

การสังเคราะห์และการออกแบบวงจรคูณและหารสัญญาณแอนะล็อกโหมด
กระแส 4 ควอดแดรนต์ที่ใช้ OTA
Synthesis and Design of 4 Quadrant Analog Current-mode
Multiplier and Divider Using OTAs

มรกต วรจักร¹ วินัย ใจกล้า² และพีระวุฒิ สุวรรณจันทร์³
Morakot Worajak¹, Winai Jaikla² and Peerawut Suwanjun³

¹นักศึกษาลัทธิศูต ค.อ.ม. (สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²อาจารย์ ³รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

morakot_kub@hotmail.com, winai.ja@hotmail.com, and Kspeeraw@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสังเคราะห์และออกแบบวงจรคูณและหารสัญญาณแอนะล็อกโหมดกระแสอย่างละวงจร ซึ่งวงจรถูกนำเสนอสามารถคูณและหารสัญญาณกระแสอินพุตได้สี่ควอดแดรนต์ (Quadrant) โดยใช้วงจรถ่ายความนำถ่ายโอน (Operational Transconductance Amplifiers: OTA) ที่มีโครงสร้างเป็นทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์จำนวนสองวงจรถูกเสนอจุดเด่นของวงจรถูกนำเสนอทั้งสอง คือ กระแสเอาต์พุตของวงจรถูกเสนอเป็นอิสระจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณเอาต์พุตได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ค่าความต้านทานที่เอาต์พุตของวงจรถูกเสนอและหารสัญญาณมีค่าสูงทำให้สามารถขับโหลดหรือต่อไปวงจรภาคอื่นโดยปราศจากวงจรถูกเสนอ ผลการทดสอบการทำงานของวงจรถูกเสนอด้วยโปรแกรม PSpice พบว่าวงจรถูกเสนอได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ไว้ตามทฤษฎี

คำสำคัญ: วงจรถ่ายความนำถ่ายโอน โหมด กระแส สี่ควอดแดรนต์

Abstract

This article presents the synthesis and design of four quadrant analog current-mode multiplier and divider using BJT operational transconductance amplifiers (OTAs). The features of the proposed circuits are as follows: they consist of two OTAs which is ideal for monolithic IC implementation; they can multiply and divide two input current with temperature insensitivity; the magnitude of output currents can be electronically controlled. Moreover, the proposed multiplier and divider possess high output impedances thus they enable simple current-mode cascading without any external current buffers. The PSpice simulation results are included, verifying the workability of the proposed circuits. The given results agree well with the theoretical anticipation.

Keywords : OTA; Multiplier; Divider; Current-mode; 4 Quadrant

1. บทนำ

วงจรคูณและหารสัญญาณแอนะล็อกเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์พื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างมากในระบบไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ระบบควบคุม เครื่องมือวัด ระบบประมวลผลสัญญาณและวงจรด้านการสื่อสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านสื่อสาร วงจรคูณจะถูกนำมาใช้ในการมอดูเลต การทวีความถี่ เป็นต้น การออกแบบวงจรเพื่อใช้ในการประมวลผลสัญญาณที่กำลังได้รับความนิยมอย่างมาก คือ การออกแบบวงจรที่สามารถทำงานได้ในโหมดกระแส ทั้งนี้เนื่องจากวงจรที่ทำงานในโหมดกระแส ให้แบนด์วิดท์การทำงานที่กว้างกว่า มีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น มีช่วงพลวัตกว้าง บริโภคกำลังงานต่ำ และมีวงจรมีไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับโหมดแรงดัน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาและออกแบบวงจรคูณสัญญาณและหารสัญญาณที่ทำงานในโหมดกระแส โดยมุ่งเน้นให้มีโครงสร้างของวงจรที่ไม่ซับซ้อน ลดจำนวนอุปกรณ์แอคทีฟ เนื่องจากต้องนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา ทั้งนี้เพื่อลดแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงต่ำลง สำหรับวงจรคูณและหารสัญญาณที่ทำงานในโหมดกระแส มีการนำเสนอออกมาอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น การใช้วิธีการเทคโนโลยีบูรณาการแบบ CMOS [1-3] การใช้อุปกรณ์แอคทีฟสำเร็จรูป (Active building block) เช่น วงจรขยายกันชนผลต่างกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส (CCDBA) [4] วงจรขยายความนำผลต่างกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส (CCDDTA) [5] วงจรขยายส่งผ่านความนำสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส 2 เอาต์พุต (DO-CCCCTA) [6] วงจรสายพานกระแสที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส (CCCII) [7-9] และวงจรขยายความนำถ่ายโอน (OTA) [10,11]

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวงจรคูณและวงจรถหารสัญญาณที่ได้มีผู้ออกแบบและนำเสนอไว้พบว่า วงจรที่ได้นำเสนอเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น วงจรต้องใช้อุปกรณ์พาสซีฟภายนอกร่วมด้วย [7] ใช้อุปกรณ์แอคทีฟจำนวนมากกว่า 2 ตัวส่งผลกระทบต่อให้นำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมทำให้ชิปมีขนาดใหญ่และสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า [4] (เฉพาะวงจรในรูปที่ 2), 8-10, 11 (เฉพาะวงจรในรูปที่ 3)] ไม่สามารถคูณสัญญาณแบบสี่ควอดแดรนต์ได้ [7,11] และไม่สามารถหารสัญญาณแบบสี่ควอดแดรนต์ได้ [5-7,10] เป็นต้น

จากปัญหาที่ได้นำเสนอดังกล่าว ในบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อนำเสนอวงจรถคูณและหารสัญญาณแอนะล็อกโหมดกระแส 4 ควอดแดรนต์ โดยใช้ OTA ที่มีโครงสร้างจากโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เพียงอย่างเดียว จำนวน 2 ตัว นอกจากนี้วงจรถคูณและหารสัญญาณที่นำเสนอนี้ สามารถชดเชยผลที่เกิดจากอุณหภูมิได้ในทางทฤษฎี และสามารถ

ควบคุมขนาดสัญญาณเอาต์พุตได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ จึงเหมาะสำหรับการนำไปพัฒนาออกแบบวงจรให้อยู่ในรูปของวงจรรวมได้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์และออกแบบวงจรถคูณและหารสัญญาณแอนะล็อกโหมดกระแส 4 ควอดแดรนต์ โดยใช้ OTA
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรถคูณและหารสัญญาณแอนะล็อกโหมดกระแส 4 ควอดแดรนต์ โดยใช้ OTA ด้วยการจำลองผลการทำงานผ่านโปรแกรม PSPICE

3. นิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย

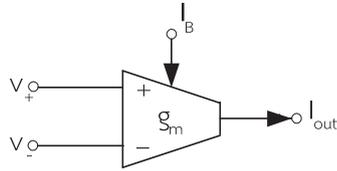
1. การสังเคราะห์ หมายถึง กระบวนการบูรณาการความคิดที่ได้ศึกษา ให้เกิดวงจรถคูณและหารสัญญาณแอนะล็อกโหมดกระแสให้ทำงานได้ใน 4 ควอดแดรนต์
2. การออกแบบวงจร หมายถึง การปรับค่าอุปกรณ์ของวงจรถคูณและหารสัญญาณที่ได้สังเคราะห์ไว้แล้ว เพื่อให้ได้วงจรถคูณและหารสัญญาณแอนะล็อก 4 ควอดแดรนต์ ตามที่ต้องการ

4. วงจรที่นำเสนอ

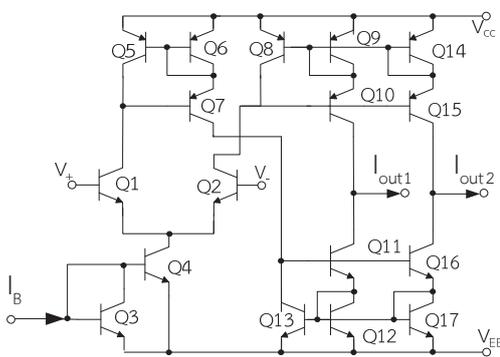
4.1 วงจรขยายความนำถ่ายโอน

เนื่องจากในบทความนี้ได้นำเสนอวงจรถคูณและหารสัญญาณแอนะล็อกโหมดกระแส 4 ควอดแดรนต์ ที่สร้างขึ้นจาก วงจรขยายความนำถ่ายโอนหรือจะเรียกสั้นๆ ว่า OTA ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ OTA พอสังเขป ซึ่ง OTA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟที่ได้รับการยอมรับเป็นอย่างดี จากนักออกแบบวงจรถคูณและหารสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลาย ว่าเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบวงจรในโหมดกระแส ซึ่ง OTA ได้มีการผลิตออกมาในเชิงพาณิชย์ เช่นเบอร์ LM13600 และเบอร์ LM3080 เป็นต้น [12] โดย OTA เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนผันแรงดันเป็นกระแส หรือกล่าวได้ว่าเป็นอุปกรณ์แอคทีฟที่มีการทำงานในลักษณะแรงดันควบคุมแหล่งจ่ายกระแส (Voltage controlled current source: VCCS) ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า เรียกว่า ค่าความนำถ่ายโอน (Transconductance) หรือ g_m ที่สามารถควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ด้วยกระแสไบแอสจากภายนอก โดยทั่วไป OTA มีคุณสมบัติพื้นฐานคือ มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง โดย OTA มีสัญลักษณ์ ดังรูปที่ 1 ในการใช้งานจริงนั้นขั้วกระแสเอาต์พุตของ OTA จะมีหลายขั้วก็ได้โดยเพิ่มวงจรถ่วงกระแสเข้าไปในโครงสร้างภายในของ OTA ซึ่งแต่ละขั้วเอาต์พุตจะมีขนาดกระแสเท่ากัน โครงสร้าง

ของ OTA แบบสองเอาต์พุตที่สร้างมาจากทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ของ OTA



รูปที่ 2 โครงสร้างของ OTA แบบสองเอาต์พุต

ความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและกระแสเอาต์พุตของ OTA คือ

$$I_{out} = g_m V_{in} = g_m (V_+ - V_-) \quad (1)$$

เมื่อ OTA ทำงานในช่วงที่เป็นเชิงเส้น ค่าความนำถ่ายโอนสามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไฟฟ้ I_B สามารถเขียนแทนได้ด้วยความสัมพันธ์ดังนี้

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

โดยที่ g_m คือ ค่าความนำถ่ายโอนของ OTA

V_T คือ ค่าศักดาไฟฟ้าเชิงอุณหภูมิซึ่งจะแปรผันตรงกับค่าอุณหภูมิ โดยจะมีค่าประมาณ 26 mV ที่อุณหภูมิ 27 °C

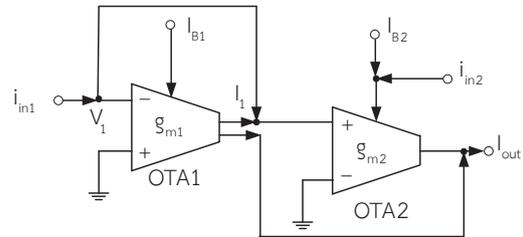
I_B คือ ค่ากระแสไบแอสของ OTA ซึ่งเป็นกระแสไฟตรง ที่ไม่สามารถมีค่าเป็นลบได้

V_{in} คือ แรงดันอินพุตที่เป็นผลต่างของแรงดันระหว่างขาบวก (V_+) และขาลบ (V_-) ของ OTA

I_{out} คือ กระแสเอาต์พุต

4.2 การสังเคราะห์และการออกแบบวงจรคุณสัญญาณแอนะล็อกโหมตกระแส 4 ควอดแดรนต์

วงจรถูกสัญญาณกระแสแอนะล็อกสี่ควอดแดรนต์ที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งพบว่า วงจรประกอบไปด้วย OTA จำนวน 2 ตัว โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์พาสซีฟภายนอก ซึ่ง OTA ตัวที่หนึ่งจะเป็นแบบสองเอาต์พุต เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรถูกสัญญาณแอนะล็อกโหมตกระแส 4 ควอดแดรนต์ใน [10] จะพบว่าต้องใช้ OTA จำนวนถึงสามตัวเพื่อสร้างเป็นวงจรถูกสัญญาณแอนะล็อกโหมตกระแส 4 ควอดแดรนต์ ทำให้สิ้นเปลือง OTA และบริโภคกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้น ด้วยคุณสมบัติของวงจรที่เหมือนกันแต่วงจรที่นำเสนอสามารถลดจำนวน OTA ได้หนึ่งตัว จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะนำวงจรถูกที่นำเสนอไปพัฒนาเป็นวงจรรวม



รูปที่ 3 วงจรถูกสัญญาณแอนะล็อกโหมตกระแส 4 ควอดแดรนต์

จากรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของวงจรถูกสัญญาณแอนะล็อกโหมตกระแส 4 ควอดแดรนต์ ที่นำเสนอ โดยที่ i_{in1} และ i_{in2} คือสัญญาณกระแสอินพุตที่เป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ ซึ่งสัญญาณกระแสอินพุต i_{in1} ถูกป้อนไปยัง OTA1 แล้วนำมาเป็นสัญญาณกระแสอินพุตสำหรับ OTA2 ส่วนสัญญาณกระแสอินพุต i_{in2} จะมีสัญญาณกระแสไบแอส I_{B2} รวมอยู่ด้วย โดยมีเงื่อนไขว่า ค่าสูงสุดของ i_{in2} ต้องมีค่าน้อยกว่า I_{B2} และป้อนไปยัง OTA2 ให้ g_{m1} และ g_{m2} เป็นการขยายความนำ ของ OTA1 และ OTA2 ตามลำดับ และทำการวิเคราะห์วงจรตามรูปที่ 3 จะได้สมการกระแสเอาต์พุตดังนี้

$$I_{out} = V_1 (g_{m2} - g_{m1}) \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาที่โหนด V_1 พบว่า

$$V_1 = \frac{i_{in1}}{g_{m1}} \quad (4)$$

แทนค่า V_1 ในสมการที่ (3) จะได้

$$I_{out} = \frac{i_{in1}}{g_{m1}} (g_{m2} - g_{m1}) \quad (5)$$

แทนค่า $g_{m1} = \frac{I_{B1}}{2V_T}$ และ $g_{m2} = \frac{I_{B2} + i_{in2}}{2V_T}$ จะได้ว่า

$$I_{out} = \frac{i_{in1}}{\frac{I_{B1}}{2V_T}} \left(\frac{I_{B2} + i_{in2} - I_{B1}}{2V_T} \right) \quad (6)$$

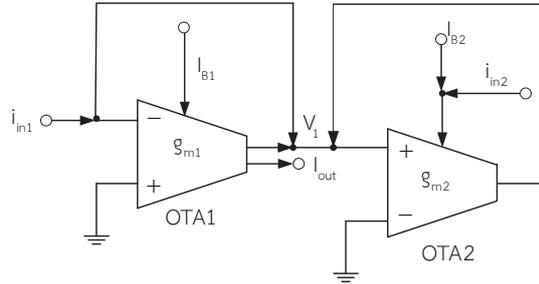
เมื่อ $I_{B1} = I_{B2} = I_B$ โดยในทางปฏิบัติสามารถทำได้ด้วยการใช้วงจรสะท้อนกระแสที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่งเพื่อส่งผ่านกระแส I_B ไปยังจุด I_{B1} และ I_{B2} จะได้สมการกระแสเอาต์พุตดังนี้

$$I_{out} = \frac{i_{in1} i_{in2}}{I_B} \quad (7)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (7) จะพบว่า I_{out} ให้ความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันการคูณกันระหว่างสัญญาณกระแส i_{in1} และสัญญาณกระแส i_{in2} โดยที่สัญญาณกระแส i_{in1} และ i_{in2} สามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ จึงเป็นวงจรคูณสัญญาณกระแสแบบ 4 ควอดแดรนต์ ในขณะที่ I_B ให้ความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันการหาร เนื่องจาก I_B เป็นกระแสไบแอสของ OTA ที่ไม่สามารถมีค่าเป็นลบได้ ดังนั้นจึงเป็นวงจรหารสัญญาณกระแสแบบ 2 ควอดแดรนต์ จากสมการที่ (7) จะพบว่า วงจรที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถทำหน้าที่เป็นทั้งวงจรคูณและหารสัญญาณกระแสในวงจรเดียวกัน นอกจากนี้ ในทางอุดมคติยังแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าสามารถชดเชยผลที่เกิดจากอุณหภูมิได้ทั้งหมดด้วย เนื่องจากสมการกระแสเอาต์พุตไม่มีเทอมของค่าศักดาความร้อน (V_T)

4.3 การสังเคราะห์และการออกแบบวงจรหารสัญญาณแอมป์โอมครอส 4 ควอดแดรนต์

จากคุณสมบัติของอุปกรณ์ OTA ดังกล่าวข้างต้นสามารถสังเคราะห์และออกแบบวงจรหารสัญญาณกระแสแบบ 4 ควอดแดรนต์ ได้โดยวิธีการปรับปรุงวงจรใหม่ภายใต้อุปกรณ์ OTA เพียงสองตัว ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรหารสัญญาณแอมป์โอมครอส 4 ควอดแดรนต์

จากรูปที่ 4 โดยที่ i_{in1} เป็นอินพุตป้อนให้กับ OTA1 และ OTA2 ส่วนอินพุต i_{in2} จะรวมกับ I_{B2} ป้อนให้กับ OTA2 เมื่อวิเคราะห์วงจรตามรูปที่ 4 จะได้สมการกระแสเอาต์พุตดังนี้

$$I_{out} = -i_{in1} - g_{m2} V_1 \quad (8)$$

เมื่อพิจารณาที่โหนด V_1 พบว่า

$$V_1 = -\frac{I_{out}}{g_{m1}} \quad (9)$$

แทนค่า V_1 ในสมการที่ (8) และจัดสมการใหม่จะได้

$$I_{out} = -\frac{i_{in1}}{\left(1 - \frac{g_{m2}}{g_{m1}}\right)} \quad (10)$$

แทนค่า $g_{m1} = \frac{I_{B1}}{2V_T}$ และ $g_{m2} = \frac{I_{B2} + i_{in2}}{2V_T}$ จะได้ว่า

$$I_{out} = -\frac{i_{in1}}{\left[1 - \frac{\left(\frac{I_{B2} + i_{in2}}{2V_T}\right)}{\frac{I_{B1}}{2V_T}}\right]} \quad (11)$$

เมื่อ $I_{B1} = I_{B2} = I_B$ โดยในทางปฏิบัติสามารถทำได้ด้วยการใช้วงจรสะท้อนกระแสที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่งเพื่อส่งผ่านกระแส I_B ไปยังจุด I_{B1} และ I_{B2} จะได้สมการกระแสเอาต์พุตดังนี้

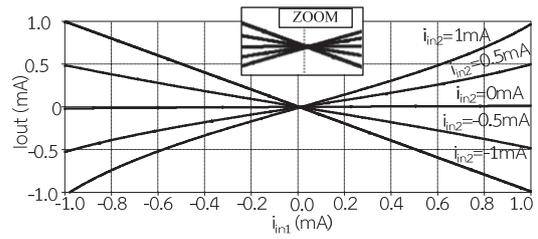
$$I_{out} = -\frac{i_{in1} I_B}{i_{in2}} \quad (12)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (12) จะเห็นได้ว่า วงจรที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 4 จะทำให้ค่ากระแสเอาต์พุต I_{out} มีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันการหารกันระหว่างสัญญาณกระแส i_{in1} และสัญญาณกระแส i_{in2} ซึ่งในกรณีนี้ i_{in1} และ i_{in2} สามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ ดังนั้นทำให้วงจรในรูปที่ 4 นี้ เป็นวงจรหารสัญญาณกระแสแบบ 4 ควอดแดรนต์ที่ได้ ทั้งนี้กระแส I_{out} ของวงจรยังไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

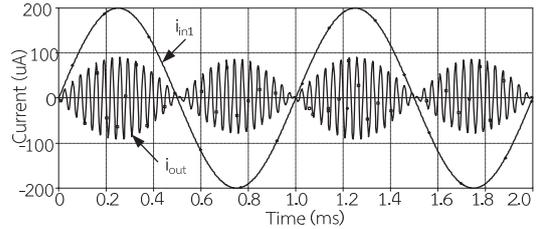
5. ผลการวิจัย

เพื่อเป็นการยืนยันการวิเคราะห์ตามทฤษฎี ของวงจรรคูณสัญญาณกระแสและหารสัญญาณกระแส ในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ได้นำมาจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้ OTA ที่สร้างขึ้นตามโครงสร้างในรูปที่ 2 สำหรับทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ตามลำดับ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของ AT&T [13] โดยกำหนดให้วงจรทำงานที่ไฟเลี้ยง ± 2 Vdc จากกราททดสอบวัดกระแสออฟเซ็ทของ OTA ที่กระแสไบแอสเท่ากับ 200 μ A มีค่าเท่ากับ -0.43 μ A และเมื่อวัดค่าความต้านทานที่เอาต์พุตของวงจรรคูณและหารสัญญาณมีค่า 5.6 k Ω และ 30 k Ω ตามลำดับ ในลำดับแรกเป็นผลการจำลองการทำงานของวงจรรคูณสัญญาณกระแส โดยแสดงคุณสมบัติการตอบสนองการถ่ายโอนต่อไฟกระแสตรง โดยที่ป้อนค่า $I_B=1$ mA จะแสดงความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุต I_{out} กับสัญญาณกระแสอินพุต i_{in1} จาก -1 mA ถึง 1 mA และสัญญาณกระแสอินพุต i_{in2} เปลี่ยนค่าจำนวน 5 ค่า โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 mA จะพบว่าความไม่เป็นเชิงเส้นจะเกิดขึ้น เมื่อ i_{in2} มีค่าเข้าใกล้ 1mA ทั้งนี้เกิดจากการที่แรงดันขาเข้าของ OTA ถูกจำกัด หากสัญญาณอินพุตมีขนาดสูงกว่าหรือเข้าใกล้ค่าดังกล่าวแล้ว OTA จะทำงานอยู่ในช่วงอิ่มตัว กล่าวคือ กระแสเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับกระแสไบแอส (I_B) ซึ่งอินพุตของวงจรรคูณสัญญาณที่ทำงานได้อยู่ในช่วง -1 mA ถึง 1 mA ดังรูปที่ 5 และเมื่อกำหนดให้ i_{in1} และ i_{in2} เป็นสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 1 kHz กระแส 200 μ A และความถี่ 30 kHz กระแส 500 μ A ตามลำดับ โดยป้อนค่า $I_B=1$ mA เป็นไฟฟ้กระแสตรง จะแสดงผลการตอบสนองทรานเซียนต์การคูณสัญญาณของวงจรดังในรูปที่ 6 จากการกำหนดค่าตามที่แสดงข้างต้น วงจรรคูณสัญญาณที่นำเสนอจะมีการดึงกำลังงาน (Power Consumption) ประมาณ 21.40 mW วงจรรคูณสัญญาณสามารถตอบสนองความถี่สูงสุด 209.08 MHz และมีค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิก (Total Harmonic Distortion : THD) 0.24 % ที่

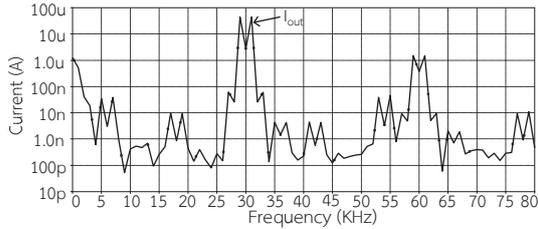
อินพุต i_{in1} ความถี่ 1 MHz กระแส 200 μ A ส่วนผลสเปกตรัมของสัญญาณวงจรรคูณสัญญาณดังในรูปที่ 7 ส่วนรูปที่ 8 เป็นผลตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวงจรรคูณสัญญาณที่ 0, 27, และ 100 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนค่าตามที่แสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่ากระแสเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแอมพลิจูดและขนาดของออฟเซ็ทไปตามอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เกิดเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ที่ใช้ และเพื่อเป็นการยืนยันว่าวงจรที่นำเสนอสามารถชดเชยผลที่เกิดจากอุณหภูมิได้ทั้งหมด ได้แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของสัญญาณเอาต์พุต (I_{out}) ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของวงจรรคูณสัญญาณ ดังรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อกระแสเอาต์พุตไม่ถึง ± 1 % นั้นแสดงให้เห็นว่า วงจรรคูณสัญญาณกระแสที่นำเสนอสามารถชดเชยผลที่เกิดจากอุณหภูมิได้ทั้งหมด ผลที่ได้สอดคล้องกับที่ได้วิเคราะห์ในสมการที่ (7) ซึ่งไม่มีเทอมของศักดาไฟฟ้าเชิงอุณหภูมิ (V_T)



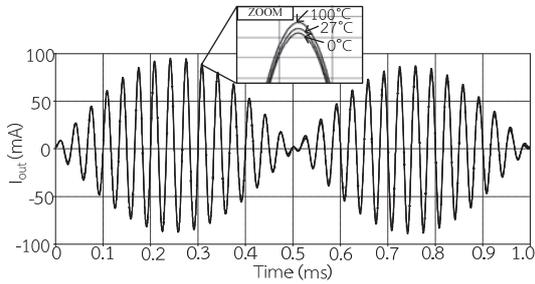
รูปที่ 5 คุณสมบัติการตอบสนองการถ่ายโอนต่อไฟกระแสตรงของวงจรรคูณสัญญาณที่นำเสนอในรูปที่ 3



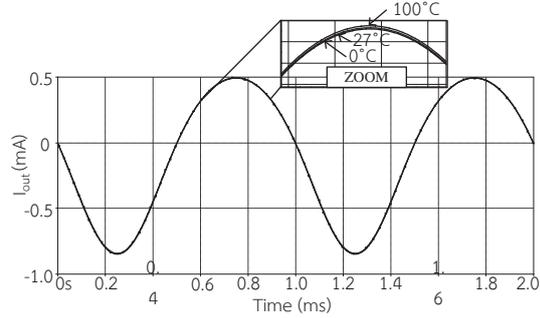
รูปที่ 6 ผลตอบสนองทรานเซียนต์การคูณสัญญาณของวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 3



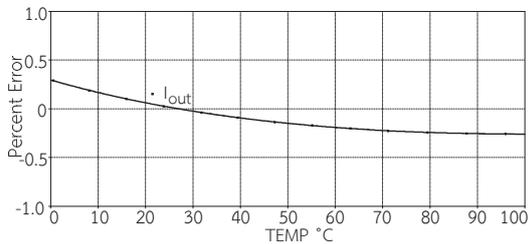
รูปที่ 7 สเปกตรัมของสัญญาณวงจรรคูณสัญญาณ



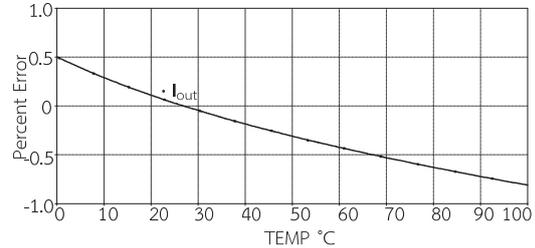
รูปที่ 8 ผลตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวงจรคูลงสัญญาณที่นำเสนอในรูปที่ 3



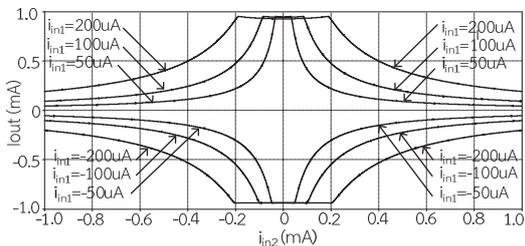
รูปที่ 12 ผลตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวงจรหารสัญญาณที่นำเสนอในรูปที่ 4



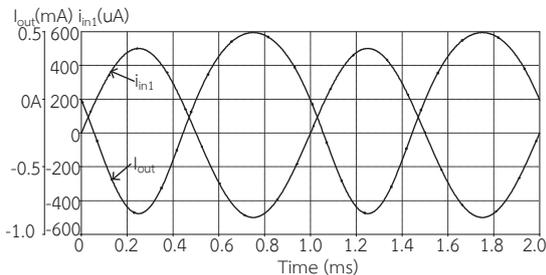
รูปที่ 9 เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของสัญญาณเอาต์พุต (I_{out}) ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของวงจรคูลงสัญญาณที่นำเสนอในรูปที่ 3



รูปที่ 13 เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของสัญญาณเอาต์พุต (I_{out}) ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของวงจรหารที่นำเสนอในรูปที่ 4



รูปที่ 10 คุณสมบัติการตอบสนองการถ่ายโอนต่อไฟกระแสตรงของวงจรหารสัญญาณที่นำเสนอในรูปที่ 4



รูปที่ 11 ผลตอบสนองทรานเซียนต์ของวงจรหารสัญญาณที่นำเสนอในรูปที่ 4

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นถึงผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4 วงจรหารสัญญาณแบบ 4 ควอดแรนจ์ เพื่อหาคุณลักษณะการถ่ายโอนทางไฟตรงหรือความสัมพันธ์ของกระแส I_{out} และ i_{in2} เมื่อ i_{in1} มีค่าต่างๆ โดยกำหนด i_{in1} มีค่า 1 mA ซึ่งอินพุต i_{in2} ของวงจรหารสัญญาณที่ทำงานได้ในช่วงลบที่ -1 mA ถึง -0.2 mA และช่วงบวกที่ 0.2 mA ถึง 1.0 mA ส่วนในรูปที่ 11 แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองทรานเซียนต์การหารสัญญาณที่นำเสนอในรูปที่ 4 โดยกำหนดให้ i_{in1} และ i_{in2} เป็นสัญญาณไซน์ความถี่ 1 kHz ที่กระแส 500 μ A และความถี่ 1 kHz ที่กระแส 200 μ A ตามลำดับ แล้วป้อนค่า I_B เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1 mA จากการกำหนดค่าตามที่แสดงข้างต้น วงจรหารสัญญาณที่นำเสนอจะมีการดึงกำลังงาน (Power Consumption) ประมาณ 18.90 mW วงจรหารสัญญาณสามารถตอบสนองความถี่สูงสุด 41.20 MHz และมีค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิก (Total Harmonic Distortion : THD) 0.24 % ที่อินพุต i_{in1} ความถี่ 1 MHz กระแส 200 μ A ส่วนในรูปที่ 12 เป็นผลตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวงจรหารสัญญาณที่ 0, 27, และ 100 องศาเซลเซียส เมื่อป้อนค่าตามที่แสดงในรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า กระแสเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแอมพลิจูดและขนาดของออฟเซตไปตามอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เกิดเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติ

ของอุปกรณ์ที่ใช้ และเพื่อเป็นการยืนยันว่าวงจรที่นำเสนอสามารถชดเชยผลที่เกิดจากอณูหภูมิได้ทั้งหมด ได้แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของสัญญาณเอาต์พุต (I_{out}) ต่ออณูหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของวงจรรหัสสัญญาณ ดังรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าเมื่ออณูหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อกระแสเอาต์พุตไม่ถึง $\pm 1\%$ นั้นแสดงให้เห็นว่า วงจรรหัสสัญญาณกระแสที่นำเสนอสามารถชดเชยผลที่เกิดจากอณูหภูมิได้ทั้งหมด ผลที่ได้สอดคล้องกับที่ได้วิเคราะห์ในสมการที่ (12) ซึ่งไม่มีเทอมของศักดาไฟฟ้าเชิงอณูหภูมิ (V_T) อย่างไรก็ตาม ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้ เป็นผลอันเนื่องมาจากค่าผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันไปเป็นกระแสของ OTA และเป็นผลมาจากค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงในกรณีที่อุปกรณ์ OTA ทำงานไม่เป็นอุดมคติ

6. อภิปรายและสรุปผล

บทความนี้ นำเสนอการสังเคราะห์และออกแบบวงจรรหัสสัญญาณและหารสัญญาณแอนะล็อกโหมตกระแส 4 ควอดแดรนต์ ที่เป็นวงจรรหัสจ่าย สร้างจากอุปกรณ์แอคทีฟคือ OTA เพียงอย่างเดียวเท่านั้น จำนวน 2 ตัว ซึ่งมีใช้ทั่วไปในเชิงพาณิชย์ โดยวงจรมีข้อเด่นคือ กระแสเอาต์พุตของวงจรทั้งสองเป็นอิสระจากการเปลี่ยนแปลงอณูหภูมิและสามารถควบคุมขนาดของสัญญาณเอาต์พุตได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ จากผลการจำลองการทำงานของวงจรรหัสด้วยโปรแกรม PSPICE แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของวงจรรหัสและหารสัญญาณดังกล่าว จึงเหมาะสำหรับการนำไปพัฒนาให้อยู่ในรูปของวงจรรวม เพื่อนำไปใช้ในอุปกรณ์ที่ทำงานในโหมตกระแสโดยใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่าย เช่น ระบบโทรคมนาคมแบบไร้สาย เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Weixin, G. Hongyi, C. and Seevinck, E. 1997. Quadratictranslinear CMOS multiplier-divider circuit. *Electron Letters*, 33, p. 860-861.
- [2] Baturone, I. et al. 1998. A CMOS current-mode multiplier-divider circuit. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, p. 520-523.
- [3] Bogdan, M. 1998. Analog multiplier-divider. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, p. 493-496.

- [4] วินัย ใจกล้า และคณะ. 2549. วงจรรหัสและหารสัญญาณแอนะล็อกโหมตกระแสชนิด 4 ควอดแดรนต์โดยใช้ CCCDBAs. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44*, น. 27-34.
- [5] Siripruchyanun, M. and Jaikla, W. 2008. A current-mode analog multiplier/divider based on CCCDTA. *International Journal of Electronics and Communications*, 62, p. 223-227
- [6] อำนวย ประจง และคณะ. 2551. วงจรรหัสสัญญาณแอนะล็อกโหมตกระแส 4 ควอดแดรนต์และหาร 2 ควอดแดรนต์ โดยใช้ DO-CCCCTA เพียงตัวเดียว. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6*, น. 252-256.
- [7] Yuce, E. 2008. Design of a simple Current-Mode Multiplier Topology Using a Single CCCII. *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement*, 57(3), p. 631-637.
- [8] Petchakit, W. et al. 2010. A Current-mode CCCII-based Analog Multiplier Divider. *International Conference on Electrical Engineering Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) 2010*, P. 221-224.
- [9] Petchakit, W. et al. 2010. Design of Current Amplifier Divider and Multiplier/Divider Based ON Current Division Technique. *International Technical Conference ON Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*, P. 379-382.
- [10] Kaewdang, K. et al. 2003. A Wide-band Current-mode OTA-Based Analog Multiplier-Divider. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, p. 349-352.
- [11] วิจิตร ทรัพย์กิจ และ สิทธิพร ทรัพย์กิจ. 2548. วงจรรหัสสัญญาณอนาล็อกโดยใช้ OTAs. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28*, น. 1241-1244.

- [12] สายัณห์ ฉายวาส และคณะ. 2556. การออกแบบ วงจรชดเชยอุณหภูมิสำหรับวงจรขยายความนำชนิด ซีมอส และการประยุกต์ใช้งาน. **วารสารครุศาสตร์ อุตสาหกรรม**, 12(3), น. 64-72.
- [13] Jaikla, W. And Siripruchyanun M. 2006. Current Controlled Current Differencing Transconductance Amplifier (CCCDTA): A New Building Block and Its Applications. **Proceedings of ECTI conference 2006**, p. 348-351.