

วงจรกรองความถี่ไบควอดราติกโหมดกระแสแบบสามอินพุต
หนึ่งเอาต์พุตโดยใช้วงจร MCDTA ตัวเดียว
Current-Mode Universal Biquadratic with Three-Input
Single-Output Using a Single MCDTA

กุลเศษฐ์ ขวามา¹ และ มนตรี คำเงิน²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรความถี่ไบควอดราติกโหมดกระแสแบบสามอินพุตและหนึ่งเอาต์พุตที่ปรับค่าความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วงจร MCDTA หนึ่งวงจรและตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์สองตัว โครงสร้างที่นำเสนอสามารถสร้างตัวกรองความถี่แบบผ่านต่ำ ผ่านแถบ ผ่านสูง แถบหยุด และผ่านทุกความถี่ ใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ในการสร้างการกรองทั้งห้าแบบ ไม่ต้องการความสมพียงกันของค่าอุปกรณ์และไม่ต้องการสัญญาณอินพุตแบบลบ ปรับค่าความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และ ค่าความไวของอุปกรณ์แอ็กทีฟและพาสซีฟต่อความถี่มีค่าต่ำ ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE สามารถยืนยันทฤษฎีที่นำเสนอ

คำสำคัญ: วงจรไบควอดราติก วงจรโหมดกระแส วงจร MCDTA

Abstract

This paper presents a new electronically tunable current-mode universal biquadratic filter with three inputs and single output employing only a single modified current differencing transconductance amplifier and two grounded capacitors. The proposed filter provides realization of low-pass, band-pass, high-pass, band-stop, and all-pass current responses; employment of grounded capacitors; no requirement with the component-matching conditions and the inverting-type input signals to realize specific filtering; electronic control of the natural frequency and low active and passive sensitivities. Simulation results using PSPICE are given to confirm the presented theory

Key words: Biquadratic filter, current-mode circuit, MCDTA

¹ นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

² อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1. บทนำ

เมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้มีการนำเสนอวงจร แอ็กทีฟชนิดใหม่ที่มีชื่อเรียกว่าวงจร Current Differencing Transconductance Amplifier (CDTA) [1] วงจรนี้ได้รวมเอาข้อดีของวงจร Current Differencing Buffered Amplifier (CDBA) เช่น มีอินพุตเป็นสัญญาณกระแสความแตกต่าง [2] และวงจรขยายทรานส์คอนดักแตนซ์ (Transconductance Amplifier: TA) [3] รวมเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นจึงเป็นวงจรที่เหมาะสมสำหรับนำมาออกแบบวงจรแอนะล็อกโหมดกระแสที่ปรับค่าฟังก์ชันต่าง ๆ ได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์ วงจรกรองความถี่ไบควอดราติกหลายหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่อันดับที่สองที่สามารถสร้างการกรองได้ทั้งห้าแบบ คือ แบบผ่านต่ำ ผ่านแถบ ผ่านสูง แถบหยุด และผ่านทุกความถี่ที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้ในวงจรเฟสล็อกลูป วงจรมอดูเลเตอร์ และดีมอดูเลเตอร์ในระบบโทรศัพท์บ้าน ตัวแยกเสียงสูง เสียงกลาง และเสียงต่ำในระบบเครื่องเสียง [4] ในขณะที่วงจรกรองความถี่แบบแอ็กทีฟที่ใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์จะเหมาะกับการทำไปสร้างเป็นวงจรรวม [5] วงจร CDTA สามารถใช้สำหรับนำมาออกแบบวงจรกรองความถี่โหมดกระแสที่สามารถปรับค่าความถี่ได้เพราะที่ภาคเอาต์พุตเป็นวงจรทรานส์คอนดักแตนซ์ ดังนั้นที่ผ่านมาจึงมีวงจรกรองความถี่ที่ใช้วงจร CDTA เป็นวงจรพื้นฐานนำเสนอหลายวงจรใน [6]-[12] แต่อย่างไรก็ตาม วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ที่

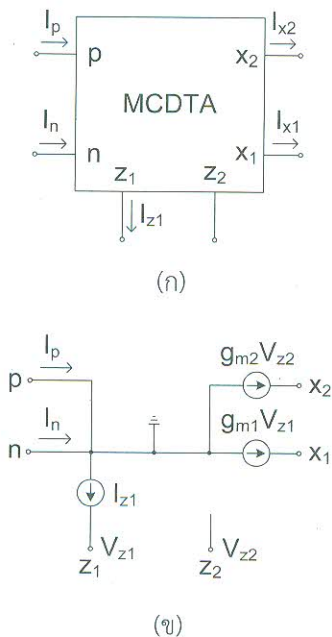
นำเสนอใน [6]-[12] ใช้วงจร CDTA มากกว่าหนึ่งวงจร เมื่อเร็ว ๆ นี้วงจร CDTA ได้ถูกพัฒนาต่ออีกครั้งโดยใช้ชื่อเรียกว่าวงจร Modified Current Differencing Transconductance amplifier (MCDTA) [13] วงจร MCDTA ได้เพิ่มวงจร TA และวงจรสะท้อนเข้าไปในวงจร CDTA แบบเดิม ดังนั้นวงจร MCDTA หนึ่งวงจรจะมีวงจร TA สองวงจร แต่ละวงจร TA ในวงจร MCDTA จะควบคุมได้อิสระจากกัน ที่ผ่านมามีวงจรกรองความถี่ที่ใช้วงจร MCDTA เป็นวงจรพื้นฐานนำเสนอใน [13]-[14] แต่วงจรดังกล่าวเป็นวงจรกรองแบบอินพุตเดียวสามเอาต์พุตจึงสามารถสร้างการกรองความถี่ได้เพียงสามแบบ ถ้าเปรียบเทียบกับวงจรกรองความถี่แบบหนึ่งอินพุตและหลายเอาต์พุต วงจรกรองความถี่แบบหลายอินพุตสามารถสร้างการกรองได้ครบห้าแบบได้ง่ายกว่า นอกจากนี้การสร้างการกรองแบบกลับขั้วสามารถทำได้ง่ายกว่าเพียงกลับขั้วสัญญาณอินพุตเท่านั้นโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนลักษณะของวงจรแต่อย่างใด ยิ่งไปกว่านั้นวงจรแบบหลายอินพุตยังสามารถสร้างการกรองโดยไม่ต้องการความสมพ้องกันของค่าอุปกรณ์ และใช้อุปกรณ์แอ็กทีฟจำนวนน้อยอีกด้วย

ดังนั้น บทความนี้นำเสนอวงจรกรองความถี่ไบควอดราติกโหมดกระแสแบบสามอินพุตและหนึ่งเอาต์พุตโดยใช้วงจร MCDTA หนึ่งวงจรและตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์อย่างละสองตัว วงจรที่นำเสนอสามารถสร้างตัวกรองความถี่ได้ครบทั้งห้าแบบ คือ แบบผ่านต่ำ

ผ่านแถบ ผ่านสูง แถบหยุด และ ผ่านทุกความถี่ เมื่อทำการเชื่อมต่ออินพุตอย่างเหมาะสม การสร้างการกรองทั้งห้าแบบไม่ต้องการความสมพงษ์กันของค่าอุปกรณ์ ค่าความถี่ของวงจรสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรที่นำเสนอถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE

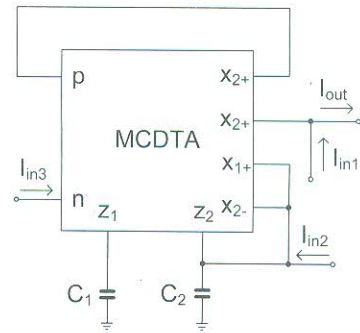
2. วงจรที่นำเสนอ

สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าและวงจรเสมือนของวงจร MCDTA แสดงได้ดังรูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของขั้วต่าง ๆ ของวงจร MCDTA แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 1 วงจร MCDTA (ก) สัญลักษณ์

(ข) วงจรเสมือน



รูปที่ 2 วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอ

$$\left. \begin{aligned} V_p &= V_n = 0 \\ I_{z1} &= I_p - I_n \\ I_{x1} &= g_{m1} V_{z1} \\ I_{x2} &= g_{m2} V_{z2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

โดยที่ g_{m1} และ g_{m2} คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของวงจร MCDTA จากสมการจะเห็นได้ว่า g_{m2} เป็นค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ที่ควบคุมได้อิสระจาก g_{m1} ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้วงจร MCDTA แตกต่างจากวงจร CDTA ทั่วไป

วงจรกรองความถี่โห้มดกระแสที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 2 จากรูปวงจรประกอบด้วยวงจร MCDTA หนึ่งวงจรและตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์สองตัว จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ทำให้วงจรเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม [5] เมื่อใช้คุณสมบัติของวงจร MCDTA และทฤษฎีโนดโวลต์เตจ กระแส I_{out} ของวงจรสามารถเขียนได้คือ

$$I_{out} = \frac{\left(s^2 + \frac{g_{m2}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} \right) I_{in3} + \left(\frac{g_{m2}}{C_2} s \right) I_{in2} + \left(\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} \right) I_{in1}}{\left(s^2 + \frac{g_{m2}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} \right)} \quad (2)$$

จากสมการ (2) ตัวกรองแบบผ่านต่ำ (low-pass filter: LP) ตัวกรองแบบผ่านแถบ (band-pass filter: BP) ตัวกรองแบบผ่านสูง (high-pass filter: HP) ตัวกรองแบบแถบหยุด (band-stop filter: BS) และตัวกรองแบบผ่านทุกความถี่ (all-pass filter: AP) สามารถสร้างได้ตามเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- (1) ตัวกรองแบบ LP เมื่อ $I_{in2} = I_{in1} = 0$ และ $I_{in3} = I_{in}$
- (2) ตัวกรองแบบ BP เมื่อ $I_{in1} = I_{in3} = 0$ และ $I_{in2} = I_{in}$
- (3) ตัวกรองแบบ HP เมื่อ $I_{in1} = I_{in2} = I_{in3} = 0$ และ $I_{in3} = I_{in}$
- (4) ตัวกรองแบบ BS เมื่อ $I_{in1} = I_{in2} = I_{in3} = 0$ และ $I_{in3} = 0$
- (5) ตัวกรองแบบ AP เมื่อ $I_{in1} = I_{in2} = I_{in3} = 0$ และ $I_{in3} = 0$

ดังนั้นวงจรกรองความถี่ในรูปแบบที่ 2 สามารถสร้างการกรองได้ทั้งห้าแบบในวงจรเดียว เมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตอย่างเหมาะสม ค่าพารามิเตอร์ ω_o และ Q ของตัวกรองความถี่ทั้งหมด สามารถกำหนดได้คือ

$$\omega_o = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (3)$$

$$Q = \sqrt{\frac{g_{m2}C_1}{g_{m1}C_2}} \quad (4)$$

วงจร MCDTA ที่สร้างจากซีมอส แสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปถ้าสมมติว่าทรานซิสเตอร์ M_9 และ M_{10} มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ค่า g_{m1} สามารถกำหนดได้คือ

$$g_{m1} = \sqrt{\mu C_{ox}(W/L)I_{b1}} \quad (5)$$

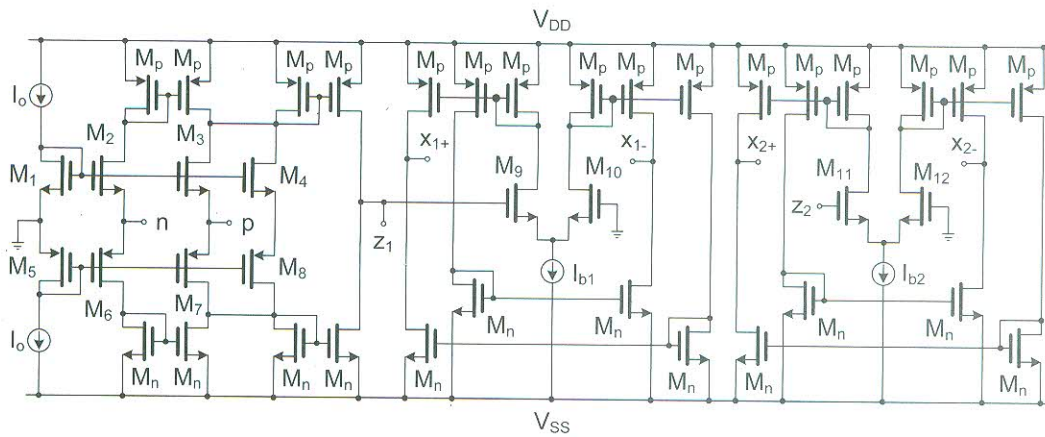
และถ้าสมมติให้ทรานซิสเตอร์ M_{11} และ M_{12} มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ค่า g_{m2} สามารถกำหนดได้คือ

$$g_{m2} = \sqrt{\mu C_{ox}(W/L)I_{b2}} \quad (6)$$

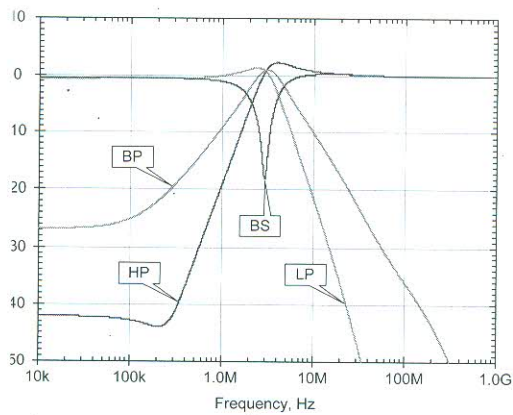
โดยที่ μ คือค่าสภาพคล่องตัวของพาหะ C_{ox} คือค่าตัวเก็บประจุที่ขาคู่ต่อหน่วยพื้นที่ I_{b1} และ I_{b2} คือกระแสไบอัสภายนอก ดังนั้นจาก (5) และ (6) ค่า g_{m1} และ g_{m2} สามารถปรับค่าได้ด้วยกระแส I_{b1} และ I_{b2} ตามลำดับ

4. การจำลองการทำงาน

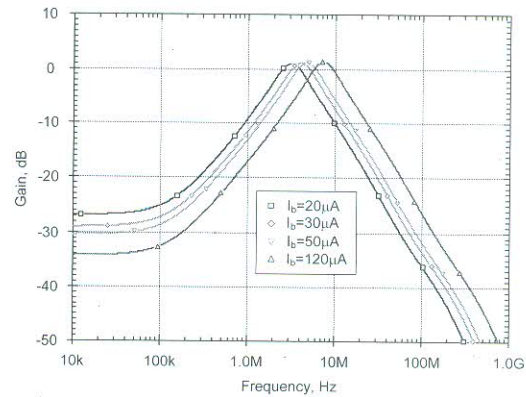
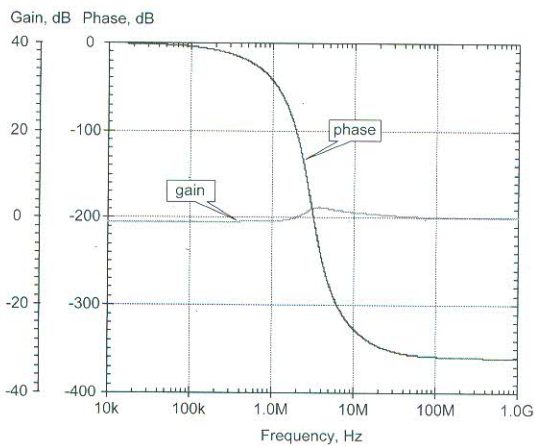
วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอจะถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE ทรานซิสเตอร์ nMOS และ pMOS ของวงจรในรูปแบบที่ 3 จะถูกออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีซีมอส TSMC ขนาด $0.25 \mu\text{m}$ [15] อัตราส่วน W/L ของทรานซิสเตอร์ในวงจร MCDTA กำหนดค่าดังนี้ $W/L = 2\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}$ สำหรับ M_1-M_4 $W/L = 7\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}$ สำหรับ M_5-M_8 $W/L = 5\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}$ สำหรับ M_9-M_{12} และ M_p ทุกตัว $W/L = 15\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}$ สำหรับ M_n ทุกตัว ใช้แหล่งจ่ายเท่ากับ $\pm 1.5 \text{ V}$ และ กระแสไบอัส $I_o = 50\mu\text{A}$ ตัวอย่างการออกแบบ กำหนดค่า $C_1 = C_2 = 10 \text{ pF}$ รูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองความถี่แบบ LP BP HP และ BS ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรที่นำเสนอเมื่อกำหนดค่ากระแส $I_{b1} = I_{b2} = 50 \mu\text{A}$ จากรูป ค่าความถี่ f_o ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 5.24 MHz และในกรณีนี้ วงจรใช้กำลังงานรวมเท่ากับ 2.5 mW



รูปที่ 3 วงจร MCDTA ที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์

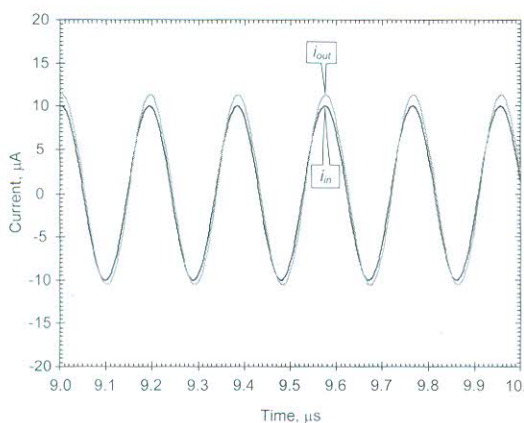


รูปที่ 4 ผลตอบสนองความถี่แบบ LP BP HP และ BS

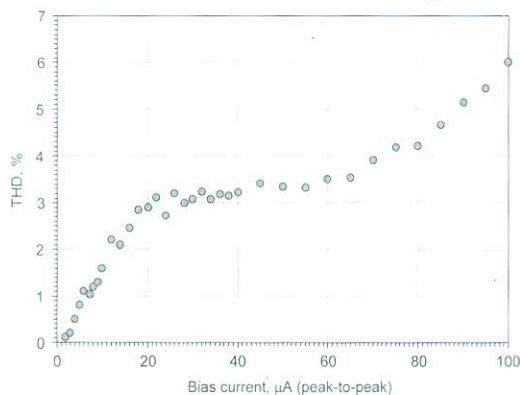
รูปที่ 6 การเปลี่ยนค่า ω_0 ด้วยกระแสไบอัส I_b 

รูปที่ 5 ผลตอบสนองทางเฟสและความถี่ของ AP

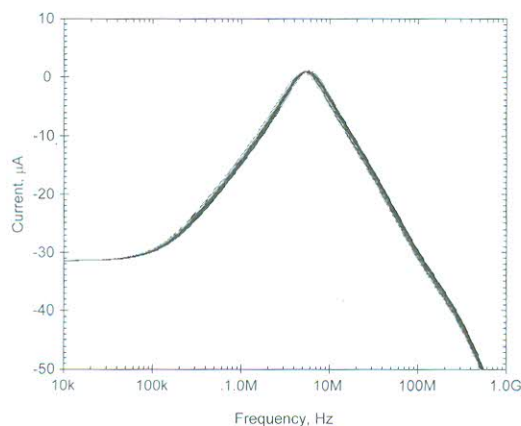
รูปที่ 5 แสดงการตอบสนองทางขนาดและเฟสของการตอบสนองแบบ AP ที่ความถี่ f_0 เท่ากับ 5.24 MHz จากรูปที่ 4 และ 5 สามารถแสดงได้ว่าวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอสามารถสร้างการกรองความถี่ได้ห้าแบบในวงจรเดียว



รูปที่ 7 รูปคลื่นสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของ BP ที่ความถี่ 5.24 MHz ขนาด 20 μA_{p-p}



รูปที่ 8 ค่า THD ของ BP ที่ความถี่ 5.24 MHz เมื่อเปลี่ยนขนาดสัญญาณอินพุตเป็นค่าต่าง ๆ



รูปที่ 9 ผลตอบสนองแบบ BP เมื่อจำลองการทำงานแบบ Monte Carlo เมื่อ C_1 และ C_2 เปลี่ยนแปลง 10%

รูปที่ 6 แสดงผลตอบสนองความถี่ของการกรองแบบ BP เมื่อเปลี่ยนกระแส I_b (i.e., $I_b = I_{b1} = I_{b2}$) มีค่าเป็น 20 30 50 และ 120 μA รูปที่ 7 แสดงสัญญาณรูปคลื่นขายน์ของสัญญาณทางเอาต์พุตและอินพุตของ BP เมื่อป้อนอินพุตความถี่ 5.24 MHz ขนาด 20 μA_{p-p} จากรูปค่า THD วัดได้มีค่าเท่ากับ 2.81% รูปที่ 8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ THD ของการกรองความถี่แบบ BP เมื่อป้อนอินพุตความถี่เท่ากับ 5.24 MHz และเปลี่ยนขนาดของสัญญาณเป็นค่าต่าง ๆ ในกรณีนี้กำหนด $I_{b1} = I_{b2} = 50 \mu\text{A}$ และ $C_1 = C_2 = 10 \text{ pF}$ จากรูปเมื่อขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 90 μA_{p-p} ค่า THD มีค่าประมาณ 5.13 % ค่า THD จะมีค่าต่ำกว่านี้ถ้าทดสอบที่ความถี่ต่ำกว่า รูปที่ 9 แสดงผลตอบสนองของ BP เมื่อจำลองการทำงานแบบ Monte Carlo เมื่อกำหนดค่า C_1 และ C_2 มีการเปลี่ยนแปลง 10 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ทำการจำลองซ้ำเป็นจำนวน 100 ครั้ง ผลการจำลองนี้สามารถแสดงได้ว่าวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอจะสามารถทำงานได้เมื่อนำไปสร้างเป็นวงจรจริง

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรกรองความถี่โหมดกระแสแบบสามอินพุตและหนึ่งเอาต์พุตที่สามารถปรับค่าความถี่ด้วยกระแสไบอัส วงจรที่นำเสนอใช้วงจร MCDTA หนึ่งวงจรและตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์สองตัว วงจรที่นำเสนอมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ (1) ใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ซึ่งทำให้เหมาะกับการนำไปสร้างเป็น

วงจรรวม (2) สามารถสร้างการกรองความถี่ได้ห้าแบบในวงจรเดียวคือ แบบผ่านต่ำ แบบผ่านแถบ แบบผ่านสูง แบบแถบหยุด และแบบผ่านทุกความถี่โดยไม่ต้องการคูณสมบัติความสมพ้องกันของค่าอุปกรณ์และไม่ต้องการสัญญาณอินพุตแบบกลับขั้วสัญญาณ (3) ค่าความไวของอุปกรณ์แอ็กทิฟและพาสซีฟต่อความถี่มีค่าต่ำ โครงสร้างที่นำเสนอถูกตรวจสอบการทำงานโดยโปรแกรม PSPICE

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Biolek, "CDTA-building block for current-mode analog signal processing," in Proceedings of 16th European Conference on Circuits Theory and Design (ECCTD'03), Poland, 2003, pp. 397-400.
- [2] C. Acar, S. Ozoguz, "A new versatile building block: current differencing buffered amplifier suitable for analog signal-processing filters," Microelectronics Journal, vol. 30, pp. 157-160, 1999.
- [3] E. Sanchez-Sinencio, J. Ramirez-Angulo, B. Linares-Barranco, A. Rodriguez-Vazquez, "Operational transconductance amplifier-based nonlinear function syntheses," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 24, pp. 1579-1586, 1989.
- [4] S. Nikoloudis, C. Psychalinos, "Multiple input single output universal biquad filter with current feedback operational amplifiers," Circuits System and Signal Processing, vol. 29, pp. 1167-1180, 2010.
- [5] M. Bhusan, R. W. Newcomb, "Grounding of capacitors in integrated circuits," Electronics Letters, vol. 3, pp. 148-149, 1967.
- [6] D. Biolek, E. Hancioglu, A. U. Keskin, "High-performance current differencing transconductance amplifier and its application in precision current-mode rectification," International Journal of Electronics and Communications, vol. 62, pp. 92-96, 2008.
- [7] W. Jaikla, M. Siripruchyaun, D. Biolek, V. Biolkova, "High-output impedance current-mode multiphase sinusoidal oscillator employing current differencing transconductance amplifier-based all-pass filters," International Journal of Electronics, vol. 97, pp. 811-826, 2010.
- [8] M. Kumngern, P. Lamun, K. Dejhan, "Current-mode quadrature oscillator using current differ-

- encing transconductance amplifiers,” *International Journal of Electronics*, vol. 99, pp. 971-986, 2012.
- [9] A. U. Keskin, D. Biolkova, E. Hancioglu, V. Biolkova, “Current-mode KHN filter employing current differencing transconductance amplifiers,” *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 60, pp. 443-446, 2006.
- [10] A. U. Keskin, D. Biolkova, “Current mode quadrature oscillator using current differencing transconductance amplifiers (CDTA),” *IEE Proceeding of Circuits, Devices and Systems*, vol. 153, pp. 214-218, 2006.
- [11] W. Tangsrirat, T. Dumawipata, W. Surakamponporn, “Multiple-input single-output current-mode multifunction filter using current differencing transconductance amplifiers,” *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 61, pp. 206-214, 2007.
- [12] N. A. Shah, M. Quadri, S. Z. Iqbal, “Three input one output current-mode cascadable universal filter employing CDTAs,” *Journal of Active and Passive Electronic Devices*, vol. 4, pp. 347-352, 2009.
- [13] Y. Li, “A modified CDTA (MCDTA) and its applications: designing current-mode sixth-order elliptic band-pass filter,” *Circuits, Systems, and Signal Processing*, vol. 30, pp. 1383-1390, 2011.
- [14] Y. Li, “Current-mode sixth-order elliptic bandpass filter using MCDTAs,” *Radioengineering*, vol. 20, pp. 645-649, 2011.
- [15] P. Prommee, K. Chatrakun, “CMOS WTA maximum and minimum circuits with their applications to analog switch and rectifiers,” *Microelectronics Journal*, vol. 42, pp. 52-62, 2011.