H., Cheng C. S., Yao L. Dual-mode double-ring resonators for microstrip band-pass filter applications. *IEE Proc. Microwave Antennas Propag.* 2004; 151(5):430-434.
- [25] Sun S., Menzel W. Novel dual-mode balun bandpass filters using single cross-slotted patch resonator. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2011; 21(8):415-417.
- [26] Gorur A. A novel dual-mode bandpass filter with wide stopband using the properties of microstrip open-loop resonator. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2002; 2(10):386-388.
- [27] Singh Y. K., Abdulla P., Chakrabarty A. Miniaturized bandpass filter using a dual-mode octagonal patch resonator. *Asia-Pacific Microwave Con.* 2009; 2511-2514.
- [28] Guan X., Yang F., Liu H., Zhu L. Compact and high-isolation diplexer using dual-mode stub-loaded resonators, but high isolation. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2014; 24(6):385-387.
- [29] Zhang X. Y., Chen J. X., Xue Q., Li S. M. Dual-band bandpass filters using stub-loaded resonators. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2007; 17(8):583-585.
- [30] Tu W. H. Compact double-mode cross-coupled microstrip bandpass filter with tunable transmission zeros. *IET. Microwaves, Antennas & Propagation.* 2008; 2(4):373-377.
- [31] Yang S., Lin L., Chen J., Deng K., Liang C. H. Design of compact dual-band bandpass filter using dual-mode stepped-impedance stub resonators. *Electronics Lett.* 2014; 50(8):611-613.
- [32] Tang W., Hong J. S. Varactor-tuned dual-mode bandpass filters. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2010; 58(8):2213-2219.
- [33] Hong J. S., Tang W. Dual-band filter based on non-degenerate dual-mode slow-wave open-loop

- resonators. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* 2009; 861-864.
- [34] Hong J. S., Shaman H. Dual-mode micro-strip open-loop resonators and filters. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2007; 55(8):1764-1770.
- [35] Lee J., Jung J., Kim K., Lim Y. Compact dual-mode interdigital-loop resonator and filter application. *IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS)*. 2010; 1-4.
- [36] Hua C., Chen C., Miao C., Wu W. Microstrip bandpass filters using dual-mode resonators with internal coupled lines. *Progress in electromagnetics research C*. 2011; 21:99-111.
- [37] Zhang X. S., Zhao Y. J., Deng H. W., Zhang L., Chen W. High selectivity dual-mode bandpass filter with source-loaded coupling. *Progress in Electromagnetics research Lett.* 2010; 18:187-194.
- [38] Zhou M., Tang X., Xiao F. Miniature Microstrip Bandpass Filter Using Resonator-Embedded Dual-Mode Resonator Based on Source-Load Coupling. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2010; 20:139-141.
- [39] Cheng X. K., Xu J., Zhang M. Miniature dual-mode bandpass filters using hexagonal open-loop resonators with E-shaped stubs loading. *Int. Symposium on Signals Systems and Electronics (ISSSE)*. 2010; 1: 1-3.
- [40] Athukorala L., Budimir D. Design of compact dual-mode microstrip filters. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2010; 58(11):2888 -2895.
- [41] Athukorala L., Budimir D. Compact dual-mode open loop microstrip resonators and filters. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2009; 19(11):698-700.
- [42] Deng H. W., Zhao Y. J., Zhang X. S., Chen W., Wang J. K. Compact and high selectivity dual-band dual mode microstrip BPF with single stepped impedance resonator. *Electronics Lett.* 2011; 47(5):1-3.
- [43] Wei C. L., Jia B. F., Zhu Z. J., Tang M.C. Hexagonal dual-mode filter with four transmission zeros. *Electronics Lett.* 2011; 47(3): 195-196.
- [44] Zhang S., Zhu L. Compact and high-selectivity microstrip bandpass filters using triple-/quad-mode stub-loaded resonators. *IEEE Micro-wave Wireless Compon. Lett.* 2011; 21(10):522-524.
- [45] Chen C. F., Shen T. M., Huang T. Y., Wu R. B. Design of compact quadruplexer based on the tri-mode net-type resonators. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2011; 21(10):534-536.
- [46] Chen C. F. Design of a compact micro-strip quint-band filter based on the tri-mode stub-loaded stepped-impedance resonators. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2012; 22(7):357-359.
- [47] Sovuthy C., Wen W. P. Microwave planar triple-mode resonator filter. *National Postgraduate Conference (NPC)*. 2011; 1-3.
- [48] Huang X., Feng Q., Xiang Q. Bandpass filter with tunable bandwidth using quadruple-mode stub-loaded resonator. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2012; 22(4):176 -178.
- [49] Lee K. C., Su H. T., Haldar M. K. Compact quadruple-mode resonator for wide-band bandpass filter design. *IET. Microwaves, Antennas & Propagation*. 2014; 8(3):67-72.
- [50] Deng H. W., Zhao Y. J., Zhang L., Zhang X. S., Zhao W. Quadruple-mode stub-loaded resonator and broadband BPF. *Progress in Electromagnetics research Lett.* 2010; 18:1-8.
- [51] Deng H. W., Zhao Y. J., Zhang L., Zhang X. S., Zhao W. Compact wideband bandpass filter with quadruple-mode stub-loaded resonator. *Progress in Electromagnetics research Lett.* 2010; 17:125-132.
- [52] Chiou Y. C., Lee Y. F., Kuo J. T., Chen C. C. Planar multimode resonator bandpass filters with sharp transition and wide stopband. *IEEE MTT-S*

Int. Microwave Symp. Dig. 2008; 439-442.

- [53] Borhani S. J., Honarvar M. A. A novel compact size UWB bandpass filter with sharp rejection skirt and wide upper-stopband based on multiple-mode resonator. Progress in Electromagnetics research C. 2013; 43:175-185.
- [54] Deng H. W., Zhao Y. J., Zhang L., Zhang X. S., Zhao W. Novel UWB BPF using quintuple-mode stub-loaded resonator. Progress in Electromagnetics research Lett. 2010; 14:181-187.
- [55] Deng H. W., Zhao Y. J., Zhang X. S., Zhang L., Gao S. P. Compact quintuple-mode UWB bandpass filter with good out-of-band rejection. Progress in Electromagnetics research Lett. 2010; 14:111-117.