

วงจรรองความถี่ไบควอดเรติกหลายฟังก์ชันในโหมดกระแสที่ปรับได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ใช้ CCTA เป็นวงจรรพื้นฐาน

An Electronically Tunable Current-Mode Multifunction Biquadratic Filter Based on CCTAs

นิติพัฒน์ พิสุทธิพงษ์¹ และ มงคล หวังสถิตย์วงศ์²

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000¹

ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800²

E-mail: nitiphat.p@gmail.com¹ และ mww@kmutnb.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ วงจรรองความถี่ไบควอดเรติกหลายฟังก์ชัน ในโหมดกระแส แบบสามอินพุตหนึ่งเอาต์พุตรูปแบบใหม่ โดยใช้อุปกรณ์วงจรรายพานกระแสส่งผ่านความนำ (CCTA) เป็นอุปกรณ์แอคทีฟพื้นฐาน วงจรที่นำเสนอมีข้อดีหลายประการ คือ วงจรมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนประกอบไปด้วย CCTA สองตัว และตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์สองตัว สามารถกำหนดฟังก์ชันกรองสัญญาณไบควอดเรติกได้ครบทุกฟังก์ชัน โดยไม่จำเป็นต้องใช้เงื่อนไขค่าอุปกรณ์ในวงจรที่ต้องมีค่าเหมาะสมกัน สามารถปรับค่าความถี่โพล (Pole frequency, ω_0) และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ (Quality factor, Q_0) ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง มีค่าความไวของอุปกรณ์พาสซีฟและแอคทีฟต่ำและวงจรมีความง่าย ทฤษฎีและคุณสมบัติของวงจรที่นำเสนอ ยืนยันได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice พบว่า วงจรทำงานได้สอดคล้องตามที่คาดการณ์ไว้ในทางทฤษฎี

Abstract

This article presents the new current-mode three-input single-output universal biquad filter employing current conveyor transconductance amplifiers (CCTA) as active elements. The features of the proposed circuit include: the circuit topologies are very simple consisting of two CCTAs and two grounded capacitors, the proposed circuit can offer all of standard function of the biquad filter, and no need to use the same equipment conditions. In addition, the pole frequency (ω_0) and quality factor (Q_0) can be adjusted through electronic controllability, high input impedance, low active and passive sensitivities, and simple circuitry. The PSpice simulation results are depicted, the given results agree well with the theoretical anticipation.

1. บทนำ

งานด้านวิศวกรรมไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่สำคัญ และมีการนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น ในระบบสื่อสาร ระบบเครื่องมือวัด และระบบประมวลผลสัญญาณ [1-2] เป็นต้น สมการไบควอดเรติก ถือเป็นหลักการที่นิยมใช้นำมาสังเคราะห์เป็นวงจรกรองความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถสร้างวงจรกรองความถี่ได้หลายรูปแบบ [3-5] โดยเฉพาะวงจรกรองความถี่แบบหลายฟังก์ชัน (Multifunction biquadratic filter) ซึ่งเป็นที่นิยมและมีข้อดีกว่าวงจรกรองความถี่ทั่วไปคือสามารถทำได้หลายฟังก์ชันโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวงจร

ความต้องการในการที่จะลดไฟเลี้ยงที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้รับความสนใจในทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากความต้องการที่จะนำมาใช้ในอุปกรณ์พกพา หรืออุปกรณ์ในระบบสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งต้องใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน เทคนิคการออกแบบวงจรในโหมดกระแส (Current-mode) เป็นอีกทางหนึ่งที่สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าว เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ดังนี้ คือ มีช่วงพิสัยพลวัต และความเป็นเชิงเส้นดี มีช่วงปฏิบัติงานกว้าง และใช้จ่ายพลังงานน้อยเมื่อเทียบกับวงจรที่ทำงานในโหมดแรงดัน [6,7] ที่ผ่านมา ได้มีผู้นำเสนองจรกรองความถี่หลายฟังก์ชันแบบต่างๆ แต่โดยโดยทั่วไปแล้วยังพบว่ายังมีข้อจำกัดอยู่ เช่น ใช้อุปกรณ์พาสซีฟจำนวนมาก อีกทั้งต้องการความสมพียง (Match) ของอุปกรณ์ [8,9] บางวงจรยังใช้ตัวต้านทานต่อภายนอกและใช้ตัวเก็บประจุแบบลอย ซึ่งไม่เหมาะในการนำไปสร้างเป็น

วงจรรวม [10,11] วงจรที่นำเสนอใน [12,13] มีข้อดีคือไม่ต้องการความสมพียงของอุปกรณ์ สามารถควบคุมค่าความถี่โพลและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์เป็นอิสระจากกัน แต่อย่างไรก็ตามวงจรมีแหล่งจ่ายกำลังสูงไม่เหมาะกับการนำไปออกแบบใช้งานกับอุปกรณ์ไร้สายซึ่งต้องการใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน

วงจรสายพานกระแสส่งผ่านความนำ (Current conveyor transconductance amplifier, CCTA) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้มีผู้นำเสนอเมื่อ ปี ค.ศ. 2005 ซึ่งสามารถทำงานได้ในโหมดกระแส เหมาะที่จะนำไปออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก [14] โดย CCTA สามารถทำงานได้ ทั้งโหมดแรงดันและโหมดกระแส นอกจากนี้ยังมีข้อดีอีกหลายประการเช่น อัตราสแควร์สูง แบนด์วิธกว้าง รวมทั้งโครงสร้างวงจรที่ออกแบบโดย CCTA จะมีลักษณะไม่ซับซ้อน

ในบทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเสนองจรกรองความถี่ไบควอดเรติกหลายฟังก์ชัน แบบสามอินพุตหนึ่งเอาต์พุต ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนโดยใช้ CCTA จำนวนสองตัว ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ อีกสองตัว ซึ่งวงจรที่นำเสนอ สามารถกำหนดฟังก์ชันกรองความถี่ ไบควอดเรติกได้ครบทุกฟังก์ชัน โดยไม่จำเป็นต้องใช้เงื่อนไขค่าอุปกรณ์ในวงจรที่ต้องมีค่าสมพียงกัน สามารถปรับค่าความถี่โพล และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และใช้แหล่งจ่ายพลังงานต่ำ ผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSpice สอดคล้องกับที่ได้คาดการณ์ไว้ในทางทฤษฎี

2. หลักการทำงานของวงจร

2.1 วงจรสายพานกระแสส่งผ่านความนำ(CCTA)

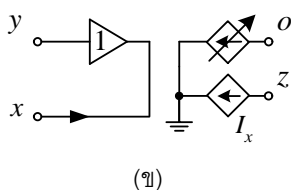
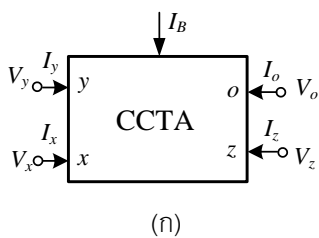
เนื่องจากวงจรที่นำเสนอนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก คือ CCTA ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของ CCTA พอสังเขป ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเมตริกซ์ ดังสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm g_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ V_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

ซึ่งค่าความนำถ่ายโอน (g_m) สามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบแอส (I_B) ดังนี้

$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} \quad (2)$$

เมื่อ V_T คือแรงดันที่เกิดจากอุณหภูมิ (Thermal Voltage) ในทรานซิสเตอร์ หาได้จาก $V_T = \frac{kT}{q}$ เมื่อ k หมายถึง ค่าคงที่ของโบลแมน (Boltzmann's constant) และ T เป็นค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์มีหน่วยเป็นเคลวิน (Kelvin) และ q คือประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมป์ ซึ่งโดยปกติจะมีค่าประมาณเท่ากันสำหรับทรานซิสเตอร์ทุกตัว ที่อุณหภูมิ 27°C จะมีค่าประมาณ 26mV

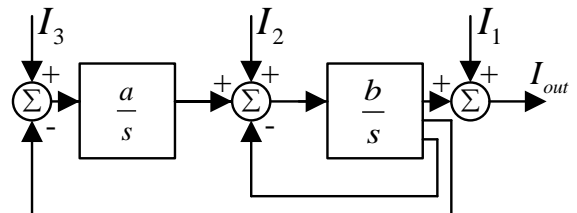


รูปที่ 1 CCTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรเทียบเท่า

สัญลักษณ์และวงจรถียบเท่าของ CCTA แสดงดังรูปที่ 1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ที่ขั้วทางเข้าที่ขา y จะมีอินพุทอิมพีแดนซ์สูงและเป็นวงจรถักชนแรงดันแรงดัน (Buffer) สามารถรับสัญญาณที่เป็นแรงดันได้ และที่ขา x จะมีอินพุทอิมพีแดนซ์ต่ำกระแสสามารถไหลผ่านได้ส่วนที่ขั้วทางออกขา z จะสะท้อนกระแสมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านขา x ส่วนที่ขา o จะให้เอาต์พุตเป็นกระแสโดยส่งผ่านความนำ (g_m) แรงดันที่ตกคร่อมที่ขา z (V_z)

2.2 วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอ

จากรูปที่ 2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองความถี่หลายฟังก์ชันที่นำเสนอ โครงสร้างของวงจร เป็นรูปแบบของอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย สามารถเขียนสมการไปควบคุมได้ดังสมการที่ (3)



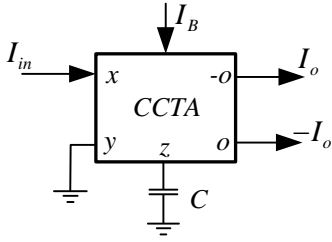
รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอ

$$I_{out} = \frac{(s^2 + sb + ab)I_1 + sbI_2 + abI_3}{s^2 + sb + ab} \quad (3)$$

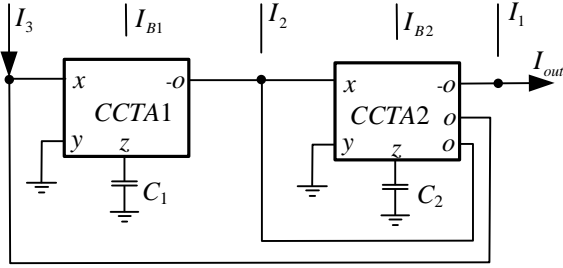
จากสมการที่ (3) พบว่าสามารถหาค่าของความถี่โพลและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ ดังสมการที่ (4)

$$\omega_o = \sqrt{ab}, \quad Q_o = \frac{\sqrt{ab}}{b} \quad (4)$$

จากบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2 สามารถสังเคราะห์วงจรโดยใช้อุปกรณ์ CCTA โดยวงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย แสดงดังรูปที่ 3 และสร้างเป็นวงจรกรองความถี่ที่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสียใช้ CCTA



รูปที่ 4 วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอสอน

จากวงจรอินทิเกรเตอร์แบบบวกและลบที่ใช้ CCTA ดังรูปที่ 3 สามารถเขียนสมการถ่ายโอนได้ดังสมการที่ (5)

$$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{g_m}{sC} \quad (5)$$

เมื่อ $g_m = \frac{I_B}{2V_T}$ และจากวงจรรูปที่ 4 เขียนสมการคุณลักษณะของวงจรได้ดังนี้

$$I_{out} = \frac{\left(s^2 + s \frac{g_{m2}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} \right) I_1 + s \frac{g_{m2}}{C_2} I_2 + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} I_3}{s^2 + s \frac{g_{m2}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) กำหนดให้ $g_{m1} = \frac{I_{B1}}{2V_T}$ เป็นค่าความนำถ่ายโอนของอุปกรณ์ CCTA1 และ $g_{m2} = \frac{I_{B2}}{2V_T}$ เป็นค่าความนำถ่ายโอนของ CCTA2

พิจารณาสมการที่ (6) สามารถกำหนดฟังก์ชันกรองความถี่แบบต่างๆได้ดังนี้

เมื่อ $I_{in} = I_3$ และ $I_1 = I_2 = 0$ เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (LPF) โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}{s^2 + s \frac{g_{m2}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (7)$$

เมื่อ $I_{in} = I_1 = -I_2 = -I_3$ เป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (HPF) โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{s^2}{s^2 + s \frac{g_{m2}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (8)$$

เมื่อ $I_{in} = I_2$ และ $I_1 = I_3 = 0$ เป็นวงจรกรองความถี่แถบผ่าน (BPF) โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{s \frac{g_{m2}}{C_2}}{s^2 + s \frac{g_{m2}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (9)$$

เมื่อ $I_{in} = I_1 = -I_2$ และ $I_3 = 0$ เป็นวงจรกรองความถี่แถบไม่ผ่าน (BRF) โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{s^2 + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}{s^2 + s \frac{g_{m2}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (10)$$

เมื่อ $I_{in} = I_1 = -2I_2$ และ $I_3 = 0$ เป็นวงจรกรองความถี่ผ่านหมด (APF) โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{s^2 - s \frac{g_{m2}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}{s^2 + s \frac{g_{m2}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (11)$$

จากสมการที่ (6)–(10) ได้สมการของ ω_0 และ Q_0 แทนค่า $g_{m1} = \frac{I_{B1}}{2V_T}$ และ $g_{m2} = \frac{I_{B2}}{2V_T}$ โดย V_T เป็นค่าคงที่ของศักดาความร้อนของทรานซิสเตอร์ ซึ่งทรานซิสเตอร์ทุกตัวจะมีค่าประมาณเท่ากัน คือ 26mV ที่อุณหภูมิ 27°C

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} = \frac{1}{2V_T} \sqrt{\frac{I_{B1}I_{B2}}{C_1C_2}} \quad (12)$$

$$\text{และ } Q_0 = \sqrt{\frac{g_{m1}C_2}{g_{m2}C_1}} = \sqrt{\frac{I_{B1}C_2}{I_{B2}C_1}} \quad (13)$$

จากสมการที่ (12) และ (13) พบว่าสามารถปรับค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ และค่าความถี่ตัดได้จากกระแสไบแอส I_{B1} และ I_{B2} หรือตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 สำหรับ แบนด์วิธ (Bandwidth) หาได้จาก

$$BW = \frac{\omega_0}{Q_0} = \frac{g_{m2}}{C_2} = \frac{I_{B2}}{2V_T C_2} \quad (14)$$

จากสมการที่ (14) สามารถปรับแบนด์วิธได้ด้วยกระแสไบแอส I_{B2} อย่างเป็นเชิงเส้น

2.3 ความไวของวงจร (Sensitivity)

ความไวของความถี่ตัดของวงจรหาได้จาก

$$\text{สมการ } S_x^p = \frac{x}{p} \frac{\partial p}{\partial x} \text{ ดังนี้ [15]}$$

$$S_{I_{B1}}^{\omega_0} = S_{I_{B2}}^{\omega_0} = \frac{1}{2}, \quad S_{C_1}^{\omega_0} = S_{C_2}^{\omega_0} = -\frac{1}{2} \text{ และ } S_{V_T}^{\omega_0} = -1 \quad (15)$$

ในทำนองเดียวกันที่ความไวของค่าควอลิตี้แฟกเตอร์คือ

$$S_{I_{B1}}^{Q_0} = S_{C_2}^{Q_0} = \frac{1}{2} \text{ และ } S_{C_1}^{Q_0} = S_{I_{B2}}^{Q_0} = -\frac{1}{2} \quad (16)$$

ซึ่งจะเห็นว่าความไวของวงจรมีค่าต่ำ วงจรมีผลกระทบน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่เบี่ยงเบนไปจากอุดมคติ

2.4 การวิเคราะห์ห้วงจรในกรณีที่ไม่เป็นอุดมคติ

ในกรณีที่ CCTA ที่ใช้ในวงจรเกิดความไม่เป็นอุดมคติ จะมีลักษณะสมบัติเปลี่ยนแปลงเป็น

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm \gamma g_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ V_o \end{bmatrix} \quad (17)$$

เมื่อ α , β และ γ เป็นค่าอัตราส่งผ่านแรงดันและกระแส ที่เบี่ยงเบนไปจาก 1 ซึ่งเกิดจาก

ความไม่เป็นอุดมคติของทรานซิสเตอร์ภายในของ CCTA สำหรับวงจรที่นำเสนอกำหนดให้ α_1 , β_1 และ γ_1 เป็นอัตราการเบี่ยงเบนที่เกิดจาก CCTA1 ส่วน α_2 , β_2 และ γ_2 เป็นอัตราการเบี่ยงเบนที่เกิดจาก CCTA2 เมื่อพิจารณาความผิดพลาดนี้แล้ว สามารถหาสมการคุณลักษณะใหม่ของวงจรได้ดังนี้

$$I_{out} = \frac{\left(s^2 + s \frac{\alpha_2 \gamma_2 g_{m2}}{C_2} + \frac{\alpha_1 \gamma_1 \alpha_2 \gamma_2 g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right) I_1}{s^2 + s \frac{\alpha_2 \gamma_2 g_{m2}}{C_2} + \frac{\alpha_1 \gamma_1 \alpha_2 \gamma_2 g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} + \frac{s \frac{\alpha_2 \gamma_2 g_{m2}}{C_2} I_2}{s^2 + s \frac{\alpha_2 \gamma_2 g_{m2}}{C_2} + \frac{\alpha_1 \gamma_1 \alpha_2 \gamma_2 g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} + \frac{\frac{\alpha_1 \gamma_1 \alpha_2 \gamma_2 g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} I_3}{s^2 + s \frac{\alpha_2 \gamma_2 g_{m2}}{C_2} + \frac{\alpha_1 \gamma_1 \alpha_2 \gamma_2 g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \quad (18)$$

ในกรณีที่ไม่เป็นอุดมคติ ค่าความถี่โพลและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์สามารถแสดงได้เป็น

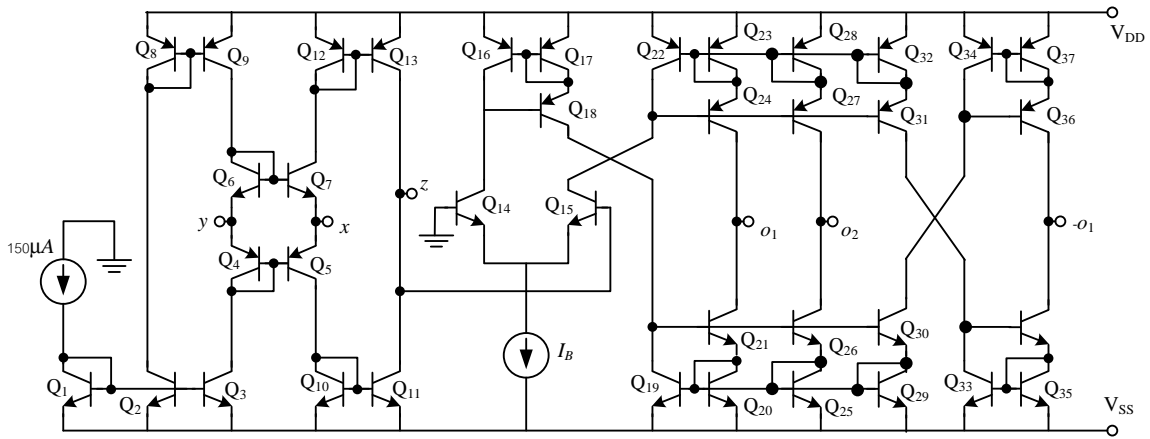
$$\omega_0 = \frac{1}{2V_T} \sqrt{\frac{\alpha_1 \gamma_1 \alpha_2 \gamma_2 I_{B1} I_{B2}}{C_1 C_2}} \quad (19)$$

$$\text{และ } Q_0 = \sqrt{\frac{\alpha_1 \gamma_1 I_{B1} C_2}{\alpha_2 \gamma_2 I_{B2} C_1}} \quad (20)$$

สำหรับแบนด์วิธจะได้

$$BW = \frac{\omega_0}{Q_0} = \frac{\alpha_2 \gamma_2 g_{m2}}{C_2} = \frac{\alpha_2 \gamma_2 I_{B2}}{2V_T C_2} \quad (21)$$

ในทางปฏิบัตินั้น พารามิเตอร์ α_1 , α_2 , β_1 , β_2 และ γ_1 , γ_2 เป็นผลมาจากค่าความจุ และความต้านทานแฝงในตัว CCTA ซึ่งจะมีผลต่อการทำงานของวงจร เมื่อความถี่และอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบจากพารามิเตอร์เหล่านี้ ควรจะออกแบบ CCTA ให้ใกล้เคียงอุดมคติมากที่สุด

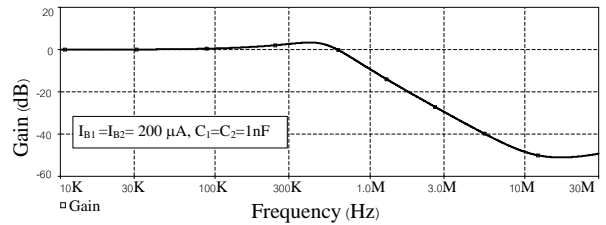


รูปที่ 5 โครงสร้างภายในของ CCTA

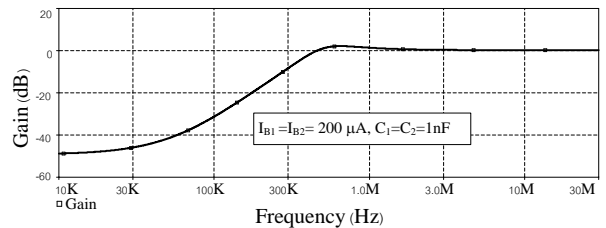
3. ผลการจำลองการทำงาน

เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอโดยจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice และโครงสร้างของ CCTA ใช้ทรานซิสเตอร์ อาร์เรย์ ALA400 ของ AT&T เบอร์ NR200 (NPN) และ PR200N (PNP) [16] แสดงดังรูปที่ 5 กำหนดกระแสไบแอสวงจรกันชนแรงดันที่ขา y มีค่าเท่ากับ $100\mu\text{A}$ กำหนดให้วงจรทำงานที่แรงดัน $\pm 2.5\text{V}$ พบว่า วงจรมีอัตราใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 10.3mW

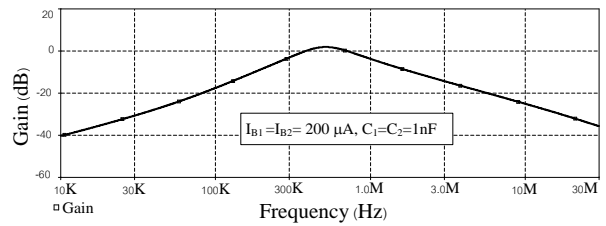
ผลตอบสนองทางขนาดของฟังก์ชันต่างๆ ของวงจรแสดงดัง รูปที่ 6 (ก) ถึง (ง) คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass), วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-pass), วงจรกรองความถี่แถบผ่าน (Band-pass), และวงจรกรองความถี่แถบไม่ผ่าน (Band-reject) ตามลำดับ โดยปรับ $I_{B1} = I_{B2} = 200\mu\text{A}$ และให้ $C_1 = C_2 = 1\text{nF}$ พบว่ามีค่าความถี่ตอบสนองของวงจรเท่ากับ 515.23kHz โดยจากสมการที่ (12) สามารถคำนวณได้ 612.13kHz (มีค่าเบี่ยงเบนไป 15.8%)



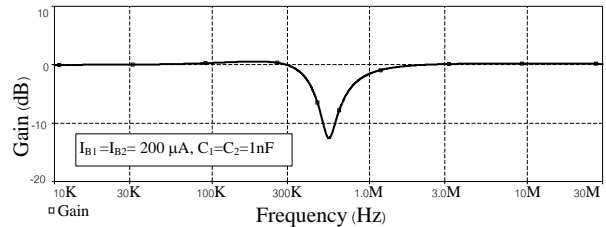
(ก)



(ข)



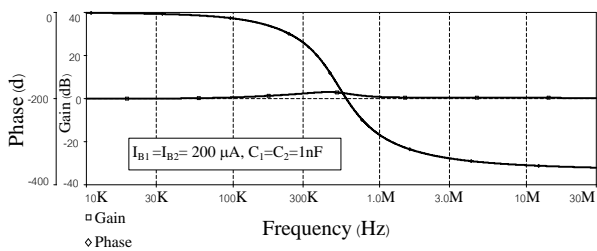
(ค)



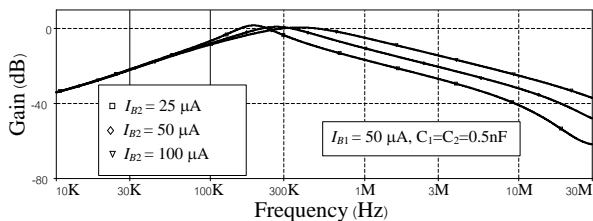
(ง)

รูปที่ 6 ผลตอบสนองทางขนาดของฟังก์ชันต่างๆ ของวงจรกรองความถี่

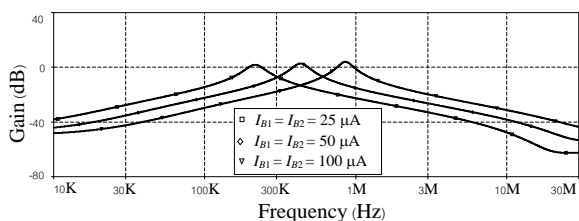
ในรูปที่ 7 แสดงผลของเฟสและขนาดของวงจรในฟังก์ชัน All-pass ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่วิเคราะห์ ส่วนรูปที่ 8 แสดงผลตอบสนองแถบความถี่ผ่าน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส I_{B2} แสดงให้เห็นว่าสามารถปรับแบนด์วิธของวงจรได้โดยใช้ I_{B2} ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (21) และรูปที่ 9 แสดงผลตอบสนองแถบความถี่ผ่านเมื่อควบคุมให้กระแส I_{B1} และ I_{B2} มีค่าเท่ากันและเปลี่ยนแปลงไปพร้อมกัน พบว่า สามารถควบคุมความถี่โพลได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อควอลิตี้แฟกเตอร์ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (19) และ (20)



รูปที่ 7 เฟสและขนาดของสัญญาณที่ได้จากฟังก์ชัน All-pass



รูปที่ 8 ผลตอบสนองแถบความถี่ผ่าน เมื่อเปลี่ยนแปลงค่ากระแส I_{B2}



รูปที่ 9 ผลตอบสนองแถบความถี่ผ่าน เมื่อเปลี่ยนแปลงค่ากระแส I_{B1} และ I_{B2} ในอัตราคงที่

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอ วงจรกรองความถี่หลายฟังก์ชันในโหมดกระแส ลักษณะเด่นของวงจรที่นำเสนอ เป็นวงจรที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนซึ่งประกอบไปด้วย CCTA สองตัวและตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์สองตัว วงจรสามารถกำหนดฟังก์ชันกรองสัญญาณได้ครบทุกฟังก์ชัน โดยไม่จำเป็นต้องใช้เงื่อนไขค่าอุปกรณ์ในวงจรที่ต้องมีค่าเหมาะสมกัน วงจรสามารถปรับค่าแบนด์วิธ และค่าความถี่ตัดได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถที่จะประยุกต์ไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมได้โดยง่าย [6] ด้วยลักษณะเด่นดังกล่าว จึงเหมาะที่จะนำไปพัฒนาให้อยู่ในรูปวงจรรวม เพื่อใช้ในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในระบบสื่อสาร ระบบเครื่องมือวัด และระบบประมวลผลสัญญาณ ที่ต้องการฟังก์ชันกรองความถี่หลายฟังก์ชัน ที่ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิชาการนี้ได้รับการสนับสนุนจาก คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูลศักดิ์ โกษียาภรณ์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้คำแนะนำมาโดยตลอด และขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในการเขียนบทความ

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. S. Sedra and K. C. Smith. *Microelectronic circuits*, 3rd ed., Florida: Holt, Rinehart and Winston, 1991.
- [2] M. A. Ibrahim, S. Minaei and H. A. Kuntman. "A 22.5 MHz current-mode KHN-biquad using differential voltage current conveyor and ground passive elements". *Int. J. Electron. Commun. (AEU)*, 59:311-318, 2005.
- [3] C. Chang. "New multifunction OTA-C biquads," *IEEE Trans. Circuits and Syst.*, vol. 46, pp.820-824, June 1999.
- [4] C. Chang and S. Pai. "Universal current-mode OTA-C biquad with the minimum components," *IEEE Trans. Circuits and Syst.*, vol. 47, pp.1235-1238, Aug. 2000.
- [5] C. Chang, B. M Al-Hashimi and J. N. Ross. "Universal active filter biquad structure," *IEE Proc, (Part G)*, vol. 151, pp. 273-277, Aug. 2002.
- [6] C. Tomazou, F. J. Lidgley and D. G. Haigh. *Analogue IC design: the current-mode approach*, London: Peter Peregrinus, 1990.
- [7] C. S. Hilar and Tn. Laopoulos. "Circuit design: a study on voltage-mode to current-mode conversion technique". *Proceedings of MELECON' 96, Bari, Italy, May 1996*: 1309-1312.
- [8] C. Tomazou, and F. J. Lidgley. "Universal active filter using current conveyors". *Electron. Lett.* 22:662-664, 1986.
- [9] V. K. Singh and R. Senani. "New Multifunction active filter configuration employing current conveyors". *Electron Lett.*, 26: 1814-1816, 1990.
- [10] C. L. Hou, C. C. Huang, Y. S. Lan, J. J. Shaw and C. M. Chang. "Current-mode and voltage-mode universal biquads using a single current-feedback amplifier". *Int. J. Electronics*, 86(8): 929-932, 1999.
- [11] Jiun-Wei Horng. "High-input impedance voltage-mode universal biquadratic filter using three plus-type CCII's". *IEEE Transaction on Circuit and System*, Vol.48, No.10, pp.996-997, 2001.
- [12] C. Wang, H. Liu and Y. Zhao. "A New Current-Mode Current-Controlled Universal Filter Based on CCCII(\pm)". *Circuits Syst Signal Process* (2008), 27: 673-682, 2008.
- [13] W. Tangsrirat, T. Dumawipata and W. Surakamponorn. "Multiple-input single-output current-mode multifunction filter using current differencing transconductance amplifiers". *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*, 24 November 2005.

[14] R. Prokop and V. Musil. "New modern circuit block CCTA and some its application". The Fourteenth International Scientific and Applied Science Conference Electronics ET2005, 93-98, 2005.

[15] G. Daryanani. "Principles of Active Network Synthesis and Design". John Wiley & Sons, New York, 1976.

[16] D. R. Frey. "Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering". IEE Proc. Circuit Devices Syst., 140: 406-416, 1993.