

การสังเคราะห์วงจรขยายในโหมดกระแสด้วย VDTA เพียงตัวเดียว

A Synthesis Current-mode Amplifier Employing Single VDTA

พุทธารุฒิ ลิขิตธร¹ ชิตสิริวัตร วิชิต¹ และสมชาย ศรีสกุลเดียว¹

Received: June, 2014; Accepted: April, 2015

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรขยายในโหมดกระแสด้วย VDTA เพียงตัวเดียว ที่มีลักษณะเด่นคือใช้อุปกรณ์แอคทีฟ VDTA เพียงตัวเดียวปราศจากอุปกรณ์พาสซีฟ สามารถปรับอัตราขยายได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ มีผลกระทบกับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยที่ 27 - 100°C ผลการจำลองด้วย PSpice พบว่าวงจรสามารถทำงานได้สอดคล้องตามที่คาดการณ์ไว้ในทฤษฎี มีผลตอบสนองทางความถี่เกือบ 100 MHz มีอัตราการใช้พลังงาน 0.58 mW ที่แหล่งจ่าย 1.5 โวลต์ อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้งานในการสื่อสารข้อมูลได้อีกด้วย

คำสำคัญ : วงจรขยาย; โหมดกระแส; วงจรขยายความนำผลต่างแรงดัน

Abstract

This article describes a synthesis current-mode amplifier employing single VDTA (Voltage Differencing Transconductance Amplifier). Their features are following: using VDTA only without any passive elements, electronically controllable, and non-effect in low temperature at 27 - 100°C. The simulation results obtained from PSpice are accordance with the theoretical predictions. The proposed circuit has frequency responds of more 100 MHz and power consumption 0.58 mW at 1.5 V supply voltage. It can be application to the data communication.

Keywords: Amplifier; Current-mode; VDTA

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
E-mail : somchaikorat2008@hotmail.com

บทนำ

วงจรขยายสัญญาณกระแสได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่ต้องการใช้กำลังไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟต่ำ เช่น ระบบสื่อสาร เครื่องมือวัด เป็นต้น (Palmisano G. et al., 1999; Kaewdang K. et al., 2005) ทั้งนี้เนื่องจากเริ่มตั้งแต่ในทศวรรษที่ผ่านมา มีความพยายามที่จะลดแรงดันไฟเลี้ยงในวงจรและระบบอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องมาจากความต้องการที่จะนำมาใช้กับอุปกรณ์แบบพกพา หรืออุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายที่ต้องใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลังงาน ดังนั้นจึงมีการใช้เทคนิคการทำงานในโหมดกระแส (Current-mode) ซึ่งมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับเทคนิคการทำงานในโหมดแรงดัน ได้แก่ มีช่วงพลัสพลวัตกว้าง (Larger Dynamic Range) มีแบนด์วิดท์กว้าง และบริโภคกำลังงานต่ำ (Toumazou C. et al., 1990; Hilar C. S. and Laopoulos T. N., 1996)

สำหรับอุปกรณ์ที่สามารถนำมาออกแบบและสร้างเป็นวงจรขยายกระแสได้นั้น ในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในอุปกรณ์เหล่านั้นที่ได้รับความนิยม คือ วงจรขยายความนำถ่ายโอน (Operational Transconductance Amplifier: OTA) เนื่องจากในปัจจุบันได้ถูกผลิตออกมาจำหน่ายเป็นวงจรรวมหรือไอซีอย่างแพร่หลาย เช่น เบอร์ CA3800, LT1228, LM13600 เป็นต้น โดยวงจรขยายความนำถ่ายโอนเป็นอุปกรณ์แอคทีฟ (Active Element) ที่เหมาะในการนำไปออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก (Yang S. H. et al., 2005) ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถควบคุมอัตราขยายทางด้านเอาต์พุตได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Minae S. et al., 2003) มีแบนด์วิดท์กว้างเมื่อเทียบกับออปแอมป์ (Surakamponorn W. et al., 1999) เป็นต้น

นอกจากวงจรขยายความนำถ่ายโอนแล้ว ยังมีอุปกรณ์แอคทีฟอีกชนิดอื่น ๆ ที่สามารถออกแบบให้เป็นวงจรขยายกระแสได้ เช่น CCII (Srigul W. et al., 2012) CCCII (Srisakultiew S. and Siripruchyanun M., 2010) CFA (Srisakultiew S. et al., 2010) CDTA (Biolek D., 2003) CCTA (Srisakultiew S. et al., 2014) ต่างก็สามารถออกแบบให้เป็นวงจรขยายกระแสได้เช่นกัน แต่ก็ยังมีข้อด้อยของวงจรดังต่อไปนี้คือ

1. ใช้อุปกรณ์แอคทีฟ เป็นจำนวนมาก (Srigul W. et al., 2012; Srisakultiew S. and Siripruchyanun M., 2010; Srisakultiew S. et al., 2010; Biolek D., 2003; Srisakultiew S. et al., 2014)
2. ต้องต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ (Srigul W. et al., 2012; Srisakultiew S. and Siripruchyanun M., 2010; Srisakultiew S. et al., 2010; Biolek D., 2003; Srisakultiew S. et al., 2014))
3. ไม่สามารถปรับอัตราขยายได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Srigul W. et al., 2012)

วงจรขยายความนำจากผลต่างแรงดัน (Voltage Differencing Transconductance Amplifier: VDTA) เป็นอุปกรณ์แอคทีฟที่มีการนำเสนอมาไม่นาน (Yesil A. et al., 2011) มีลักษณะเด่นของตัวอุปกรณ์คือ ความแตกต่างของแรงดันที่ขาอินพุต (V_{v_p}, V_{v_n}) จะส่งผ่านกระแสที่ขา z โดยอัตราส่งผ่านความนำกระแสด้วยค่าความนำกระแสตัวแรก และแรงดันตกคร่อมที่ z ยังทำให้ส่งผ่านกระแสไปยังขา $x+$ และ $x-$ ด้วยค่าความนำกระแสตัวที่สอง อีกทั้งค่าความนำกระแสยังสามารถควบคุมได้ด้วย

วิธีการอิเล็กทรอนิกส์จากกระแสไปแอสจากภายนอก จึงทำให้มีการนำเอาอุปกรณ์นี้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรต่าง ๆ มากมาย เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรกรองความถี่ เป็นต้น

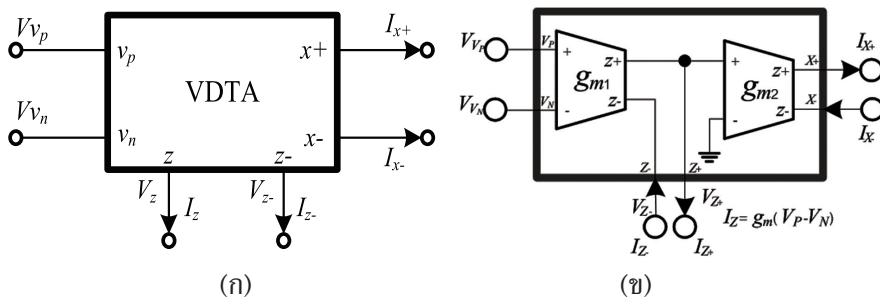
จุดมุ่งหมายของบทความวิจัยนี้ เพื่อสังเคราะห์วงจรขยายในโหมดกระแสด้วย VDTA เพียงตัวเดียวที่มีลักษณะเด่นคือ ใช้อุปกรณ์แอคทีฟ VDTA เพียงตัวเดียว ปราศจากอุปกรณ์พาสซีฟใด ๆ มาต่อรวม มีเอาต์พุตโวลต์และกระแสสูงสามารถควบคุมอัตราขยายได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสื่อสารข้อมูลได้

วงจรและหลักการทำงานของวงจร

1. อุปกรณ์แอคทีฟที่ใช้ประกอบวงจรมำเสนอ

เนื่องจากวงจรที่นำเสนอประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก คือ VDTA ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของ VDTA พอสังเขปในปี 2008 Dr.Biolek (Biolek D., 2003) ได้นำเสนออุปกรณ์แอคทีฟนี้ ที่สามารถเขียนสัญลักษณ์ได้ดังรูปที่ 1 ที่แสดงถึงตำแหน่งขาของอุปกรณ์ ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ขา V_p, V_n, z และ x ของ VDTA สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเมตริกซ์ในสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} I_z \\ I_{x+} \\ I_{x-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{m1} & -g_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & g_{m2} \\ 0 & 0 & g_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_z \end{bmatrix} \quad (1)$$



รูปที่ 1 (ก) สัญลักษณ์ และ (ข) วงจรสมมูลของ VDTA

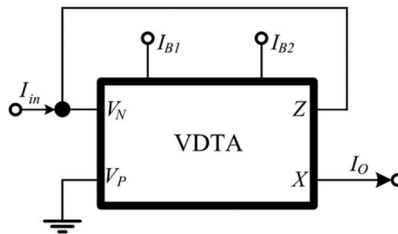
จากสมการที่ (1) g_{m1} และ g_{m2} คือค่าความนำกระแสของ VDTA ตามลำดับที่เกิดจากผลต่างแรงดันที่ขาอินพุต V_p และ V_n ซึ่งเป็นการส่งผ่านความนำกระแสที่เอาต์พุต z และ $z-$ จะเป็นค่าความนำกระแสในส่วนที่หนึ่ง g_{m1} แรงดันที่ตกคร่อม z ก็จะเป็นการส่งผ่านความนำกระแสส่วนที่สองที่ขา $x+$ และ $x-$ โครงสร้างภายในของ VDTA เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพรว่า ดังนั้นค่า g_m สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2)

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

เมื่อ V_T คือศักดาความร้อน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 26 mV ที่อุณหภูมิห้อง

2. หลักการออกแบบวงจรขยายในโหมดกระแสนำเสนอ

พิจารณาวงจรสมมูลของ VDTA แล้วสามารถออกแบบวงจรขยายในโหมดกระแสได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรขยายโหมดกระแสที่นำเสนอ

และจากคุณสมบัติของอุปกรณ์ในสมการที่ (1) จะได้

$$I_Z = g_{m1}(V_{V_P} - V_{V_N}) \quad (3)$$

และ

$$I_X = g_{m2}V_Z \quad (4)$$

จากรูปที่ 2 $V_N = V_Z$

$$I_{in} + I_Z = 0 \quad (5)$$

จะได้

$$I_{in} = -I_Z \quad (6)$$

จากสมการที่ (4) จะได้

$$V_Z = -\frac{I_Z}{g_{m1}} \quad (7)$$

ฉะนั้น เมื่อแทน V_Z ลงในสมการที่ (4) จะได้

$$I_X = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} I_{in} \quad (8)$$

เมื่อ $I_X = I_O$ จะได้

$$I_O = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} I_{in} \quad (9)$$

อัตราขยายของวงจรหาได้

$$\frac{I_O}{I_{in}} = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} \quad (10)$$

$$\text{แทน } g_m = \frac{I_B}{2V_T}$$

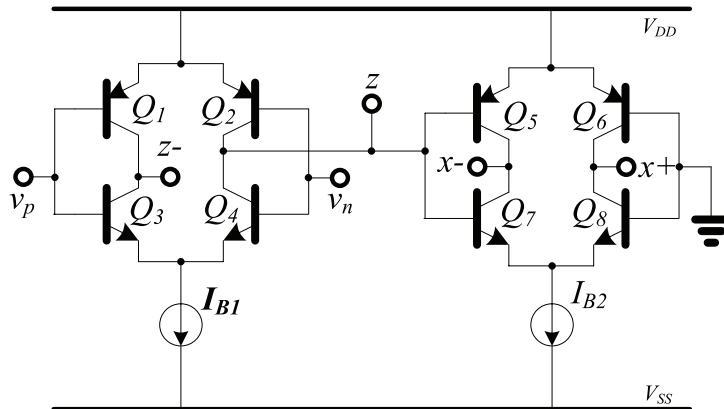
สามารถเขียนสมการที่ (10) ใหม่ได้

$$\frac{I_O}{I_{in}} = \frac{I_{B2}}{I_{B1}} \quad (11)$$

จากสมการที่ (10) และ (11) จะเห็นได้ว่ากระแสเอาต์พุตที่ได้จากสัดส่วนของ I_{B2} และ I_{B1} ที่สามารถปรับอัตราขยายได้ด้วยการปรับกระแส หรือกล่าวได้ว่าสามารถปรับอัตราขยายได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์ และอัตราการขยายของวงจรไม่ขึ้นกับอุณหภูมิเนื่องจากไม่มีค่าของ V_T มาเกี่ยวข้องในสมการ

ผลการจำลองการทำงาน

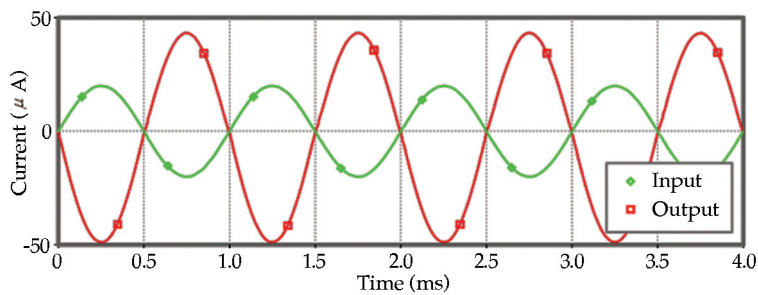
เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ จึงได้จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice สำหรับทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร ได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของบริษัท AT&T (Frey D. R., 1993) จากรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างภายในของ VDTA เชื่อมใช้ในการจำลองการทำงานนี้ กำหนดให้แหล่งจ่ายของวงจร คือ $\pm 1.5V$.



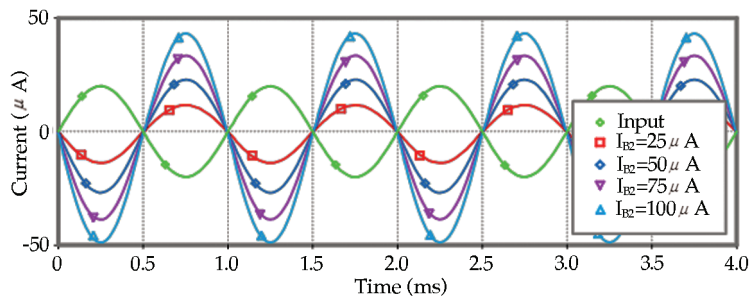
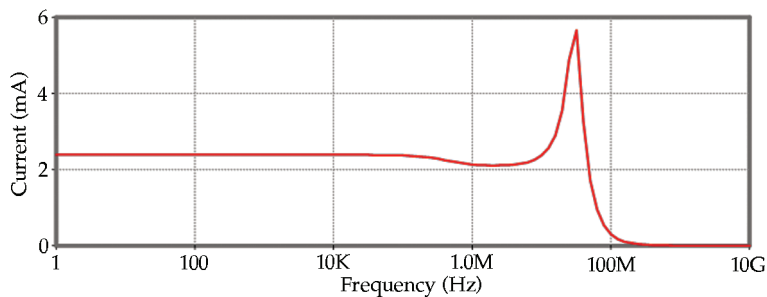
รูปที่ 3 โครงสร้างภายในของ VDTA

ผลในรูปที่ 4 เป็นการจำลองการทำงานของวงจรขยายในโหมดกระแส เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นกระแสสัญญาณไซน์ (I_{sin}) ขนาด $20 \mu A$ ที่ความถี่ $1 KHz$ ให้กระแสไบแอสที่ $I_{B1}=50 \mu A$ และ $I_{B2}=100 \mu A$ และเพื่อให้สะดวกในการดูผลจำลองจึงให้เอาต์พุตเห็นเป็นค่าติดลบ (กลับสัญญาณ)

ผลในรูปที่ 5 เป็นการจำลองอัตราการขยายกระแสด้วยการป้อนอินพุตเป็นกระแส I_{sin} ขนาด $20 \mu A$ ที่ความถี่ $1 KHz$ และกำหนดให้ $I_{B1}=50 \mu A$ และปรับไบแอส $I_{B2}=25 \mu A, 50 \mu A, 100 \mu A$ และ $150 \mu A$ จะเห็นได้ว่าอัตราการขยายสัญญาณสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับกระแสไบแอสจากภายนอก หรือที่เรียกอีกนัยหนึ่งว่าการปรับอัตราการขยายด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์เช่นกัน เพื่อให้ง่ายในการดูผลลัพธ์จึงได้ทำการกลับสัญญาณเอาต์พุต ในรูปที่ 6 เป็นการทดสอบผลตอบสนองความถี่ของวงจรขยายกระแส จะเห็นได้ว่าวงจรมีผลตอบสนองทางความถี่เกือบ $100 MHz$

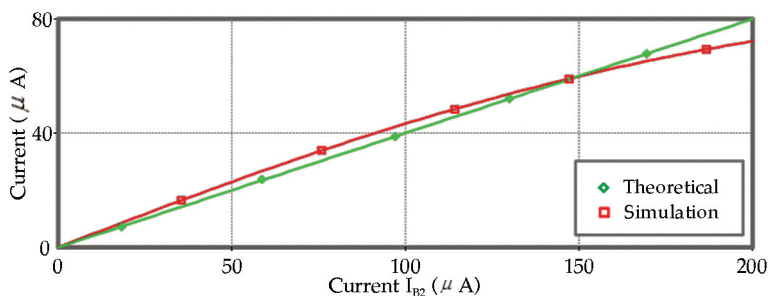


รูปที่ 4 เปรียบเทียบอัตราการขยายอินพุตกับเอาต์พุต

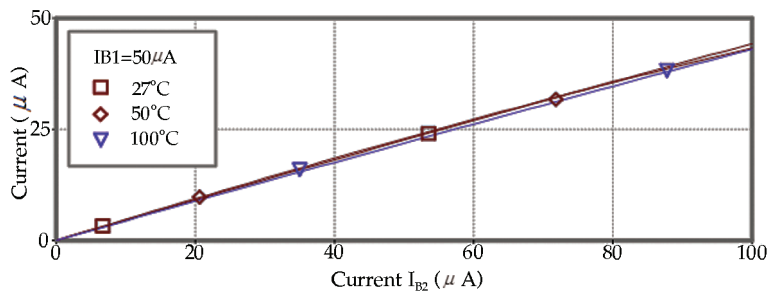
รูปที่ 5 ปรับอัตราขยายด้วยกระแสไบแอส I_{B2} 

รูปที่ 6 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรที่นำเสนอ

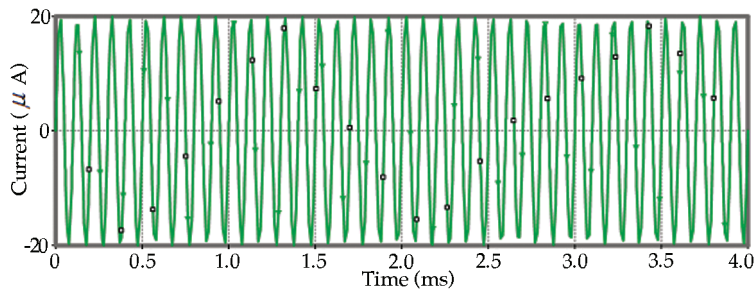
ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 7 เพื่อแสดงให้เห็นคุณสมบัติของวงจรที่นำเสนอด้วยการเปรียบเทียบการจำลองการทำงานกับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (11) เมื่อทำการคงที่ I_{B1} และปรับเปลี่ยนค่ากระแส I_{B2} จาก $0 \mu A$ ถึง $200 \mu A$ จะเห็นได้ว่าผลสอดคล้องกับทฤษฎีที่วิเคราะห์ไว้ รูปที่ 8 แสดงอัตราขยายเมื่อทำการเพิ่มค่ากระแส I_{B2} เริ่มจาก $0 - 100 \mu A$ พร้อมกับเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง $27 - 100^\circ C$ จะเห็นได้ว่ามีผลกระทบเพียงเล็กน้อย ส่วนในรูปที่ 9 เป็นการจำลองการทำงานของวงจรให้เป็นวงจรกระแสสัญญาณด้วยการป้อนอินพุตเป็นกระแส I_{sin} ขนาด $20 \mu A$ ที่ความถี่ 10 KHz ดังรูปที่ 9 (ก) ให้ $I_{B1} = 50 \mu A$ และ I_{B2} เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่มีขนาด $20 - 100 \mu A$ ความถี่ 1 KHz ดังรูปที่ 9 (ข) ส่วนรูปที่ 9 (ค) เป็นผลการจำลองที่วัดได้ที่เอาต์พุตของวงจร จะได้เป็นเหมือนกับวงจรกระแสสัญญาณทางแอมป์จูดในการสื่อสารข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 10



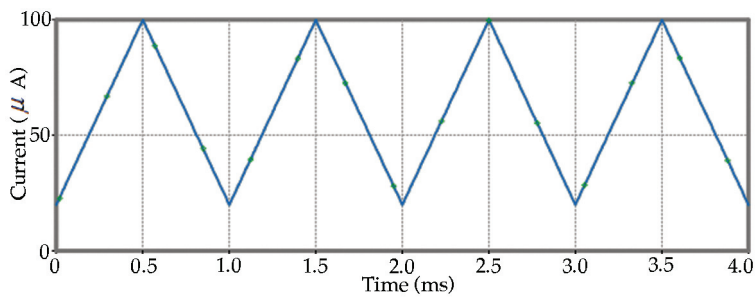
รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับค่าที่คำนวณได้



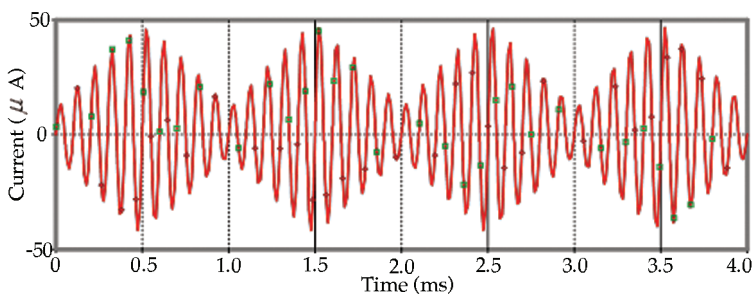
รูปที่ 8 อัตราขยายเมื่อปรับ I_{B2} และอุณหภูมิ 27°C, 50°C และ 100°C



(ก) อินพุตที่ป้อนเข้าเป็น I_{sin} ขนาด 20 μA

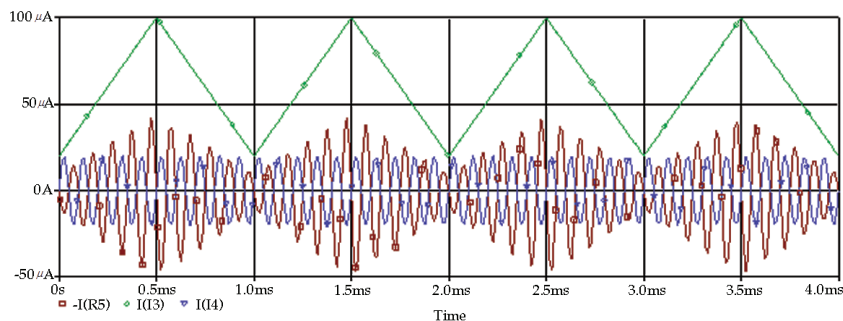


(ข) สัญญาณที่ป้อนเข้า I_{B2}



(ค) ผลการจำลองที่ได้จากการที่ป้อนอินพุต รูป (ก) และไ้ไบแอสดังรูป (ข)

รูปที่ 9 ประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรกล้ำสัญญาณแบบแอมพลิฟิเคชัน



รูปที่ 10 ผลการประยุกต์เป็นวงจรกล้ำสัญญาณแบบแอมพลิฟาย

สรุป

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรขยายในโหมดกระแสด้วย VDTA เพียงตัวเดียว ซึ่งมีคุณลักษณะเด่นคือ สามารถปรับอัตราขยายได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระแสไบแอส I_{B1} และ I_{B2} ใช้เพียงอุปกรณ์ VDTA เพียงตัวเดียว ปรมาจากอุปกรณ์พาสซีฟมาต่อรวม ผลการจำลองการทำงานสอดคล้องทางทฤษฎี มีการตอบสนองความถี่เกือบ 100MHz นอกจากจะเป็นวงจรขยายสัญญาณในโหมดกระแสทั้งแบบตามสัญญาณ และกลับสัญญาณ ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรกล้ำสัญญาณแบบแอมพลิฟายได้ด้วย มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน 0.58mW ที่แหล่งจ่าย $\pm 1.5V$

References

- Biolek D. (2003). CDTA building for current-mode analog signal processing. In *Proceeding of European conference theory and design*. ECC TD03
- Frey D. R. (1993). Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering. In *IEE Proc. Circuit Devices Syst.* Vol. 140. pp. 406-410
- Hilas C. S. and Laopoulos T. N. (1996). Circuit design: a study on voltage-mode to current-mode conversion technique. In *Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference. MELECON'96*. Bari. Italy. May 13-16. pp. 1309-1312.
- Kaewdang K., Surakamptom W. and Fujii N., (2005). A design of controllable gain class B push-pull current amplifier. In *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. 2005. ISCAS 2005. Vol. 2. pp. 1577-1580
- Minae S., Topcu G. and Cicekoglul O., (2003). Active only integrator and differentiator with tunable time constants. *INT. J. Electronics*. Vol. 90. No. 9. pp. 581-588
- Palmisano G., Palumbo G. and Pennisi S., (1999). *CMOS Current Amplifiers*. Kluwer Academic Publishers.

- Srigul W. Srisakultiew S. and Siriphuyanun M. (2012). A synthesis current-mode PI, PD and PID controller using CCII. In *Proceeding of 4th Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET-2012)*. Nongkai. Thailand.
- Srisakultiew S. and Siripruchyanun M. (2010). A synthesis of current-mode PI, PD and PID controllers employing CCCIs. In *Proceeding of 3th NCTechd. Industrial Education Faculty. KMUTNB. Bangkok*. pp. 63-68
- Srisakultiew S., Lawanpisut S. and Siripruchyanun M. (2010). A synthesis of current-mode PI, PD and PID controllers employing CFAs. In *Proceeding of KU Con 48*. Kasetsart University. Bangkok. pp. 28-35
- Srisakultiew S., Lawanpisut S. and Siripruchyanun M. (2014). A synthesis of low component count for current-mode PI, PD and PID controller employing CCTA. *37th International conference on telecommunication and signal proceeding (TSP-2014)*. Germany. pp. 409-413
- Surakamponporn W., Riewruja V., Kumwachara K., Surawatpunya C. and Anuntahirunrat K. (1999). Temperature-insensitive voltage-to-current converter and its applications. In *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 48. No. 6. pp. 1270-1277
- Toumazou C., Lidgley F. J. and Haigh D. G. (1990). *Analogue IC design: the current-mode approach*. Peregrinus, London
- Yang S. H., Kim K. H., Kim Y. H., You Y. and Cho K. R. (2005). A novel CMOS operational transconductance amplifier based on a mobility compensation technique. In *IEEE Transactions on Circuits and system II: Express Briefs*. Vol. 52. No. 1. pp. 37-41
- Yesil A., Kacar F. and Kuntman H. (2011). "New simple CMOS realization of voltage differencing transconductance amplifier and its RF filter application. *Radioengineering*. Vol. 20. No. 3. pp. 632-637