

# วงจรถอดรากที่สองและวงจรรยกกำลังสองโหมตกระแสที่ใช้โอทีเอ

## Current-Mode Square-Rooter and Squarer Based on OTAs

วิภาวัลย์ นาคทรัพย์<sup>1</sup> วิวัฒน์ กิรานนท์<sup>2</sup> วิภา แสงพิลิตี<sup>2</sup> และ ลีทิพร เพ็ชรกิจ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม โทร.024570068 ต่อ 123 E-mail : wipavann@gmail.com

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรถอดรากที่สองและวงจรรยกกำลังสองในโหมตกระแสที่ใช้โอทีเอ โดยแต่ละวงจรรประกอบด้วยโอทีเอเพียงสองตัวและไม่ต้องใช้อุปกรณ์พาสซีฟจากภายนอกเลยทำให้วงจรมีโครงสร้างที่ง่าย อัตราการขยายของแต่ละวงจรมีค่าปรับค่าโดยการปรับค่ากระแสไบแอสของโอทีเอเพียงตัวเดียวและอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิยังมีผลต่อวงจรมีน้อยมาก ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์สอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีเป็นอย่างดี

### Abstract

This paper presents current mode square-rooter and squarer circuits based on the use of operational transconductance amplifiers (OTAs). Each of the proposed circuits employs only two OTAs as its active circuit elements and does not require any external passive circuit elements results in a simple circuit structure. The gain of each circuits can be easily adjusted by varying external bias current of only one OTA. The proposed circuits performances are shown to be insensitive to temperature variation. Computer simulation results of the circuits show good agreement with theoretical analysis.

### 1. บทนำ

วงจรถอดรากที่สองและวงจรรยกกำลังสองมีประโยชน์มากมายในการประมวลผลสัญญาณและมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสาร ระบบการวัด ระบบเครื่องมือวัด เป็นต้น วงจรถอดรากที่สองและวงจรรยกกำลังสองสามารถสร้างได้ทั้งในโหมตแรงดันและโหมตกระแส สำหรับในโหมตแรงดันนั้นนิยมสร้างขึ้นจากโอซีวงจรรวมหรือโอทีเอหรือออปแอมป์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์หลักทำงานร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ [1-3] ส่วนโหมตกระแสนิยมสร้างจากโอทีเอหรือวงจรสายพานกระแส แต่ในปัจจุบันนี้มักจะออกแบบวงจรให้ทำงานในโหมตกระแสมากกว่าโหมตแรงดันเนื่องจากให้ย่านความถี่ใช้งานได้กว้างกว่า [4] จึงได้มีการนำเสนองจรต่างๆในโหมตกระแสกันอย่างแพร่หลาย โดยสามารถหลีกเลี่ยงการใช้อุปกรณ์พาสซีฟได้ด้วย [5-6]

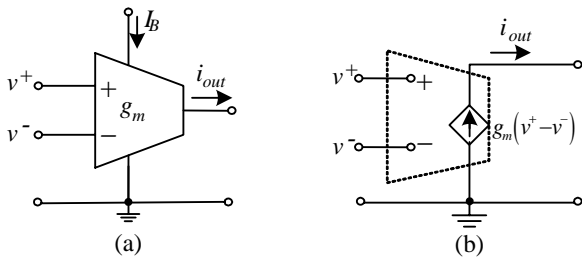
วงจรรโอทีเอเป็นอุปกรณ์แอคทีฟพื้นฐานที่นิยมใช้เนื่องจากสามารถปรับค่าทรานสดักชันได้เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์นั้นคือการปรับค่ากระแสไบแอสของโอทีเอ ทำให้ลดจำนวนการใช้อุปกรณ์พาสซีฟลงได้และปัจจุบันนี้วงจรรโอทีเอได้ผลิตเป็นไอซี เช่น เบอร์ LM13600 และเบอร์ CA3080 เป็นต้น [7-8] จึงทำให้มีความสะดวกในการนำไปใช้งานและมีโครงสร้างภายในที่ง่ายกว่าวงจรสายพานกระแส ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำเสนองจรถอดรากที่สองและวงจรรยกกำลังสองในโหมตกระแสโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานสดักชันกับกระแสไบแอสของโอทีเอเป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลัก ซึ่งในแต่ละวงจรถอดรากที่สองและวงจรรยกกำลังสองนี้จึงทำให้งจรที่

นำเสนอที่มีโครงสร้างที่ง่าย สามารถปรับค่าอัตราขยายของวงจรด้วยการปรับค่ากระแสไบแอสของโอทีเอ อีกทั้งยังสามารถลดอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อเอาต์พุตของวงจรได้ด้วย

## 2. หลักการและวงจร

### 2.1 โอทีเอ

ในบทความนี้ได้นำโอทีเอมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นวงจรถอดรึกที่สองและวงจรยกกำลังสองทำงานในโหมดกระแสโดยไม่ต้องใช้ตัวต้านทานจากภายนอก โอทีเอทางอุดมคติเป็นแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage controlled current source: VCCS) และค่าอินพุตอิมพีแดนซ์และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เป็นอนันต์ กระแสเอาต์พุตของโอทีเอถูกควบคุมด้วยแรงดันอินพุตผลต่างและค่าทรานสคอนดักแตนซ์ สัญลักษณ์และวงจรสมมูลของวงจรโอทีเอทางอุดมคติแสดงดังรูปที่ 1(ก) และ 1(ข) ตามลำดับ



รูปที่ 1 วงจรโอทีเอทางอุดมคติ  
(ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

จากรูปที่ 1 กระแสเอาต์พุต  $i_{out}$  ของโอทีเอที่สัมพันธ์กับแรงดันอินพุตผลต่างและค่าทรานสคอนดักแตนซ์ได้ตั้งสมการ (1)

$$i_{out} = g_m (v^+ - v^-) \quad (1)$$

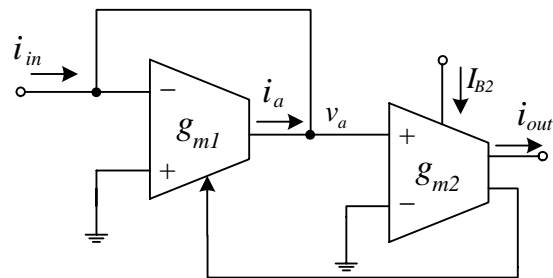
เมื่อ  $v^+$  และ  $v^-$  คือ แรงดันอินพุตที่ขั้วบวกและขั้วลบของโอทีเอตามลำดับ และ  $g_m$  คือค่าอัตราทรานสคอนดักแตนซ์สำหรับโอทีเอที่สร้างจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ จะมีค่าอัตราทรานสคอนดักแตนซ์ตั้งสมการ (2)

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

เมื่อ  $I_B$  คือกระแสไบแอสของโอทีเอ และ  $V_T$  คือแรงดันเชิงอุณหภูมิมีค่าประมาณ 26 mV ที่อุณหภูมิ 27 °C ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ  $T$  นั่นคือ  $V_T = KT/q$  เมื่อ  $K$  คือค่าคงที่โบลท์ซมาน (Boltzman's constant) เท่ากับ  $1.380658 \times 10^{-23}$  จูล/เคลวิน และ  $q$  คือจำนวนของประจุ  $6.24 \times 10^{18}$  ตัว

### 2.2 วงจรถอดรึกที่สอง

จากคุณสมบัติของโอทีเอที่กล่าวไว้ข้างต้นสามารถนำมาประกอบรวมเป็นวงจรถอดรึกที่สองได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรถอดรึกที่สองที่นำเสนอ

พิจารณาที่โอทีเอตัวที่ 2 หาความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุต  $i_{out}$  และแรงดันอินพุต  $V_a$  ได้ดังนี้

$$i_{out} = g_{m2} v_a \quad (3)$$

พิจารณาที่โอทีเอตัวที่ 1 KCL ที่โหนด  $v_a$  ได้กระแสเอาต์พุต  $i_a$  ดังนี้

$$\begin{aligned} i_a &= -i_{in} \\ &= -g_{m1} v_a \end{aligned} \quad (4)$$

หรือ 
$$v_a = \frac{i_{in}}{g_{m1}}$$

แทนสมการ (4) ในสมการ (3)

$$i_{out} = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} i_{in} \quad (5)$$

แทนค่า  $g_m = \frac{I_B}{2V_T}$  จากสมการ (2) ลงในสมการ (5)

$$i_{out} = \left( \frac{I_{B2}}{2V_T} \right) \left( \frac{2V_T}{I_{B1}} \right) i_{in} \quad (6)$$

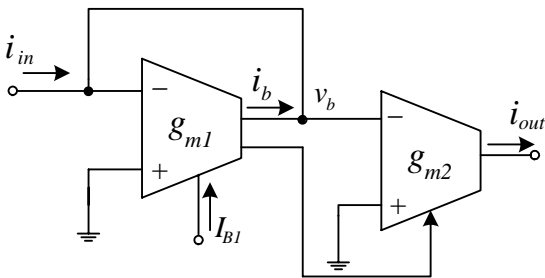
และแทนค่า  $I_{B1} = i_{out}$  ในสมการ (6) จะได้กระแสเอาต์พุตของวงจรถอดรากที่สองเป็นดังนี้

$$i_{out} = \sqrt{I_{B2}} \sqrt{i_{in}} \quad (7)$$

จากสมการ (7) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเอาต์พุต  $i_{out}$  เป็นฟังก์ชันการถอดรากที่สองของอินพุต  $i_{in}$  และสามารถปรับขนาดของสัญญาณเอาต์พุต  $i_{out}$  ได้โดยการปรับค่ากระแสไบแอส  $I_{B2}$  ของโอทีเอตัวที่ 2 นอกจากนี้ยังมีจุดสำคัญที่ควรสังเกตคือค่าแรงดันเชิงอุณหภูมิ  $V_T$  ถูกตัดออกไปจากสมการ (7) ทำให้ค่ากระแสเอาต์พุตไม่เป็นฟังก์ชันของแรงดันเชิงอุณหภูมิ ดังนั้นการถอดรากที่สองของสัญญาณอินพุตจึงเป็นอิสระจากอุณหภูมิในทางทฤษฎี และสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยอาศัยการปรับกระแสไบแอส  $I_{B2}$

### 2.3 วงจรรยกกำลังสอง

ในทำนองเดียวกันกับวงจรถอดรากที่สองสามารถนำคุณสมบัติของโอทีเอมาประกอบรวมเป็นวงจรรยกกำลังสองได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรรยกกำลังสองที่นำเสนอ

สำหรับการวิเคราะห์ท่วงจรยกกำลังสองที่แสดงในรูปที่ 3 ทำได้ในลักษณะเดียวกับวงจรถอดรากที่สองที่แสดงในรูปที่ 2 กล่าวคือเมื่อพิจารณาที่โอทีเอตัวที่ 2 ได้ว่า

$$i_{out} = -g_{m2} v_b \quad (8)$$

ที่โอทีเอตัวที่ 1 KCL ที่โหนด  $v_b$  ได้กระแสเอาต์พุต  $i_b$

$$\begin{aligned} i_b &= -i_{in} \\ &= -g_{m1} v_b \end{aligned}$$

หรือ 
$$v_b = \frac{i_{in}}{g_{m1}} \quad (9)$$

แทนสมการ (9) ในสมการ (8)

$$i_{out} = -\frac{g_{m2}}{g_{m1}} i_{in} \quad (10)$$

แทนค่า  $g_m = \frac{I_B}{2V_T}$  ในสมการ (10)

$$i_{out} = -\left( \frac{I_{B2}}{2V_T} \right) \left( \frac{2V_T}{I_{B1}} \right) i_{in} \quad (11)$$

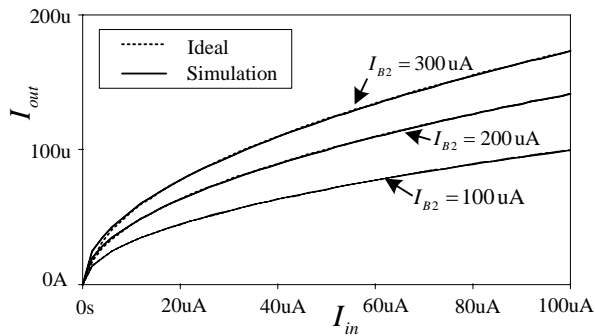
แทน  $I_{B2} = -i_{in}$  ในสมการ (11) จะได้แรงดันเอาต์พุตของวงจรรยกกำลังสองเป็นดังนี้

$$i_{out} = \frac{i_{in}^2}{I_{B1}} \quad (12)$$

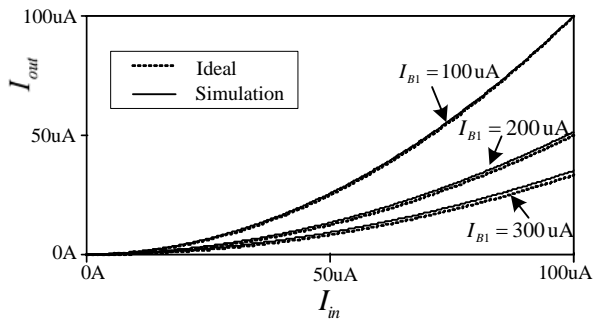
จากสมการ (12) จะเห็นได้ว่าเอาต์พุต  $i_{out}$  เป็นฟังก์ชันการยกกำลังสองของอินพุต  $i_{in}$  และสามารถปรับขนาดของสัญญาณเอาต์พุต  $i_{out}$  ได้โดยการปรับค่ากระแสไบแอส  $I_{B1}$  ของโอทีเอตัวที่ 1 และค่ากระแสเอาต์พุตไม่เป็นฟังก์ชันของแรงดันเชิงอุณหภูมิ ดังนั้นโครงสร้างวงจรรยกกำลังสองจึงเป็นวงจรรยกกำลังสองของสัญญาณกระแสที่สามารถปรับค่าอัตราขยายของวงจรได้ด้วยกระแส

### 3. ผลการจำลองการทำงาน

เพื่อยืนยันหลักการที่นำเสนอได้จำลองการทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์ที่แสดงและวงจรยกกำลังสองในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม Pspice เลือกใช้ไอทีเอเบอร์ LM13600 ใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงมีค่าเท่ากับ  $\pm 12\text{ V}$  ทำการจำลองเพื่อหาคุณลักษณะการถ่ายโอนทางไฟตรงหรือความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุต  $i_{out}$  และกระแสอินพุต  $i_{in}$  ที่มีค่ากระแสไบอัส  $I_B$  ค่าต่างๆ กัน กำหนดให้กระแสอินพุตมีค่าตั้งแต่  $0 - 100\text{ uA}$  ได้ผลการจำลองของวงจรทรานซิสเตอร์ที่แสดงแสดงดังรูปที่ 4 ส่วนของวงจรยกกำลังสองแสดงดังรูปที่ 5



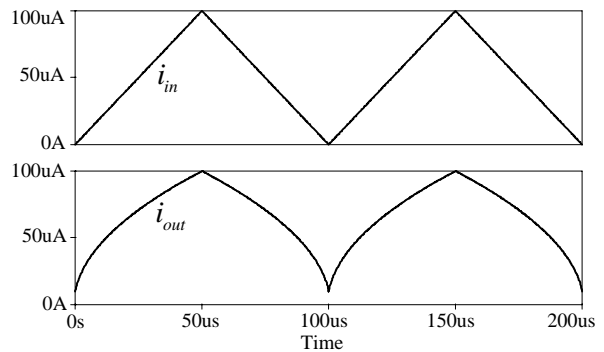
รูปที่ 4 คุณลักษณะการถ่ายโอนทางไฟตรงของวงจรทรานซิสเตอร์ที่แสดง



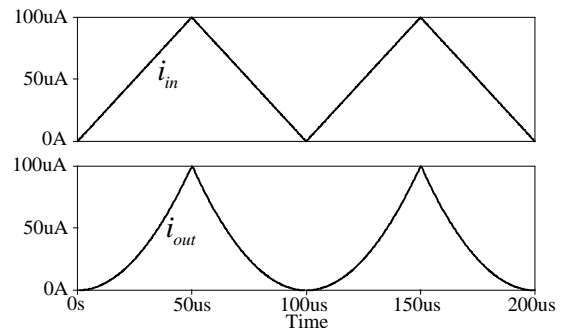
รูปที่ 5 คุณลักษณะการถ่ายโอนทางไฟตรงของวงจรยกกำลังสอง

จากผลการจำลองที่แสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ทำให้ทราบว่าค่าการถ่ายโอนของสัญญาณสามารถปรับได้โดยการเปลี่ยนค่ากระแสไบอัส  $I_B$  ของไอทีเอ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

ทำการจำลองคุณสมบัติทางพลวัตของวงจร โดยป้อนสัญญาณกระแสอินพุตเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมค่าบวกที่มีขนาดเท่ากับ  $100\text{ uA}$  เลือกใช้ค่ากระแสไบอัส  $I_{B2} = 100\text{ uA}$  ได้ผลการจำลองการทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์ที่แสดงดังในรูปที่ 6 ส่วนผลการจำลองการทำงานของวงจรยกกำลังสองแสดงดังรูปที่ 7 โดยเลือกใช้ค่ากระแสไบอัส  $I_{B1} = 100\text{ uA}$



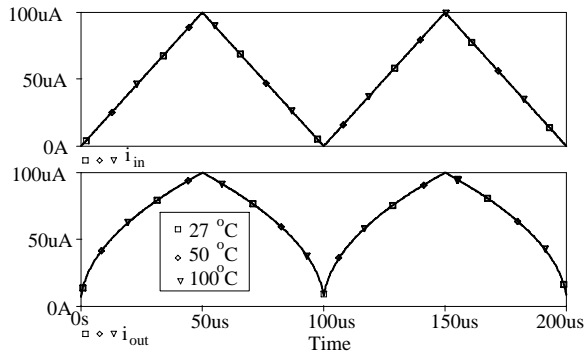
รูปที่ 6 ผลการจำลองของวงจรทรานซิสเตอร์ในโดเมนเวลาเมื่ออินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม



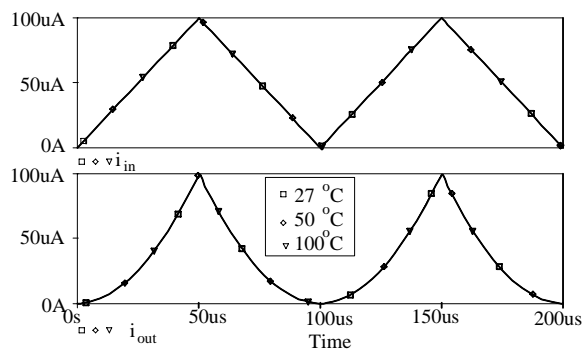
รูปที่ 7 ผลการจำลองของวงจรยกกำลังสองในโดเมนเวลาเมื่ออินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม

เพื่อยืนยันว่าการทำงานของทั้งวงจรยกกำลังสองและวงจรทรานซิสเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรโดยกำหนดค่าอุณหภูมิเป็น  $27^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  และ  $100^\circ\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งวงจรทรานซิสเตอร์ที่แสดงใช้กระแสไบอัส  $I_{B2} = 100\text{ uA}$  ได้ผลการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 8 ส่วนของวงจรยกกำลังสองใช้กระแส

ไบอัส  $I_{B2} = 100 \mu\text{A}$  ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 9 และจากรูปที่ 8 และรูปที่ 9 พบว่าการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิไม่มีผลต่อวงจร



รูปที่ 8 ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของวงจรออดรากที่สอง



รูปที่ 9 ผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของวงจรออดรากที่สอง

#### 4. บทสรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอวงจรออดรากที่สองและวงจรยกกำลังในโหมดกระแสที่สร้างขึ้นโดยใช้โอทีเอเพียงอย่างเดียวที่เป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลักโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์พาสซีฟ วงจรที่นำเสนอมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนสามารถปรับค่าพารามิเตอร์หรือค่าอัตราขยายของวงจรออดรากที่สองและวงจรยกกำลังสองนี้ได้โดยการปรับค่าด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์และวงจรมีเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ผลการจำลองการทำงานของวงจรสามารถยืนยันด้วยทางทฤษฎี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Analog Devices, "Internally Trimmed Integrated Circuit Multiplier AD532", <http://www.analog.com>, 2001.
- [2] T. K. Sen, A. Ray, and B. N. Ray, "An Arbitrary Power-Law Device Based On Operational Transconductance Amplifiers", IEEE Transaction on Instrument and Measurement, Vol.42, No.5, October 1993, pp. 948-952.
- [3] W. Kiranon, C. Loescharataramdee, W.Petchakit, and W. Sangpisit, "An Arbitrary Power Law Device Based on Integrators", IEEE Transaction on Instrument and Measurement, Vol.49, No.6, December 2000, pp. 1176-1182.
- [4] C. Toumazou, F. J. Lidgery, D. G. Haigh, *Analogue IC design: the current-mode approach*, Stevenage, U.K. : Peter Peregrinus, 1990.
- [5] C. Netbut, M. Kumngern, P. Prommee and K.Dejhan, "New Simple Square-Rooting Circuits Based on Translinear Current Conveyors", ECTI Trans. Elec. Eng, Vol.5, Feb, 2007.
- [6] I. Chaisayun, "A Current-Mode Square-Rooting Circuit Using Negative Feedback Technique," Proc. of ECTI-CON 2007, pp.77-80.
- [7] National Semiconductor Corporation, LM13600 Dual Operational Transconductance Amplifiers with Linearizing Diodes and Buffers, May 1998. DS007980.
- [8] Intersil Americas Inc., CA3280(A) Dual, 9MHz Operational Transconductance Amplifier (OTA), May 2002. FN1174.6.