

วงจรรองผ่านแถบแบนด์กว้างไมโครสตริปที่มีความคมความถี่ตัดสูงและ จำกัดความถี่ปลอมเทียมแบนด์กว้าง

Wideband Microstrip Bandpass Filters with High Selectivity and Wide Suppressed Spurious

วุฒินันท์ วามะกัน¹ สุรินทร์ อ่อนน้อย¹ สมสิน วาญขุนทด¹

Received: June, 2014; Accepted: September, 2014

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรรองผ่านแถบกว้างโหมคู้ โดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการปรับจูนความกว้างแถบผ่านด้วยสวิตช์ซึ่งสร้างสองโหมคู้ โดยใช้ตัวรบกวนแบบใหม่ด้วยการเจาะร่องเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นลูบซ้ำที่หลังตัวป้อนอินพุตและตัวป้อนเอาต์พุต และลดขนาดของเรโซเนเตอร์ด้วยวิธีการใส่สลับปลายเปิดอิมพีแดนซ์ต่ำที่กึ่งกลางภายในด้านทั้งสี่ของวงแหวนสี่เหลี่ยม ส่งผลให้เกิดค่าการสูญเสียจากการใส่แทรกประมาณ 0.35dB ที่ความถี่กลาง 4.125 GHz และค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า 10 dB ตลอดแถบความถี่ 3.13 GHz ถึง 5.2 GHz ซึ่งสามารถเพิ่มค่าความคมของความถี่ตัดและเพิ่มความสามารถการจำกัดความถี่ปลอมเทียมนอกช่วงผ่านแถบ ด้วยการนำเอาวงจรรีโซเนเตอร์สองตัวมาต่อคาสเคดกันแบบอินเตอร์ดิจิทัล ส่งผลให้เกิดค่าความคมความถี่ตัดสูงกว่า 360dB/GHz ค่าความถี่ปลอมเทียมนอกแถบผ่านต่ำกว่า 15 dB ได้ถึง 18 GHz และขนาดของเรโซเนเตอร์ค้นแบบลดลงประมาณ 48%

คำสำคัญ : วงจรรองผ่านแถบกว้างโหมคู้; รีโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยม; สวิตช์ร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นลูบซ้ำ; การต่อคาสเคดกันแบบอินเตอร์ดิจิทัล

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
E-mail : mali_ee@hotmail.com, surin.aon@gmail.com, somsin@rmuti.ac.th

Abstract

This paper presents a dual-mode wideband bandpass filter based on the square ring resonator with two tuning stubs used to control pass band. The degenerate dual mode with a novel perturbation utilizes meander loop perturbation rectangular slots at the input and output ports in which is able to reduce the size resonator. Then is put the open-stubs with low impedance at the middle within the four sides of the square ring resonator. As a result, the value of an insertion loss is 0.35 dB and return loss less than 10 dB at 3.13 GHz to 5.2 GHz frequency band. The proposed work can be increase high selectivity signal and improved the circuit to limited spurious frequencies outside the pass-band with two resonator interdigital Cascade. As a result, the value of high selectivity signal greater than 360 dB/GHz and spurious frequencies out side the pass band of less than 15 dB up to 18 GHz. The size of prototype has the reduction about 48%

Keywords: dual-mode wideband bandpass filter; square ring resonator; meander loop perturbation rectangular slot; interdigital cascade

บทนำ

ระบบสื่อสารแถบความกว้างยิ่ง (Ultra Wide Band: UWB) (Aiello R. and Rogerson G. D., 2003) ได้รับความสนใจนำมาใช้ในระบบสื่อสารไร้สาย เช่น ระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล บลูทูธ และระบบเรดาร์ เป็นต้น โดยย่านความถี่ใช้งานเริ่มที่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งแบ่งเป็นย่านความถี่ต่ำ 3.1 GHz ถึง 5.15 GHz และย่านความถี่สูง 5.85 GHz ถึง 10.6 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ซึ่งวงจรกรองผ่านแถบที่มีคุณสมบัติสองโหมด (Dual-mode wideband bandpass filter) ได้รับความนิยมสูง เพราะเป็นวงจรกรองผ่านแถบมีขนาดกะทัดรัด ค่าการใส่แทรกต่ำ มีค่าความคมความถี่ตัดสูงในช่วงความถี่ต่ำและช่วงความถี่สูง เพื่อให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยม (Square Ring Resonator) ที่ควบคุมแถบผ่านด้วยสลับคู่ภายนอก (Hsieh, L. H. and K. Chang, 2001) และกระตุ้นให้เกิดสองโหมดด้วยการใส่สลับสี่เหลี่ยมที่มุม 135 องศา ภายในวงแหวนผลของสองโหมดทำให้เกิดช่วงหยุดแถบความถี่ 2 ช่วงบริเวณใกล้เคียงแถบผ่าน งานวิจัย (Ahonnom, S and Akkaraekthalin, P., 2008) ที่มผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการสร้างโหมดคู่ด้วยการเจาะร่องพิดวงนำที่ตำแหน่งหลังตัวป้อนอินพุตและเอาต์พุตเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยความยาว ส่งผลให้เกิดค่าการสูญเสียใส่แทรกที่ต่ำกว่า 0.25 dB และได้ค่าความคมความถี่ตัดที่สูง งานวิจัยที่ (Görür, A., 2002; Konpang, J. et al., 2004) นำเสนอวิธีลดขนาดของวงจรเรโซเนเตอร์ด้วยการใส่สลับปลายเปิดแบบอิมพีแดนซ์ขั้นที่มุมทั้งสี่ของวงแหวนส่งผลให้เรโซเนเตอร์มีขนาดลดตั้งแต่ 36% ถึง 48% จากต้นแบบ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรกรองผ่านแถบกว้างย่านความถี่ต่ำ ระบบสื่อสารแถบความกว้างยิ่งแบบสองโหมด โดยใช้โครงสร้างเรโซเนเตอร์ต้นแบบจากงานวิจัย (Ahonnom, S and Akkaraekthalin, P., 2008) เพื่อทำการศึกษการสร้างตัวรบกวนแบบร่องสี่เหลี่ยม ผืนผ้าพับเป็นลูบซ้ำ (Meander Loop Perturbation Rectangular Slot) และนำเอาวงจรเรโซเนเตอร์ สองตัวมาต่อкасเคดกันแบบอินเตอร์ดิจิทัล (Interdigital Cascade) เพื่อเพิ่มความสามารถในการคัดกรองความถี่ผ่าน โดยเพิ่มค่าความคมความถี่ตัดให้กับวงจรกรองผ่านแถบกว้าง พร้อมทั้งจำกัดความถี่ปาลอมเทียมนอกช่วงผ่านแถบและทำการลดขนาดตัวเรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยมด้วยวิธีการไล่ระดับปลายเปิดอิมพีแดนซ์ต่ำเข้าที่จุดกึ่งกลางภายในแต่ละด้านของเรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยม

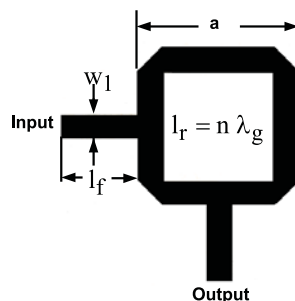
ทฤษฎีและการออกแบบ

1. การออกแบบวงจรกรองแถบกว้างโดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 4.125 GHz

ทางคณะผู้วิจัยได้ออกแบบวงจรกรองหยุดแถบ โดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยม ที่ความถี่กลาง 4.125 GHz ด้านความถี่ต่ำของการสื่อสารแถบความกว้างยิ่ง (Ultra Wide Band : UWB) และเลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์ไมโครเวฟของบริษัท GIL Technologies รุ่น GML 1000 ซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เท่ากับ 3.2 และมีค่าแทนเจนต์การสูญเสีย 0.004 ความหนาของฐานรอง 0.762 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดเรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยมได้จากสมการ

$$l_r = n\lambda_g \quad (1)$$

เมื่อ n คือ หมายเลขโหมด และ λ_g ความยาวสายนำสัญญาณ จากผลการคำนวณได้ขนาด โครงสร้างของวงจรเรโซเนเตอร์ในรูปที่ 1 มีค่าดังนี้ $l_r = 45.5191$ a = 15.03232 $w_1 = 1.82626$ $l_f = 11.3796$ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



รูปที่ 1 เรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยมโดยใช้ตัวป้อนสัญญาณเชื่อมต่อตรงในลักษณะดังกล่าว

2. วงจรกรองผ่านแถบกว้างโหมคคู่โดยใช้สลับแบบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าพับเป็นรูปซ้ำ

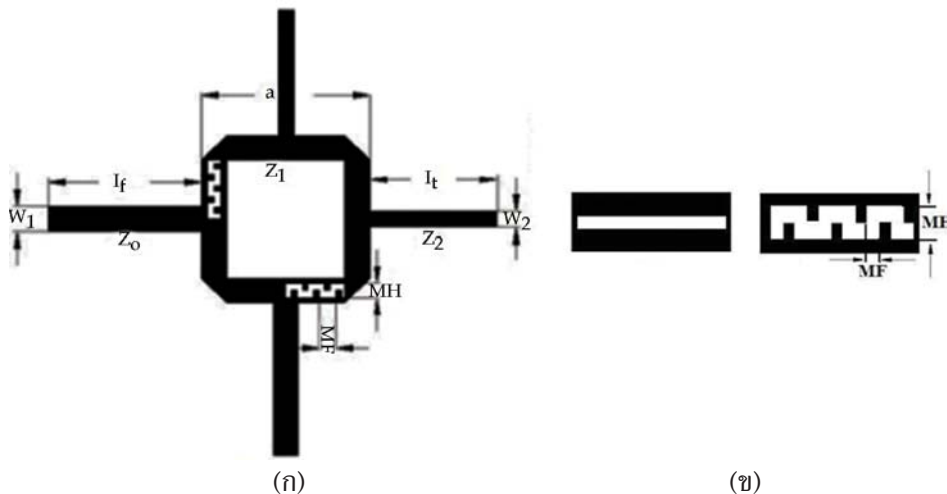
วงจรกรองผ่านแถบกว้างโหมคคู่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์แถบผ่านวงจรกรอง โดยการควบคุมอิมพีแดนซ์อัตราส่วนอิมพีแดนซ์คำนวณหาความถี่ตัดสามารถคำนวณได้จาก

$$\tan\left(\frac{\theta_p}{2}\right) = \pm \sqrt{\left(\frac{Z_1}{Z_2} + 1 \pm \sqrt{\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^2 + 2\frac{Z_1}{Z_2}}\right)} \quad (2)$$

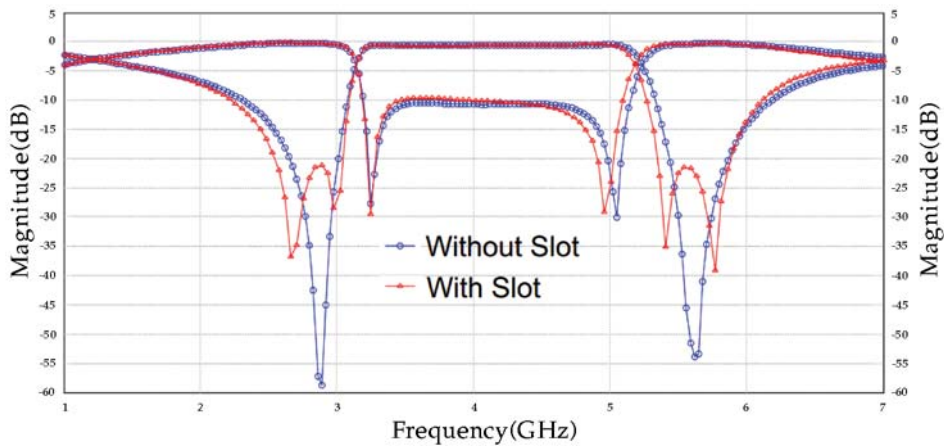
$$f_{l,u} = \frac{(\theta_p)(v)}{2\pi l} = \frac{(\theta_p)(f_c)}{\pi/2} \quad (3)$$

เมื่อ θ_p เป็นค่าความยาวทางไฟฟ้าที่ตำแหน่งการส่งผ่านศูนย์ (หน่วยเป็นเรเดียน) โดยใช้ค่าความยาวของสลับปลายเปิดคู่ที่ $\lambda_g/4$

ผลการคำนวณจากสมการที่ (3) ทำให้ได้ค่าขนาดสลับปลายเปิดคู่ที่ต่อภายนอกเรโซเนเตอร์เพื่อควบคุมแบนด์วิดท์แถบผ่านวงจรกรองดังแสดงในรูปที่ 2(ก) (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) มีค่าดังนี้ $w_2 = 1.82626$ $l_t = 11.3796$ และสามารถกระตุ้นให้เกิดโหมคคู่และเพิ่มค่าความคมความถี่ตัดสัญญาณด้วยการเจาะร่องเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพับเป็นรูปซ้ำที่หลังตัวป้อนอินพุตและตัวป้อนเอาต์พุต และจำลองการทำงาน เพื่อปรับค่าให้ได้ผลตอบสนองในย่านความถี่ต่ำของระบบสื่อสารแถบความกว้างยิ่งคือ 3.1 GHz ถึง 5 GHz โดยโปรแกรมจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า IE3D (IE3D Users' Manual, 2001) ผลการออกแบบได้ขนาดโครงสร้างวงจร (ในหน่วยมิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) ดังนี้ $l_r = 60.129$ $a = 15.03232$ $w_1 = 1.82626$ $l_f = 10.4315$ $w_2 = 1.0$ $l_t = 11.43$ $l_s = 5.68989$ $M_F = 0.4$ และ $M_H = 0.8$



รูปที่ 2 วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโดยใช้ตัวรวมแบบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าพับเป็นรูปซ้ำ (ก) โครงสร้างวงจร (ข) พารามิเตอร์ใช้ศึกษาคุณสมบัติเพื่อสร้างสลับแบบร่อง (ค) ผลเปรียบเทียบระหว่างการใส่สลับกับไม่ใส่



(ค)

รูปที่ 2 วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโดยใช้ตัวรบกวนแบบร่องพับรูปซำ (ก) โครงสร้างวงจร (ข) พารามิเตอร์ใช้ศึกษาคุณสมบัติเพื่อสร้างสลับแบบร่อง (ค) ผลเปรียบเทียบระหว่างการใส่สลับกับไมใส่ (ต่อ)

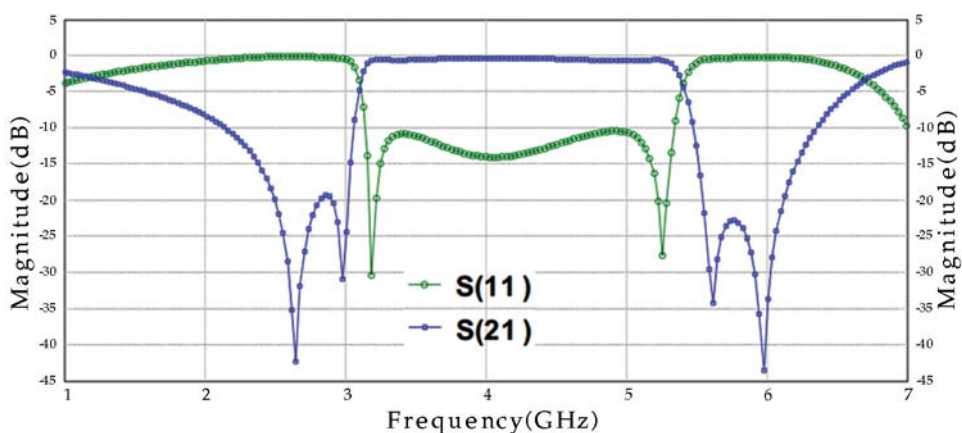
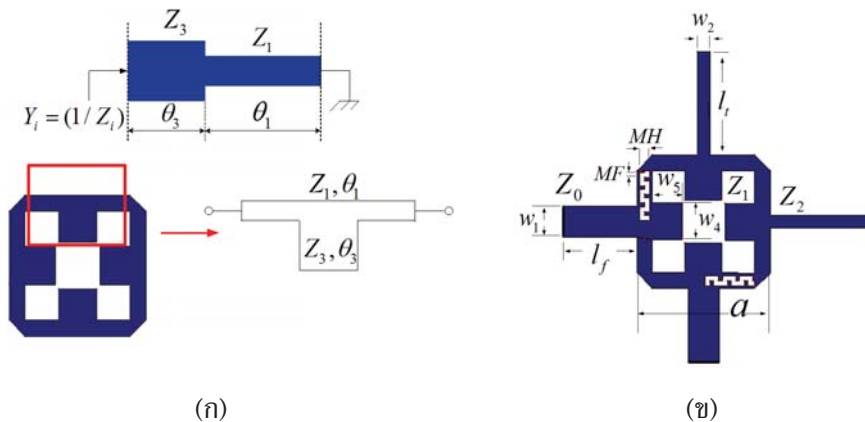
ผลจำลองการทำงานวงจรแสดงในรูปที่ 2 (ค) ได้แบนด์วิดท์ช่วงแถบผ่านอยู่ที่ 3.1 GHz ถึง 5.2 GHz มีค่าแบนด์วิดท์การแตกตัวจากความถี่กลางประมาณ 51% มีค่าสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า 10 dB และค่าสูญเสียใส่แทรก (S_{21}) โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.245 dB ซึ่งเกิดการส่งผ่านศูนย์ความถี่แรกอยู่ที่ 3.0 GHz ส่งผลให้เกิดค่าความคมความถี่ตัดช่วงความถี่ต่ำที่มีค่าประมาณ 200 dB/GHz และการส่งผ่านศูนย์ตำแหน่งที่สองอยู่ที่ 5.4 GHz ส่งผลให้เกิดค่าความคมความถี่ตัดช่วงความถี่สูงที่มีค่าประมาณ 175 dB/GHz มีแบนด์วิดท์ช่วงหยุดแถบสัญญาณเกิดใกล้ๆ กับช่วงแถบผ่านทั้งสองข้างเฉลี่ยอยู่ที่ 300 MHz

3. การลดขนาดของเรโซเนเตอร์โดยใช้สลับปลายเปิดอิมพีแดนซ์ต่ำ

เป็นการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบโหมคคู่ โดยอาศัยการใส่สลับปลายเปิดแบบอิมพีแดนซ์ต่ำ (Z_3) เข้าที่กึ่งกลางภายในของสายนำสัญญาณ (Z_1) หรือแต่ละด้านทั้งสี่ของวงแหวนสี่เหลี่ยม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวทางไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์ และทำให้เรโซเนเตอร์มีขนาดกะทัดรัดมากขึ้น ผลของการต่อสลับปลายเปิดอิมพีแดนซ์ต่ำที่ค่า $Z_3=35.72 \Omega$, $\theta_3=19.36^\circ$ เข้ากับสายนำสัญญาณที่ค่า $Z_1=50 \Omega$, $\theta_1=90^\circ$ ส่งผลให้สายนำสัญญาณ (Z_1, θ_1) มีขนาดลดลงและทำให้ขนาดพื้นที่ของเรโซเนเตอร์ลดลงจาก 15.03232×15.03232 ตารางมิลลิเมตร เป็น 10.85×10.85 ตารางมิลลิเมตร หรือลดลงจากต้นแบบประมาณ 48% ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) ซึ่งสามารถคำนวณหาอิมพีแดนซ์รวมได้จากสมการ

$$Z_i = jZ_3 \frac{Z_1 \tan \theta_1 + Z_3 \tan \theta_3}{Z_3 - Z_1 \tan \theta_1 \tan \theta_3}, Z_L = jZ_1 \tan \theta_1 \quad (4)$$

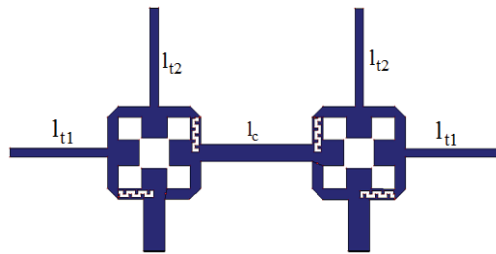
การออกแบบโครงสร้างของวงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างที่มีขนาดกะทัดรัด โดยใช้ตัวรวมแบบร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าพับเป็นรูปซ้ำร่วมกับสลับปลายเปิดค่าอิมพีแดนซ์ต่ำใส่เข้าที่กึ่งกลางด้านในทั้งสี่ด้านผ่านโปรแกรม IE3D (IE3D Users' Manual, 2001) ผลจากการออกแบบได้ขนาดโครงสร้างวงจร (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 3(ข) มีค่าดังนี้ $l_r = 43.4$ $a = 10.85$ $w_1 = 3$ $l_f = 6$ $w_2 = 1$ $l_t = 11.4$ $l_s = 4.165$ $w_4 = 3$ $w_5 = 2.4$ $M_H = 0.8$ และ $M_F = 0.4$ ผลจำลองการทำงานของวงจรแสดงในรูปที่ 3 (ค) ได้แบนด์วิดท์ช่วงแถบผ่านอยู่ที่ 3.1 GHz ถึง 5.2 GHz มีค่าแบนด์วิดท์การแตกตัวจากความถี่กลางประมาณ 51% มีค่าสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า 10 dB และค่าสูญเสียใส่แทรก (S_{21}) โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.35 dB ซึ่งเกิดการส่งผ่านศูนย์ความถี่แรกอยู่ที่ 3.0 GHz ส่งผลให้เกิดค่าความคมความถี่ตัดช่วงความถี่ต่ำมีค่าประมาณ 220 dB/GHz และการส่งผ่านศูนย์ตำแหน่งที่สองอยู่ที่ 5.4 GHz ส่งผลให้เกิดค่าความคมความถี่ตัดช่วงความถี่สูงมีค่าประมาณ 200 dB/GHz มีแบนด์วิดท์ช่วงหยุดแถบสัญญาณเกิดใกล้ๆ กับช่วงแถบผ่านทั้งสองข้างเฉลี่ยอยู่ที่ 300 MHz



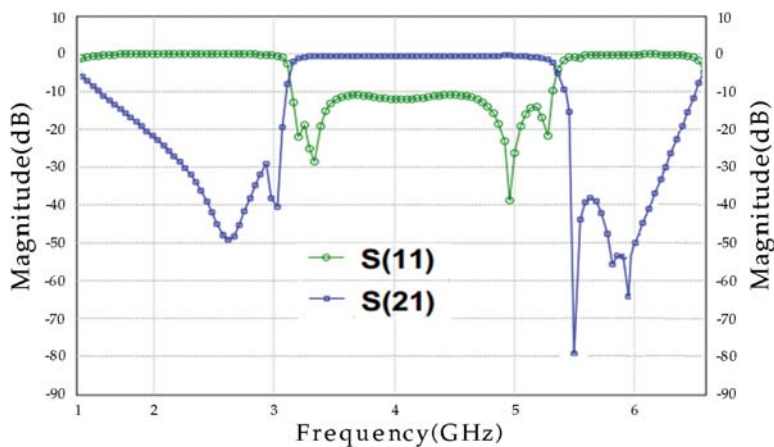
รูปที่ 3 วงจรกรองผ่านแถบโทมคู้ใช้สลับปลายเปิดอิมพีแดนซ์ต่ำ (ก) แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์การลดขนาด (ข) ขนาดโครงสร้างวงจรกรองผ่านแถบ (ค) ผลตอบสนองความถี่วงจรกรองผ่านแถบ

4. การเพิ่มค่าความคมของความถี่ตัดสัญญาณและจำกัดการเกิดสัญญาณปลอมเทียมโดยการต่อแบบคาสเคด

การออกแบบทำได้โดยการนำวงจรเรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยม 2 ตัว มาทำการต่อคาสเคดกัน ดังแสดงในภาพที่ 4(ก) หาค่าตอบสนองของวงจรโดยการปรับค่า l_{t1}, l_{t2} และค่า l_c ผ่านโปรแกรม IE3D (IE3D Users' Manual, 2001) เพื่อหาค่าผลตอบสนองของวงจรที่เหมาะสม ซึ่งมีค่า $l_{t1}=l_{t2}= 11.4$ มม. และ $l_c=13$ มม. ขณะที่ขนาดตัวป้อนแบบต่อตรงนั้น มีค่า $l_f=6$ มม. และ $w_1=2.5$ มม. ผลตอบสนองสัญญาณความถี่จากการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม IE3D (IE3D Users' Manual, 2001) แสดงในภาพที่ 4(ข) ผลปรากฏว่าการต่อแบบคาสเคดทำให้มีค่าสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) ต่ำกว่า 10 dB และค่าสูญเสียใส่แทรก (S_{21}) โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.35 dB มีค่าแบนด์วิดท์การแตกตัวจากความถี่กลางประมาณ 51% ซึ่งเกิดการส่งผ่านศูนย์ความถี่แรกอยู่ที่ 3.0 GHz ส่งผลให้เกิดค่าความคมความถี่ตัดช่วงความถี่ต่ำมีค่าประมาณ 360 dB/GHz และการส่งผ่านศูนย์ตำแหน่งที่สองอยู่ที่ 5.4 GHz ส่งผลให้เกิดค่าความคมความถี่ตัดช่วงความถี่สูงมีค่าประมาณ 420 dB/GHz มีแบนด์วิดท์ช่วงหยุดแถบสัญญาณเกิดใกล้ช่วงแถบผ่านทั้งสองข้างเฉลี่ยอยู่ที่ 350 MHz



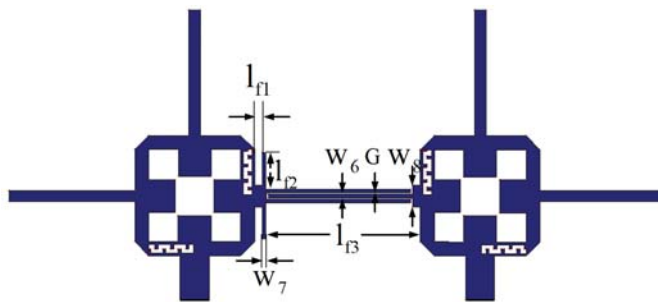
(ก)



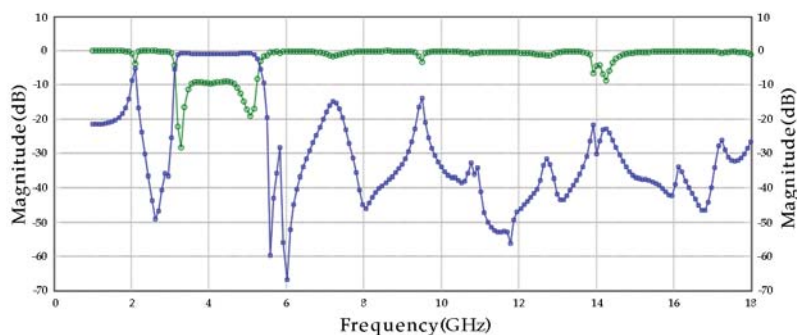
(ข)

รูปที่ 4 วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยมสองตัวต่อคาสเคดที่มีการปรับสัดับคู่ภายนอก (ก) โครงสร้างวงจรเรโซเนเตอร์สองตัวต่อคาสเคด (ข) ผลตอบสนองความถี่วงจรกรองผ่านแถบความถี่

และผลจำลองค่าตอบสนองทางความถี่ในรูปที่ 2(ค) พบว่าจะเกิดความถี่ปลอมเทียมที่สองเท่าของความถี่กลาง ($2f_0$) และเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารแบบไร้สาย จึงทำให้มีการพัฒนาเพื่อจำกัดสัญญาณความถี่ที่สูงกว่าให้มีความถี่ต่ำ ซึ่งเป็นการจำกัดการเกิดสัญญาณปลอมเทียม โดยการเปลี่ยนการต่อкасцепกันเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล ผลการออกแบบได้ขนาดโครงสร้างวงจรกรองผ่านแถบกว้าง (ในหน่วยมิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) ดังนี้ $l_{f1}=0.7$ $l_{f2}=2.9$ $l_{f3}=13.3$ $w_6=0.4$ $w_7=0.3$ $w_8=2$ และ $G=0.1$ ผลจำลองตอบสนองความถี่ในรูปที่ 5(ข) พบว่าการต่อкасцепกันเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล ช่วยลดทอนสัญญาณย่านความถี่ต่ำ จำกัดการเกิดความถี่ปลอมเทียมที่ $2f_0$ และลดทอนสัญญาณที่ไม่ต้องการถึง $4f_0$



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 วงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยมสองตัวต่อкасцепกันแบบอินเตอร์ดิจิตัล (ก) โครงสร้างวงจรเรโซเนเตอร์สองตัวต่อкасцепกันแบบอินเตอร์ดิจิตัล (ข) ผลตอบสนองความถี่วงจรถูกกรองผ่านแถบความถี่

สรุป

วงจรถูกกรองความถี่แถบกว้างโดยใช้โครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการเจาะร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นรูปร่าง ใช้เป็นตัวรวมกวนสนามกระแสไฟฟ้าบนโครงสร้างเรโซเนเตอร์ เพื่อสร้างคุณสมบัติสองโหมด ส่งผลให้เกิดแบนด์วิดท์ช่วงหยุดแถบแคบๆ ใกล้กับแถบผ่านวงจรถูกกรองทั้งสองด้าน ซึ่งช่วยเพิ่ม

ค่าความคมความถี่ต่ำที่ช่วงความถี่ต่ำและช่วงความถี่สูง มีค่าสูงกว่า 360 dB/GHz และปรับปรุงประสิทธิภาพในการลดทอนขนาดสัญญาณที่ไม่ต้องการนอกแถบผ่านในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูง โดยการนำวงจรเรโซเนเตอร์วงแหวนสี่เหลี่ยม 2 ตัว มาทำการต่อคาสเคดกันแบบอินเตอร์ดิจิตัล และเมื่อนำสลับปลายเปิดอิมพีแดนซ์ต่ำต่อเข้าที่จุดกึ่งกลางในแต่ละด้านของเรโซเนเตอร์ วงแหวนสี่เหลี่ยมสามารถลดขนาดวงจรกรองผ่านแถบกว้างต้นแบบได้ถึง 48% ทำให้มีคุณสมบัตินำไปประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่ต่ำของระบบสื่อสารไร้สายแถบความกว้างยิ่งได้

บรรณานุกรม

- Aiello R. and Rogerson G. D. (2003). Ultra-wideband wireless systems. *IEEE Microwave Magazine*. Vol. 4. No. 2. pp. 36-47
- Ahonnom, S and Akkaraekthalin, P. (2008). Wideband dual mode microstrip bandpass filters using a new perturbation with notch rectangular slots. In *Proceeding of ECTI-CON 2008*. pp. 269-272
- Göörür, A. (2002). A novel dual-mode bandpass filter with wide stopband using the properties of microstrip open-loop resonator. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. Vol. 12. No. 10. pp. 386-388
- Hsieh, L. H. and K. Chang. (2001). Compact, Low insertion loss, sharp rejection wideband bandpass filters using dual-mode ring resonators with tuning stubs. *Electronics Letters*. Vol. 37. No. 22. pp. 1345-1347
- IE3D Users' Manual, Release 8. (2001). *Zeland Software. Inc., Fremont. CA.*
- Konpang, J. Namahoot, A. and Akkaraekthalin, P. (2004). A wideband bandpass filter using properties of microstrip open loop resonators with outer tuning stubs. In *Proceeding of TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference*. Vol. 3. pp. 624-627