

วงจรรคูณและหารสัญญาณสี่ควอดแรนท์ในโหมดกระแสและการประยุกต์ใช้งาน A Four-Quadrant Current-Mode Multiplier and Divider and Its Applications

วิภาวัลย์ นาคทรัพย์¹ ประจวบ ปวรางกูร² และ แสงระวี บัวแก้ว³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

235 ถนนเพชรเกษม เขตภาษีเจริญ กทม. 10160

โทร.024570068 ต่อ 123 E-mail: wipavann@gmail.com

² ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

51 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ

โทร.0-2988-3655 ต่อ 239 โทรสาร 0-2988-3655 239 Email: prajuab@mut.ac.th

³ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 0-27373000 ต่อ 3375 E-mail: ktseangr@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรรคูณและหารสัญญาณในโหมดกระแสโดยใช้วงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายกระแสได้เพียงสองวงจรถ่านั้น วงจรใช้อุปกรณ์แอคทีฟเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้อุปกรณ์พาสซีฟจากภายนอก ทำให้มีความเหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นวงจรรวม วงจรสามารถคูณและหารสัญญาณได้สี่ควอดแรนท์โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างของวงจร ผลการจำลองการทำงานสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังได้นำวงจรถูกนำเสนอไปประยุกต์ใช้เป็นวงจรมอดูเลเตอร์ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นและวงจรรขยายสัญญาณเพื่อยืนยันความสามารถของวงจรอีกด้วย

Abstract

This paper presents a current-mode analog multiplier and divider using only two second-

generation current conveyor with controlled current gains (KCCII). The circuit uses only active elements without using any external passive element; as a result, it is suitable for implementation as integrated circuit. The proposed circuit can perform as either a four-quadrant multiplier or divider without changing its topology. Simulation results of the circuit show good agreement with theoretical analysis. Moreover, applications such as modulator, full-wave rectifier and amplifier are demonstrated to confirm the versatility of the circuit.

1. บทนำ

วงจรรคูณและหารสัญญาณเป็นวงจรพื้นฐานในระบบต่าง ๆ ได้แก่ ระบบควบคุม ระบบเครื่องมือวัด และระบบการสื่อสาร ตัวอย่างการนำไปใช้งานเพื่อสร้างเป็นวงจรต่างๆ เช่น วงจรมอดูเลเตอร์/วงจรถี

มอดดูเลเตอร์ วงจรทวีความถี่ และวงจรเรียงกระแส เป็นต้น เทคนิคในการออกแบบวงจรคุณและหารสัญญาณในโหมดแรงดันที่ได้นำเสนอมาแล้ว ได้แก่ วงจรคุณสัญญาณที่ใช้เทคนิคสวิทช์-ตัวเก็บประจุ [1] วงจรคุณและหารสัญญาณที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์ [2] วงจรคุณและหารสัญญาณที่ใช้วงจรสายพานกระแส [3] วงจรคุณสัญญาณที่ใช้โอทีเอ [4] และ วงจรคุณสัญญาณที่ใช้วงจรสายพานกระแส [5] ซึ่งวงจรที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป แต่อย่างไรก็ตามการประมวลผลสัญญาณในโหมดกระแสได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากวงจรที่ทำงานในโหมดกระแสมีข้อดีที่เหนือกว่าวงจรที่ทำงานในโหมดแรงดัน อาทิเช่น ความถี่การใช้งานที่สูงกว่า ย่านการทำงานที่กว้างกว่า กินกำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่าและโครงสร้างของวงจรที่ง่ายกว่า [6-8] เป็นต้น

เมื่อเร็ว ๆ นี้ วงจรคุณและหารสัญญาณในโหมดกระแสได้ถูกสร้างขึ้นโดยการใช้อุปกรณ์แอคทีฟต่าง ๆ ที่ไม่ใช่อุปกรณ์พาสซีฟประกอบรวมในวงจร ซึ่งได้แก่ โอทีเอ (OTA) [9] CCCDBA [10] และวงจรสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส (KCCII) [11] ถึงแม้ว่าวงจรเหล่านี้สามารถคุณสัญญาณได้สี่ควอดแรนต์ แต่ทว่าวงจรไม่สามารถทำงานเป็นวงจรถานสัญญาณสี่ควอดแรนต์ก็ได้

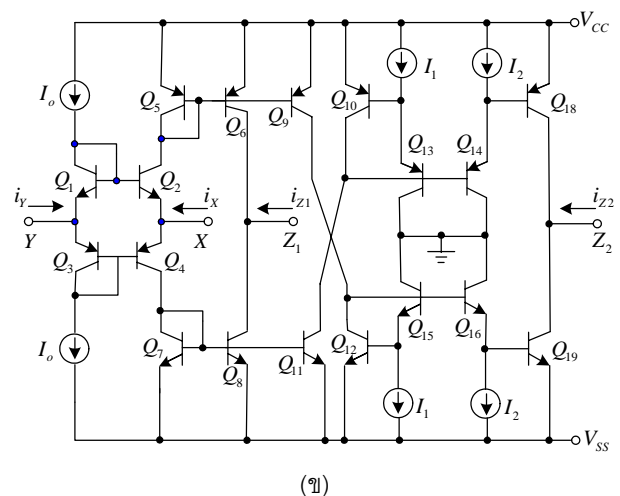
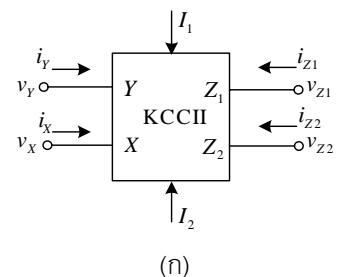
บทความนี้จึงได้นำเสนอวงจรถานคุณและหารสัญญาณโหมดกระแสโดยใช้เพียงวงจรถาน KCCII ที่ทำงานเป็นทั้งวงจรถานสัญญาณสี่ควอดแรนต์หรือวงจรถานสัญญาณสี่ควอดแรนต์ภายในโครงสร้างเดียวกันโดยที่ไม่ต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างของวงจรและยังสามารถนำไปต่อร่วมกับวงจรอื่นโดยไม่ต้องต่อ

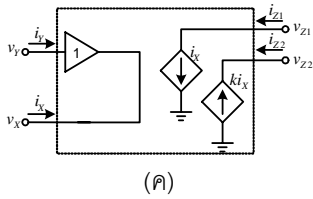
วงจรถานเฟ้อร์ร่วมด้วย เนื่องจากเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรถานที่นำเสนอมีค่าสูงมาก

2. การทำงานของวงจรถาน

2.1 วงจรถานสายพานกระแสรุ่นที่สองปรับค่าอัตราขยายได้ (KCCII)

บทความนี้ได้นำวงจรถาน KCCII [12] ที่สร้างจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบเป็นวงจรถานคุณและหารสัญญาณที่ทำงานในโหมดกระแส โดยที่สัญลักษณ์ของวงจรถาน KCCII แสดงดังรูปที่ 1(ก) สำหรับโครงสร้างภายในของวงจรถาน KCCII พื้นฐานแสดงดังรูปที่ 1 (ข) ซึ่งประกอบด้วยภาคอินพุตเป็นวงจรถานทรานสลีเนียร์ $Q_1 - Q_4$ ต่อร่วมกับวงจรถานสะท้อนกระแส $Q_5 - Q_8$ และวงจรถานสะท้อนกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายกระแสได้ $Q_9 - Q_{19}$ ส่วนวงจรถานแสดงดังรูปที่ 1(ค)





รูปที่ 1 KCCII (ก) สัญลักษณ์ (ข) โครงสร้างภายใน (ค) วงจรสมมูล

ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่พอร์ตต่าง ๆ ของวงจร KCCII ทางอุดมคติเขียนแทนด้วยเมตริกซ์เป็นดังนี้

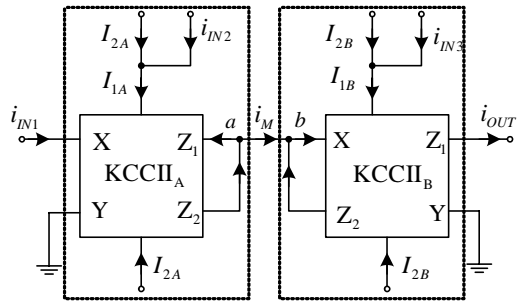
$$\begin{bmatrix} i_Y \\ v_X \\ i_{Z1} \\ i_{Z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -k & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_Y \\ i_X \\ v_{Z1} \\ v_{Z2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ i_Y, i_X, i_{Z1}, i_{Z2} และ v_Y, v_X, v_{Z1}, v_{Z2} คือกระแสและแรงดันของแต่ละพอร์ตตามลำดับ อัตราขยายกระแส k ของวงจรสายพานกระแสหาได้จากอัตราส่วนของกระแสไบแอส I_1 และ I_2 [13] นั้นหมายความว่าอัตราขยายกระแสที่เอาต์พุตของพอร์ต Z ของวงจร KCCII ซึ่งสามารถปรับค่าได้ด้วยการปรับกระแส I_1 และ/หรือ I_2 ส่วนเครื่องหมายลบแสดงถึงอัตราขยายแบบลบหรือการกลับเฟสของสัญญาณที่พอร์ต I_2 ของวงจรสายพานกระแสตนเอง

จากคุณสมบัติของวงจร KCCII ที่กล่าวมานี้จะนำไปใช้ในการออกแบบเพื่อสร้างเป็นวงจรคูณและหารสัญญาณที่ทำงานได้สี่ควอดแรนทในโครงสร้างเดียวกันและสามารถปรับค่าอัตราขยายของวงจรได้ด้วย ดังที่จะกล่าวต่อไป

2.2 วงจรที่นำเสนอ

วงจรคูณและหารสัญญาณที่นำเสนอประกอบด้วยวงจร $KCCII_A$ และ $KCCII_B$ โดยภายในบล็อกเส้นประของ $KCCII_A$ ทำหน้าที่เป็นวงจรคูณสัญญาณเพียงอย่างเดียว และภายในบล็อกเส้นประของ $KCCII_B$ ทำหน้าที่เป็นวงจรหารสัญญาณ เมื่อนำวงจร KCCII ทั้งสองชุดนี้มาต่อкасแคด (Cascade) กันแล้ว ดังรูปที่ 2 จะทำให้วงจรทำหน้าที่เป็นวงจรคูณและหารสัญญาณในโครงสร้างเดียวกันดังนี้



รูปที่ 2 วงจรคูณและหารสัญญาณที่นำเสนอ

พิจารณาที่บล็อกเส้นประวงจร $KCCII_A$ ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\begin{aligned} i_{Z1A} &= i_{XA} = i_{IN1} \\ i_{Z2A} &= ki_{XA} = \frac{I_{1A}}{I_{2A}} i_{IN1} \end{aligned} \quad (2)$$

ผลรวมกระแสที่โหนด a เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} i_M &= i_{Z2A} - i_{Z1A} \\ &= \frac{I_{1A}}{I_{2A}} i_{IN1} - i_{IN1} \end{aligned} \quad (3)$$

แทนค่า $I_{1A} = I_{2A} + i_{IN2}$ ในสมการ (3)

$$i_M = \frac{i_{IN1} i_{IN2}}{I_{2A}} \quad (4)$$

ในการทำงานเดียวกันพิจารณาที่บล็อกเส้นประของวงจร KCCII_B ได้ผลรวมของกระแสที่โหนด b เป็นดังนี้

$$i_M = i_{XB} - \frac{I_{1B}}{I_{2B}} i_{XB} \quad (5)$$

แทนค่ากระแสแล $I_{1B} = I_{2B} + i_{IN3}$ และ $i_{XB} = i_{Z1B} = -i_{OUT}$ ในสมการ (5) ได้ผลลัพธ์เป็นดังนี้

$$i_{OUT} = \frac{I_{2B}}{i_{IN3}} i_M \quad (6)$$

แทนค่ากระแส i_M จากสมการ (4) ใน (6) และกำหนดให้ $I_{2A} = I_{2B}$ เขียนกระแสเอาต์พุตใหม่ได้เป็น

$$i_{OUT} = \frac{i_{IN1} i_{IN2}}{i_{IN3}} \quad (7)$$

จากสมการ (7) ได้ความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุตและกระแสอินพุตที่สามารถสร้างเป็นฟังก์ชันโหมดการทำงานต่าง ๆ ได้ 5 โหมดที่ขึ้นอยู่กับการเลือกสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าสู่วงจรดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 โหมดการทำงานของวงจรที่นำเสนอ

โหมดการทำงาน	สัญญาณอินพุต	สัญญาณอินพุต	สัญญาณอินพุต
	i_{IN1}	i_{IN2}	i_{IN3}
วงจรคูณสัญญาณ	สัญญาณอินพุต	สัญญาณอินพุต	ค่าคงที่
วงจรรหารสัญญาณแบบที่ 1	สัญญาณอินพุต	ค่าคงที่	สัญญาณอินพุต
วงจรรหารสัญญาณแบบที่ 2	ค่าคงที่	สัญญาณอินพุต	สัญญาณอินพุต
วงจรรขยายสัญญาณแบบที่ 1	สัญญาณอินพุต	ค่าคงที่	ค่าคงที่
วงจรรขยายสัญญาณแบบที่ 2	ค่าคงที่	สัญญาณอินพุต	ค่าคงที่

สำหรับการวิเคราะห์ความไม่เป็นอุดมคติของวงจร KCCII ที่นำมาใช้ในออบแบบเพื่อสร้างเป็นวงจรคูณและหารสัญญาณนั้น สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่พอร์ตต่างๆได้เป็นดังนี้

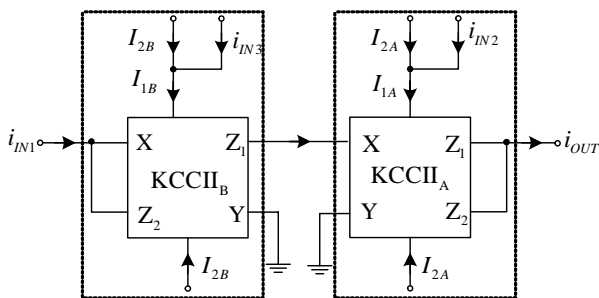
$$i_Y = 0, v_X = \beta v_Y, i_{Z1} = \alpha_1 i_X, i_{Z2} = -\alpha_2 k i_X \quad (8)$$

เมื่อกำหนดให้ $\beta = 1 - \varepsilon_v, |\varepsilon_v| \ll 1$ คือค่าความผิดพลาดในการตามแรงดัน (Voltage tracking error) และ $\alpha_j (j = 1, 2), \alpha_j = 1 - \varepsilon_i, |\varepsilon_i| \ll 1$ คือค่าความผิดพลาดในการตามกระแส (Current tracking error) วิเคราะห์ผลกระทบความไม่เป็นอุดมคติของวงจร KCCII ตามรูปที่ 2 เขียนความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุตและกระแสอินพุตจากสมการ (7) ใหม่ได้เป็น

$$i_{OUT} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 i_{IN1} i_{IN2}}{\alpha_2 i_{IN3} + (\alpha_2 - 1) I_2} + \frac{(\alpha_1 \alpha_2 - \alpha_1^2) I_2 i_{IN1}}{\alpha_2 i_{IN3} + (\alpha_2 - 1) I_2} \quad (9)$$

จากสมการ (9) พบว่าผลกระทบของความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์พาสซีฟที่แฝงอยู่ในวงจร KCCII มีผลทำให้เอาต์พุตเกิดความผิดพลาดขึ้น ซึ่งวงจรตามรูปที่ 2 จะทำงานเป็นวงจรคูณและหารสัญญาณในทางอุดมคติได้ ก็ต่อเมื่อค่าความผิดพลาดในการตามกระแสจะต้องมีค่าเป็นหนึ่งเท่านั้น นั่นคือ $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ นั่นเอง

นอกจากนี้ยังได้ออกแบบวงจรคูณและหารสัญญาณอีกรูปแบบหนึ่งดังรูปที่ 3 โดยการสลับตำแหน่งของบล็อกลงในเส้นประตามรูปที่ 2 ได้ความสัมพันธ์ของกระแสอินพุตและกระแสเอาต์พุตดังสมการ (7) เช่นเดียวกัน



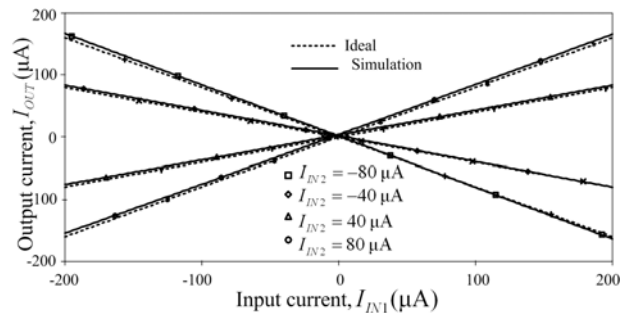
รูปที่ 3 วงจรคูณและหารสัญญาณอีกรูปแบบหนึ่ง

3. ผลการจำลองการทำงาน

เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะและการทำงานของวงจรคูณและหารสัญญาณในรูปแบบของกระแสที่สามารถทำงานได้สี่ควอดแรนต์ตามรูปที่ 2 ทำการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice เลือกใช้ทรานซิสเตอร์ NPN เบอร์ 2N2222A และ PNP เบอร์ 2N2907A กำหนดให้กระแสไบแอส I_0 ของวงจร KCCII มีค่าเท่ากับ $200 \mu A$ ส่วนแรงดัน

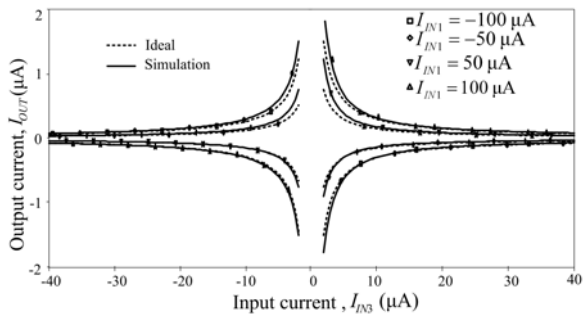
ไฟเลี้ยงวงจรมีค่าเป็น $\pm 1.5 V$ จำลองคุณลักษณะต่าง ๆ ของวงจรคูณและหารสัญญาณดังนี้

เพื่อทดสอบโหมดการทำงานของวงจรคูณสัญญาณ ได้ผลการจำลองคุณลักษณะการถ่ายโอนทางไฟตรงของวงจรแสดงดังรูปที่ 4 เป็นกราฟความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุตเทียบกับกระแสอินพุตตัวที่หนึ่ง I_{IN1} ที่มีค่าตั้งแต่ $-200 \mu A$ จนถึง $200 \mu A$ และกำหนดให้ค่ากระแสอินพุตตัวที่สอง I_{IN2} มีค่าต่าง ๆ กัน นั่นคือ $-80 \mu A$, $-40 \mu A$, $40 \mu A$ และ $80 \mu A$ ตามลำดับ และอินพุตตัวที่สามเป็นค่าคงที่ $I_{IN3} = 100 \mu A$ ผลการจำลองของวงจรคูณสัญญาณแสดงเป็นเส้นทึบ ส่วนเส้นประแทนผลการคำนวณทางทฤษฎี



รูปที่ 4 การถ่ายโอนทางไฟตรงของวงจรคูณสัญญาณ

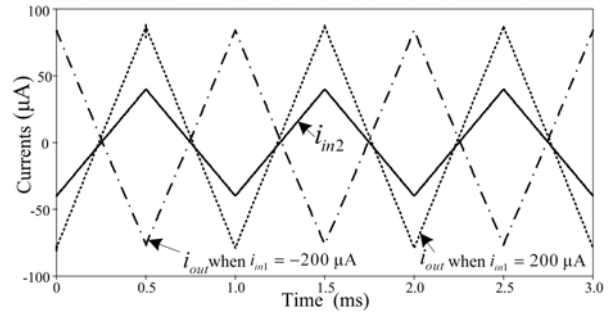
การจำลองคุณลักษณะการถ่ายโอนทางไฟตรงของวงจรหารสัญญาณที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 5 เป็นกราฟความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุต I_{OUT} และกระแสอินพุต I_{IN3} ที่มีค่าตั้งแต่ $-40 \mu A$ จนถึง $40 \mu A$ โดยกำหนดให้ค่ากระแส I_{IN1} มีค่าต่าง ๆ กัน นั่นคือ $-100 \mu A$, $-50 \mu A$, $50 \mu A$ และ $100 \mu A$ ตามลำดับ และค่ากระแสอินพุต $I_{IN2} = 100 \mu A$ ผลการจำลองของวงจรหารสัญญาณแสดงเป็นเส้นทึบ ส่วนเส้นประแทนผลการคำนวณทางทฤษฎี



รูปที่ 5 การถ่ายโอนทางไฟตรงของวงจรถ่ายสัญญาณ

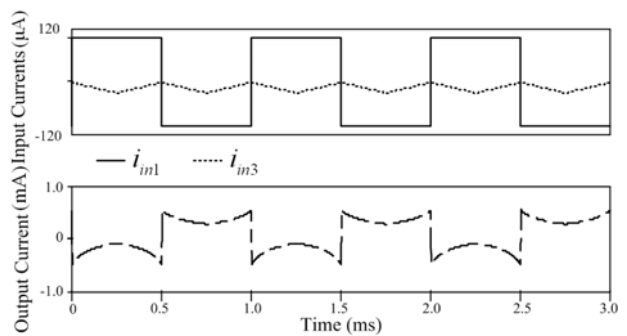
จากผลการจำลองการทำงานของวงจรถ่ายและหารสัญญาณที่แสดงไว้ในรูปที่ 4 และ 5 พบว่าวงจรมีแนวโน้มสามารถทำงานเป็นวงจรถ่ายสัญญาณสี่ควอดแรนต์และวงจรถ่ายสัญญาณสี่ควอดแรนต์ที่มีค่าใกล้เคียงกับผลทางทฤษฎี โดยที่สามารถปรับค่าอัตราขยายของวงจรถ่ายหรือวงจรถ่ายสัญญาณได้ด้วยการปรับค่าของกระแสของสัญญาณอินพุตที่กำหนดให้เป็นค่าคงที่

จำลองคุณลักษณะทางพลวัตของวงจรถ่ายสัญญาณที่นำเสนอ โดยป้อนสัญญาณอินพุต i_{in2} เป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดเป็น $\pm 40 \mu A_p$ ที่ความถี่ 1 kHz และกำหนดให้กระแสอินพุต $I_{IN3} = 100 \mu A$ ได้ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 6 เมื่ออินพุต I_{IN1} มีค่าเป็น $-200 \mu A$ และ $200 \mu A$ ตามลำดับ



รูปที่ 6 การจำลองของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตในโดเมนเวลาของวงจรถ่ายสัญญาณ

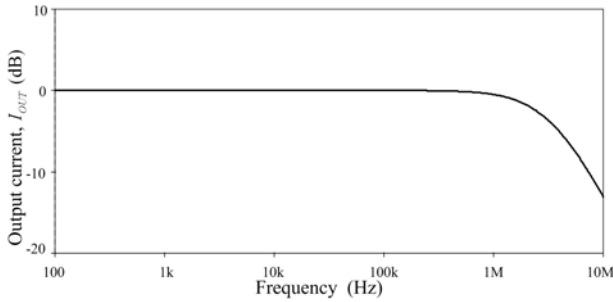
การจำลองคุณลักษณะทางพลวัตของวงจรถ่ายสัญญาณ ได้ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 7 เมื่อสัญญาณอินพุต i_{in1} เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดเป็น $\pm 100 \mu A_p$ ที่ความถี่เป็น 1 kHz และสัญญาณอินพุต i_{IN3} เป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีค่าเท่ากับ $25 \mu A_p$ ที่ความถี่ 2 kHz และกำหนดให้อินพุต $I_{IN2} = 100 \mu A$



รูปที่ 7 การจำลองของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตในโดเมนเวลาของวงจรถ่ายสัญญาณ

การจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถ่ายและหารสัญญาณ เมื่อกำหนดให้อินพุตตัวที่หนึ่งเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ $i_{in1} = 1 \mu A$ และ

อินพุตที่เหลือเป็นค่าคงที่ $I_{IN2} = I_{IN3} = 100 \mu\text{A}$ ได้ผลตอบสนองทางความถี่ของเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 8 พบว่าช่วงความถี่การใช้งานมีค่าสูงถึงประมาณ 3 MHz

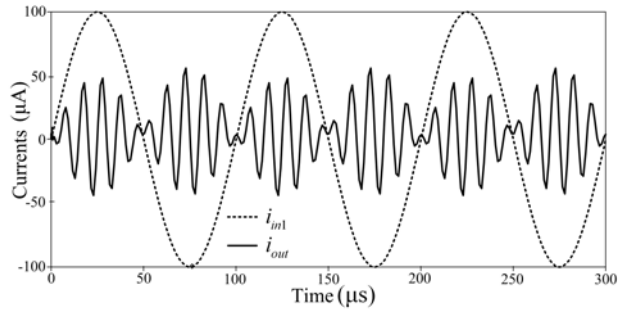


รูปที่ 8 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรคูณและหารสัญญาณ

4. ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของวงจรที่นำเสนอ

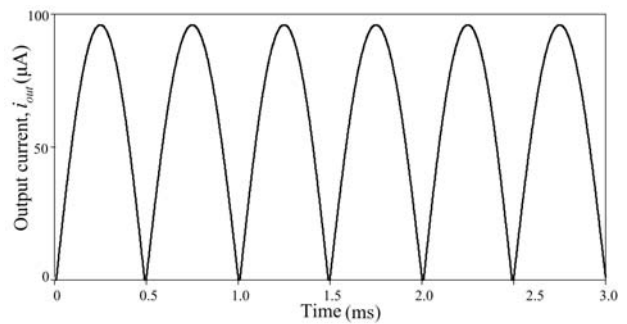
เพื่อที่จะเน้นย้ำถึงความสามารถของวงจรที่นำเสนอโดยได้นำไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นวงจรมอดูเลเตอร์ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น และ วงจรขยายสัญญาณ ดังนี้

วงจรมอดูเลเตอร์ถูกสร้างขึ้นโดยกำหนดให้กระแส $I_{IN3} = 100 \mu\text{A}$ เมื่ออินพุต $i_{in1} = 100 \sin(20\pi kt) \mu\text{A}$ และ $i_{in2} = 50 \sin(200\pi kt) \mu\text{A}$ ได้ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุต i_{in1} และสัญญาณเอาต์พุต i_{out} ของวงจรมอดูเลเตอร์แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 สัญญาณกระแสอินพุต i_{in1} และสัญญาณกระแสเอาต์พุต i_{out} ของวงจรมอดูเลเตอร์

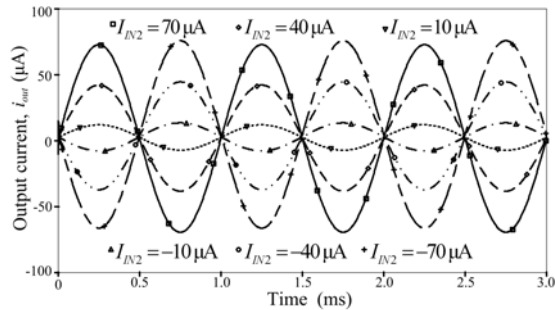
วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นถูกสร้างขึ้นโดยกระแสอินพุต i_{in1} เป็นสัญญาณไซน์ที่มีขนาด $80 \mu\text{A}_p$ และความถี่ 1 kHz ส่วนสัญญาณอินพุต i_{in3} เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ $\pm 40 \mu\text{A}_p$ โดยมีความถี่เดียวกัน และกำหนดให้กระแสอินพุต $I_{IN2} = 50 \mu\text{A}$ ได้เอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลตอบสนองของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

วงจรขยายสัญญาณถูกสร้างขึ้นโดยสัญญาณอินพุต i_{in1} มีค่าเท่ากับ $50 \sin(2\pi kt) \mu\text{A}$ เมื่อ $I_{IN3} = 50 \mu\text{A}$ ได้ผลตอบสนองของวงจรขยายสัญญาณ เมื่อกำหนดให้ค่ากระแสอินพุต I_{IN2} มีค่า

เท่ากับ $\pm 10 \mu\text{A}$, $\pm 40 \mu\text{A}$ และ $\pm 70 \mu\text{A}$ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลตอบสนองของวงจรขยายสัญญาณเมื่ออินพุต I_{IN2} มีค่าต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 9-11 จะเห็นได้ว่าวงจรที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายดังที่ได้แสดงไว้

5. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวงจรคูณและหารสัญญาณในโหมดกระแสที่สร้างขึ้นโดยวงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายได้เพียงอย่างเดียวที่ใช้เป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลักโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์พาสซีฟ วงจรที่นำเสนอสามารถคูณและหารสัญญาณได้สี่ควอดแรนต์โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างของวงจร และสามารถปรับค่าพารามิเตอร์หรือค่าอัตราขยายของวงจรได้โดยการปรับค่ากระแสอินพุตตัวใดตัวหนึ่งที่กำหนดให้เป็นค่าคงที่ ผลการจำลองการทำงานของวงจรสามารถยืนยันด้วยทางทฤษฎี และได้นำวงจรไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นวงจรต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบวงจรคูณและหารสัญญาณได้อีกรูปแบบหนึ่ง ทำได้โดยเพียงแค่สลับตำแหน่งการทำงานวงจรชุดหน้าและหลังของวงจรเท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Yasumato and T. Enomoto, "Integrated MOS four-quadrant analogue multiplier using switched-capacitor technique," *Electron. Lett.*, vol.18, no.18, 1982, pp.769-771.
- [2] N. I. Khachab and M. Ismail, "MOS multiplier/divider cell for analogue VLSI," *Electron. Lett.*, vol.25, no.23, 1989, pp.1550-1552.
- [3] M. C. Piccirilli, "A current-conveyor-based multiplier/divider cell," *Inter. J. Circ. Theor. Appl.*, vol. 24, pp.233-237, pp.1996
- [4] W. Surakamponorn, V. Riewruja, K.Kumwachara, C. Surawatpunya, and K.Anuntahirunrat, "Temperature-Insensitive Voltage-to-Current Converter and Its Applications", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.48, 1999, pp. 1270-1277.
- [5] E. Yuce, "Voltage-mode multiplier implementation employing current conveyors," *Electron. World*, vol. 112, no. 1850, 2006, pp. 45-47.
- [6] B. Wilson, "Recent developments in current conveyor and current-mode circuit," *Proc. IEE. G*, vol.137, no.2, 1990, pp. 63-77.
- [7] C. Toumazou, F. J. Lidgey and D.G. Haigh, *Analogue IC design: the current-mode approach*, Stevenage, U.K.: Peter Peregrinus, 1990.

- [8] R.A. Duncan, K.M. Chan and A.S. Sedra, "Designs for a wideband current amplifier and a current conveyor," *IEEE Trans.Circ&Syst* .vol. 41, no. 4, 1994 pp. 272 – 280.
- [9] K.Kaewdang,C. Fongsamu and W.Surakamponorn, "A wide-band current-mode OTA-based analog multiplier-divider;" *Proceedings ISCAS-2003*, vol. 1, 2003, pp.I-349 - I-352.
- [10] M. Siripruchyanum, "A design analog multiplier and divider using current controlled current differencing buffered amplifiers," *Proceeding of ISIC-2007*, 2007, pp.568-571.
- [11] M. T. Abuelma'atti and M. A. Al-Qahtani, "A current-mode current controlled current-conveyor-based analogue multiplier/divider," *Int. J.Electron.*, vol. 85, no. 1, 1998, pp. 71–77.
- [12] S. Tongkulboriboon, P. Pawarangkoon and W. Kiranon, "Externally linear current amplifiers," *Int. J. Electron.*, vol.94, no. 6, 2007, pp.587-596.
- [13] A. Fabre and N. Mimeche, "Class A/AB second-generation current conveyor with controlled current gain," *Electron. Lett.*, vol.30, 1994, pp.1267-1269.