

วงจรกรองความถี่เอนกประสงค์โหมดกระแสแบบทอโทมัสด้วย CCCFTA ตัวเดียว A Current-mode Tow Thomas Universal Filter Employing Single CCCFTA

ชิตสิรค์ วิชิต¹ พุทธาวุฒิ ลีกุลธร¹ สมชาย ศรีสกุลเดี่ยว¹ และ ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ²

Citisan Wichito¹, Puttawud Leekrunton¹, Somchai Srisakultiew¹,
and Supawat Lawanwisut²

¹สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 30000

เลขที่ 744 ถนนสุนทราราม ตำบลในเมือง อำเภอเมือง นครราชสีมา โทรศัพท์ 044-272545 E-mail: somchaikorat2008@hotmail.com

²สาขาวิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ลพบุรี 15000

เลขที่ 321 ถนนนารายณ์มหาราช ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง ลพบุรี E-mail: s.lawanwisut@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอ วงจรกรองความถี่เอนกประสงค์แบบ ทอโทมัสในโหมดกระแสด้วย CCCFTA (Current Control Current Flower Transconductance Amplifier) ตัวเดียว ที่สามารถสนองความถี่ได้ แบบในวงจรเดียวกันได้แก่ 3 กรองความถี่ต่ำผ่าน สูงผ่าน และแถบความถี่ผ่าน ด้วยอุปกรณ์วงจรขยายความนำตามกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส)CCCFTA) เพียงตัวเดียว มีลักษณะเด่นของวงจรคือ สามารถปรับค่าความถี่โพลและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับกระแส I_O และ I_B ได้อย่างอิสระ โครงสร้างของวงจรไม่ซับซ้อนประกอบไปด้วย CCCFTA เพียง ตัว 1 ร่วมกับตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีก ตัว 2 ปราศจากตัวต้านทานภายนอก และใช้กับอุปกรณ์พาสซีฟแบบต่อลงกราวด์ วงจรที่นำเสนอสามารถนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวม ยิ่งกว่านั้นวงจรที่นำเสนอยังสามารถใช้ในการนำไปต่อใช้งานในโหมดกระแสเนื่องจากเอาต์พุตมีอิมพีแดนซ์สูง ผลการจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม PSpice พบว่าให้ผลสอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎี

คำสำคัญ: วงจรกรองความถี่เอนกประสงค์โหมด ,
กระแส CCCFTA

Abstract

This article presents a current-mode Tow-Thomas universal biquadratic filter performing 3 standard functions in the same time: low-pass, high-pass and band-pass functions, based on only single current control current flower transconductance amplifier (CCCFTA). The features of the circuit are that: the pole frequency and quality factor can be electronically tuned via the input bias currents. The circuit topology is very simple, consisting of merely single CCCFTA and 2 grounded capacitors. Without any external resistor and using only grounded elements, the proposed circuit is very comfortable to further develop into an integrated circuit. Moreover, the proposed circuit enables easy cascading in current-mode circuit, due to high output impedances. The PSpice simulation results are shown. The given results agree well with the theoretical anticipation.

Keywords: universal filter, current-mode, CCCFTA

1. บทนำ

ในสิบกว่าปีที่ผ่านมา ในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้มีความพยายามที่ลดแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายสำหรับวงจร โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์พกพา การลดแหล่งจ่ายแรงดันจึงเป็นสิ่งจำเป็น ด้วยเทคนิคการออกแบบวงจรโหมดกระแสที่มีลักษณะเด่นกว่าโหมดแรงดัน จึงเป็นวัตถุประสงค์ของการสังเคราะห์วงจรโหมดกระแส เนื่องจากมีช่วงพลวัตกว้าง (Larger Dynamic Range), มีแบนด์วิดท์กว้าง (Higher Signal Bandwidth), มีความเป็นเชิงเส้นสูง (Greater Linearity), ออกแบบวงจรได้ง่าย (Simple Circuitry) และ สิ้นเปลืองกำลังงานต่ำ (Low Power Consumption) [1], [2] วงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อกมีความสำคัญมากในด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และมีการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางหลายด้าน เช่น ด้านการสื่อสาร ด้านเครื่องมือวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องวัดทาง การแพทย์ และระบบควบคุม [3], [4]

จากการสำรวจได้มีการเผยแพร่บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ในโหมดกระแส ด้วยอุปกรณ์แอกทีฟสมัยใหม่ต่าง ๆ เช่น วงจรขยายความนำส่งผ่านกระแส (Operational Transconductance Amplifier: OTA) วงจรสายพานกระแส (Current Conveyor: CCII) วงจรขยายกันชนจากผลต่างกระแส (Current Differential Buffer Amplifier: CDBA) วงจรขยายความนำจากผลต่างกระแส (Current Differential Transconductance Amplifier: CDTA) จากรายงาน [5]-[16] พบข้อด้อยของบทความต่าง ๆ บางประการดังต่อไปนี้

1. ใช้อุปกรณ์แอกทีฟ และพาสซีฟมาก [5]-[9]
 2. การตอบสนองความถี่บางส่วนเอาต์พุตเป็นอิมพีแดนซ์ต่ำ [10]-[11] ในโหมดกระแสจึงเป็นเรื่องยากในการนำไปใช้งาน
 3. ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ [5]-[9], [12]
 4. ต้องเปลี่ยนวงจรจึงได้ผลตอบสนองความถี่ครบ [13]-[14]
 5. ต้องใช้ตัวเก็บประจุต่อลอย [15]-[16]
- วงจรกรองความถี่เอนกประสงค์เป็นที่นิยมและแพร่หลายมาก เนื่องจากสามารถให้ผลตอบสนองได้ครบทุกฟังก์ชันในเวลาเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรกรองความถี่เอนกประสงค์แบบทูโทมัส ก็เป็นที่นิยมกว่า วงจรกรองความถี่เอนกประสงค์แบบอื่น ๆ เนื่องจากโครงสร้างของทูโทมัส มีสมรรถนะของความไวต่ออุปกรณ์แอกทีฟ และพาสซีฟต่ำ ใช้อุปกรณ์น้อย และมีเสถียรภาพสูง [17]-[18]

วงจรขยายความนำตามกระแสที่ควบคุมได้ด้วยกระแส (Current Control Current Flower Transconductance Amplifier: CCCFTA) [19] เป็นอุปกรณ์แอกทีฟที่มีการนำเสนอมาไม่นาน [19] มีลักษณะเด่นของตัวอุปกรณ์คือ แรงดันที่ขา f ไม่เท่ากับศูนย์จะส่งผ่านกระแสที่ขา z โดยอัตราการส่งผ่านความนำกระแสด้วยค่าความนำกระแสตัวแรก และแรงดันตกคร่อมที่ z ยังทำให้ส่งผ่านกระแสไปยังขา $x+$ และ $x-$ ด้วยค่าความนำกระแสตัวที่สอง อีกทั้งค่าความนำกระแสยังสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์จากกระแสไบแอสจากภายนอก จึงทำให้มีการนำอุปกรณ์นี้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรต่าง ๆ มากมายเช่น วงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรกรองความถี่ เป็นต้น

ดังนั้นในบทความนี้นำเสนอ วงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ในโหมดกระแสแบบทูโทมัสด้วย

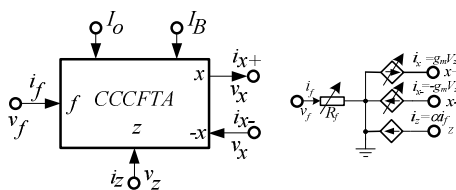
CCCFTA เพียงตัวเดียว ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุสองตัว แบบต่อลงกราวด์ ที่มีลักษณะเด่นคือสามารถควบคุม ความถี่โพลได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ปราศจากตัว ด้านทานภายนอก และจำลองการทำงานโปรแกรม PSpice เพื่อเป็นการทดสอบสมรรถนะของวงจรที่ นำเสนอ

2. วงจรและหลักการทำงานของวงจร

2.1 หลักการทำงานของ CCCFTA

เนื่องจากวงจรที่นำเสนอมีอุปกรณ์ CCCFTA เป็น อุปกรณ์หลักอีกยังใช้อุปกรณ์นี้เพียงตัวเดียว จึงขอ กล่าวถึง CCCFTA โดยสังเขป สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ ที่นำเสนอ CCCFTA คล้ายกับ CFTA เพียงแต่แรงดัน อินพุตของ CCCFTA ไม่เป็นศูนย์ และเสมือนมีความ ด้านทาน R_f ที่ขา f ซึ่งเป็นค่าความต้านทานแฝงที่ สามารถควบคุมได้ด้วยกระแส I_o ที่แสดงในรูปที่ 1 มี ขาอินพุต 1 ขาคือ f มีเอาต์พุตคือขา z และ $x+$, $x-$ ที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงทุกขา คุณลักษณะความสัมพันธ์ของ กระแส และแรงดันดังสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} V_f \\ I_{z,x} \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm g_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f \\ V_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (1)$$



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ และวงจรสมมูลของ CCCFTA

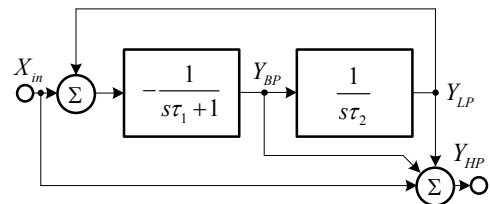
จากโครงสร้างของ CCCFTA ได้เลือกใช้เป็น ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ดังนั้นค่า R_f และ g_m จะมีค่าดังสมการที่ (2)

$$R_f = \frac{V_T}{2I_o} \quad \text{และ} \quad g_m = \frac{I_B}{2V_T} \quad (2)$$

เมื่อ V_T เป็นศักดาความร้อนที่มีค่า 26mV ที่ อุณหภูมิห้อง (27°C)

2.2 โครงสร้างของวงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ทู โทมัส

โครงสร้างของวงจรกรองความถี่ทูโทมัสจะ ประกอบไปด้วย วงจรอินทิเกรตแบบสูญเสีย (Lossy Integrator) กับ แบบ ไม่ สูญ เสีย (Lossless Integrator) และวงจรรวม ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรกรองความถี่ของทู โทมัส

จากรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการถ่ายโอน ของแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter: BPF) ความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter: LPF) และความถี่ สูงผ่าน (High Pass Filter) ได้สมการที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

$$\frac{Y_{BP}}{X_{in}} = -\frac{s \frac{1}{\tau_1}}{s^2 + s \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}} \quad (3)$$

$$\frac{Y_{LP}}{X_{in}} = -\frac{1}{s^2 + s \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}} \quad (4)$$

และ

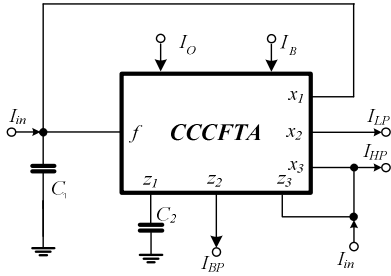
$$\frac{Y_{HP}}{X_{in}} = -\frac{s^2}{s^2 + s \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}} \quad (5)$$

จากสมการที่ 3 ถึง 5 ค่าความถี่โพล และ ค่าควอไลตีแฟกเตอร์ สามารถเขียนดังสมการที่ 6

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_1 \tau_2}} \quad \text{และ} \quad Q_0 = \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}} \quad (6)$$

2.3 วงจรกรองความถี่โหมดกระแสแบบบูโหมัสด้วย CCCFTA

วงจรกรองความถี่โหมดกระแสแบบบูโหมัสด้วย CCCFTA ที่นำเสนอตั้งรูปที่ 4 อันประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ 2 ตัว ทั้งแบบสูญเสียและไม่สูญเสียกับวงจรรวม ในโหมดกระแสวงจรรวมสามารถต่อร่วมกันเป็นวงจรรวมได้ จึงทำให้ไม่สิ้นเปลืองอุปกรณ์



รูปที่ 4 วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอ

ดังนั้นวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอในรูปที่ 4 สามารถเขียนสมการถ่ายโอนได้ดังนี้

$$\frac{I_{BP}}{I_{in}} = - \frac{\frac{s}{R_f C_1}}{s^2 + \frac{s}{R_f C_1} + \frac{g_m}{R_f C_1 C_2}} \quad (7)$$

$$\frac{I_{LP}}{I_{in}} = - \frac{\frac{g_m}{R_f C_1 C_2}}{s^2 + \frac{s}{R_f C_1} + \frac{g_m}{R_f C_1 C_2}} \quad (8)$$

$$\frac{I_{HP}}{I_{in}} = - \frac{s^2}{s^2 + \frac{s}{R_f C_1} + \frac{g_m}{R_f C_1 C_2}} \quad (9)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{V_T} \sqrt{\frac{I_O I_B}{C_1 C_2}} \quad \text{และ} \quad Q_0 = \sqrt{\frac{I_B C_1}{I_O C_2}} \quad (10)$$

จากสมการ ω_0 และ Q_0 ค่าความถี่โพล และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์สามารถปรับได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์จากการปรับกระแส I_O หรือ I_B ยิ่งไปกว่านั้นสามารถหาค่า BW ได้ดังสมการที่ 11

$$BW = \frac{\omega_0}{Q_0} = \frac{I_O}{V_T C_1} \quad (11)$$

2.4 ความไวของวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอ

ค่าความไวของวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอหาได้จาก

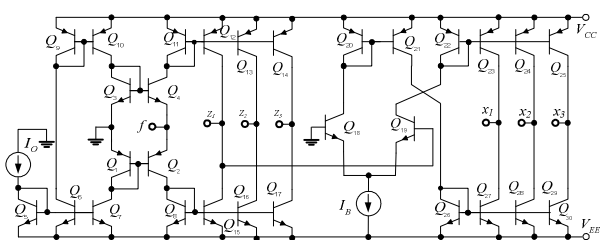
$$S_{I_O}^{e_0} = S_{I_B}^{e_0} = 1, S_{C_1}^{e_0} = S_{C_2}^{e_0} = -\frac{1}{2}, S_{V_T}^{e_0} = -1$$

$$S_{I_O}^{Q_0} = S_{C_1}^{Q_0} = \frac{1}{2}, S_{I_B}^{Q_0} = S_{C_2}^{Q_0} = -\frac{1}{2} \quad (12)$$

ค่าความไวของอุปกรณ์แอกทีฟ และพาสซีสทั้งหมดต้องมีค่าน้อยกว่า หรือเท่ากับ 1

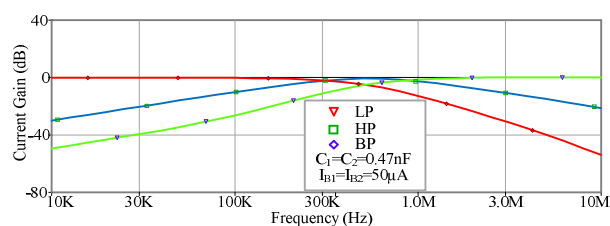
3. ผลการจำลองการทำงาน

เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ จึงได้จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice สำหรับทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร ได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ตามลำดับ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของบริษัท AT&T [20] จากรูปที่ 5 แสดงโครงสร้างภายในของ CCCFTA ซึ่งเงื่อนไขในการจำลองการทำงานนี้ กำหนดให้แหล่งจ่ายของวงจร คือ $\pm 1.5V$. ความต้านทานที่เป็นโหลดวงจรเท่ากับ 1Ω ค่าตัวเก็บประจุ $C_1=C_2=0.47nF$ และ $I_O=I_B=50\mu A$ จะได้ค่าความถี่โพล 517.524kHz จากการจำลองการทำงาน

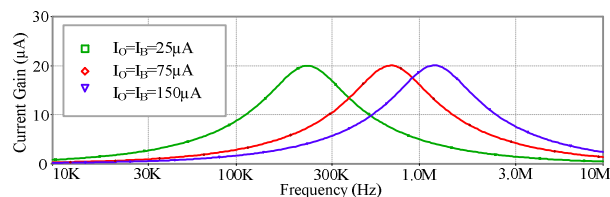


รูปที่ 5 โครงสร้างภายในของ CCCFTA

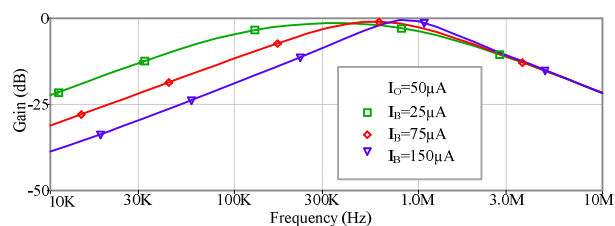
รูปที่ 6 เป็นผลจำลองการทำงานของ การตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองเอวประสงค์ของ ทูโหมสด้วย CCCFTA เพื่อแสดงให้เห็นผลการจำลอง อย่างชัดเจนของวงจร การกรองความถี่ต่ำ การกรอง ความถี่สูง และการกรองแถบความถี่ผ่าน ในโครงสร้าง เดียวกันนี้ได้เปลี่ยนแปลง รูปที่ 7 แสดงให้เห็น ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรที่นำเสนอด้วยการ ปรับกระแสให้ $I_O=I_B$ ทำการปรับให้มีค่าเท่ากับ $25\mu A$, $75\mu A$, $150\mu A$ ตามลำดับจะเห็นได้ว่าการปรับกระแส $I_O=I_B$ ทำให้ แบนด์วิดท์และความถี่โพลจะเปลี่ยนแปลง ไปตามกัน และไม่มีผลต่อค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ รูปที่ 8 แสดงให้เห็นผลตอบสนองทางความถี่ของแถบความถี่ ผ่านด้วยการปรับกระแส $I_B=25\mu A$, $75\mu A$, $150\mu A$ คงกระแส $I_O=50\mu A$ จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับกระแส I_B สูงขึ้นค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ก็จะสูงตามด้วย เป็นไปตาม สมการที่ 10 รูปที่ 9, 10 และ รูปที่ 11 เป็นผลการ จำลองการทำงานด้วยการป้อนสัญญาณชานน์ที่ความถี่ ตัดของวงจร คือ 517.524kHz ในสภาวะเริ่มต้น (Transient) จะได้ผลเปรียบเทียบระหว่างอินพุต และ เอาต์พุตที่ได้ของวงจรที่นำเสนอในแต่ละส่วนในเวลา เดียวกัน ดังรูปที่ 9 เป็นผลเปรียบเทียบที่ได้จากแถบ ความถี่ผ่าน รูปที่ 10 เป็นผลที่ได้จากความถี่ต่ำผ่าน และรูปที่ 11 เป็นผลที่ได้จากความถี่สูงผ่านตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่เอาต์พุตของวงจรกรองที่สามารถนำไป ต่อใช้งานได้ทันที โดยไม่ต้องใช้วงจรสมมูลภายนอก



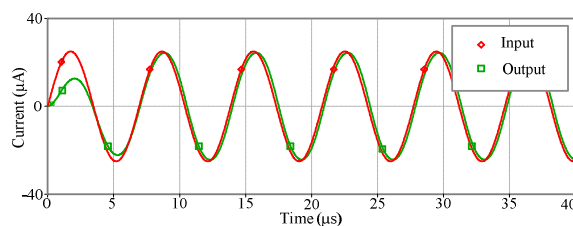
รูปที่ 6 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองที่ นำเสนอ



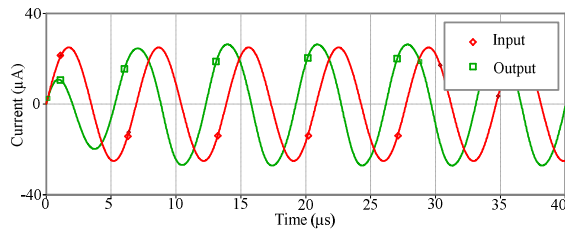
รูปที่ 7 ผลตอบสนองของแถบความถี่ผ่านจากการปรับ กระแส I_O และ I_B



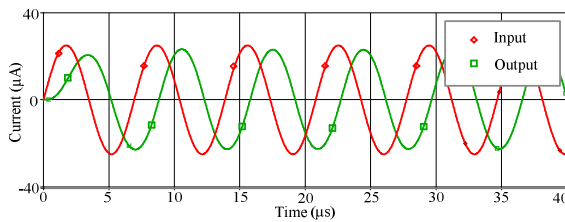
รูปที่ 8 ผลตอบสนองของแถบความถี่ผ่านจากการปรับ กระแส I_B และให้กระแส I_O คงที่



รูปที่ 9 ผลตอบสนองของการกรองแถบความถี่ผ่าน ด้วยรูปคลื่นชานน์ที่ความถี่กลาง 517.524kHz



รูปที่ 10 ผลตอบสนองของการกรองความถี่ต่ำผ่าน
ด้วยรูปคลื่นขยำนที่ความถี่กลาง



รูปที่ 11 ผลตอบสนองของการกรองความถี่สูงผ่าน
ด้วยรูปคลื่นขยำนที่ความถี่กลาง

4. สรุป

บทความวิจัยเรื่องวงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ในโหมดกระแสแบบฟูลไบโอมัสด้วย CCCFTA เพียงตัวเดียวที่นำเสนอ ต่อทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุสองตัวแบบต่อลงกราวด์ เหมาะสมในการนำไปทำเป็นไอซี เนื่องจากผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice จะเห็นได้ว่าวงจรที่นำเสนอ สามารถปรับความถี่โพล และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการปรับกระแสไบแอส ปราศจากตัวต้านทานภายนอกและอุปกรณ์ต่อล่อย ที่เอาต์พุตของวงจรมีอิมพีแดนซ์สูง จึงสามารถนำไปต่อใช้งานได้ทันทีในโหมดกระแส เนื่องจากไม่ต้องมีวงจรสมมูลอื่นใดเพื่อให้ได้เอาต์พุต วงจรที่นำเสนอมีอัตราการใช้พลังงาน 1.31mW ที่แหล่งจ่าย $\pm 1.5V$.

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Toumazou C, Lidgley FJ, Haigh DG.: Analogue IC design: the current-mode approach. London: Peter Peregrinus 1990.

- [2] Bhaskar DR., Sharma VK., Monis M, Rizvi SMI.: "New current mode universal biquad filter", *Microelectron J.* Vol. 30, pp. 837-839, 1999.
- [3] A. S. Sedra, and K. C. Smith, *Microelectronic circuits*, 3rd ed., Florida: Holt, Rinehart and Winston, 1991.
- [4] M. A. Ibrahim, S. Minaei, and H. A. Kuntman, "A 22.5 MHz current-mode KHN-biquad using differential voltage current conveyor and grounded passive elements," *International Journal of Electronics and Communication (AEU)*, vol. 59, pp. 311-318, 2005.
- [5] N. A. Shah and M. A. Malik, "Voltage/current-mode universal filter using FTFN and CFA", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 45, pp. 197-203, 2005.
- [6] C. M Chang, T. S. Liao, T. Y. Yu, E. S. Lin, C. H. Teng and C. L.Hou, "Novel universal current-mode filters using unity-gain cells", *International Journal of Electronics*, vol.86, pp. 929-932, 2001.
- [7] H. Y. Wang and C. T. Lee, "Versatile insensitive current-mode universal biquad implementation using current conveyors," *IEEE Transaction on Circuits and Systems II*, vol. 48, pp. 409-413, 2005.
- [8] R. K. Sharma and R. Senani, "Universal current-mode biquad using a single CFOA," *International Journal of Electronics*, vol. 91, pp.175-183, 2004.
- [9] S. H. Tu, C. M. Chang and K. P. Liao, "Novel versatile insensitive universal current-mode biquad employing two

- second-generation current conveyors”, *International Journal of Electronics*, vol. 89, pp.897-903, 2002.
- [10] A. Ü. Keskin, D. Biolkob, E. Hancioglu and V. Biolková, “Current-mode KHN filter employing current differencing transconductance amplifiers,” *International journal of electronics and Communications*, vol. 60, pp. 443–446, 2006.
- [11] D. Prasada, D. R. Bhaskara and A. K. Singhb, “Universal current-mode biquad filter using dual output current differencing transconductance amplifier,” *International journal of electronics and Communications (AEU)*, available online 28 March 2008.
- [12] A. M. Soliman, “New current mode filters using current conveyors,” *International Journal of Electronics and Communication (AEU)*, vol. 51, pp. 275-278, 1997.
- [13] D. Biolk and V. Biolkova “Universal biquads using CDTA elements for cascade filter design”, *Proceedings of the multiconference CICC 2003*, 2003.
- [14] W. Tangsrirat and W. Surakampontorn, “Systematic realization of cascadable current-mode filters using CDTAs,” *Frequenz*, vol. 60, pp. 241-245, 2006.
- [15] S. Ozoguz, A. Toker and C. Acar, “Cascadable current-mode multipurpose filters employing current differencing
- [16] buffered amplifier (CDBA),” *International journal of electronics and Communications (AEU)*, vol. 56, no. 2, pp.67-72, 2000.
- [17] A. Ü. Keskin and E. Hancioglu, “Current-mode multifunction filter using two CDBAs,” *International journal of electronics and Communications (AEU)*, vol. 59,no. 8, pp: 495-498, 2005.
- [18] L. C. Thomas, “The biquad: part I – some practical design considerations,” *Proc. IEEE Trans on Circuit Theory*, vol.CT-18, pp. 350-357.
- [19] L. C. Thomas, “The biquad: part II – a multipurpose active filtering system,” *Proc. IEEE Trans on Circuit Theory*, vol.CT-18, pp. 358-361
- [20] N. Herencsar, J. Koton, and K. Vrba, “Electronically tunable phase shifter employing currentcontrolled current follower transconductance amplifiers (CCCFTAs)”, in *Proc. of the 32th Int.Conf. on Telecommu-nications and Signal Processing, TSP 2009*, Dunakiliti, Hungary, pp. 54–57, 2009.
- [21] D. R. Frey, Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering. *IEE Proceeding of Circuit Devices Systems*, 1993, 140: 406-416.