

วงจรรูณสี่ควอดแดนต์โหมดกระแสโดยใช้วงจรรพูล และวงจรถ้าลังสอง

อดิศักดิ์ มนต์ประกัสสร¹ และ กอบชัย เดชหาญ²
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นข้อเสนอเกี่ยวกับ วงจรรูณสี่ควอดแดนต์ที่ทำงานในโหมดกระแส โดยใช้เทคนิคควอดเตอร์-สแควร์ ซึ่งวงจรรจะออกแบบโดยใช้มอสเฟตโดยมีอินพุตกับเอาพุตของวงจรถ้าลังสอง โดยจะใช้วงจรรพูลโหมดกระแสที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ซึ่งใช้วงจรรสะท้อนกระแสในการออกแบบและมีเอาพุตเป็นค่าผลบวกและผลลบของกระแสโดยตรง 1 วงจรรวงจรถ้าลังสอง 2 วงจรร โดยมีการทดสอบการเลียนแบบ ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ และใช้โปรแกรม PSpice วงจรรที่เสนอนี้เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้น

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

A Design of Current Mode Four-Quadrant Multiplier using Pool and Squaring Circuits

Adisak Monpapassorn¹ and Kobchai Dejhan²

King Mongkut's Institute of Technology Lardkrabang

Abstract

This paper proposes a current mode four-quadrant multiplier circuit using quarter-square technique by using MOSFETS with input and output current. The circuit technique uses a new current mode pool circuit which design by using current mirror circuits and the output are direct added and subtracted with two squaring circuit. The simulating results and performances are shown by using mathematical equations and PSpice program. This circuit is suitable for applying with analog signal processing.

¹ Graduate Student, Telecommunications Engineering Department

² Associate Professor, Telecommunications Engineering Department

1. บทนำ

วงจรคุณสี่ควอดแดนต์เป็นวงจรถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในด้าน การประมวลผลสัญญาณเชิงเส้น ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำมอสเฟตเข้ามาแทนที่ไบโพลาร์ ทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายแก่การนำมาสร้างเป็นวงจรรวม ใช้พื้นที่ในชิปน้อย ค่าความต้านทานอินพุตที่สูง สัญญาณรบกวนและกำลังสูญเสียที่ต่ำ เนื่องจากโครงสร้างของ มอสเฟตที่มีอินพุตเป็นแรงดันและเอาพุตเป็นกระแส จึงสะดวกแก่การนำมาสร้างวงจรใน โหมดแรงดัน ดังวงจรคุณสี่ควอดแดนต์ใน [1-4] สำหรับงานด้านการประมวลผลสัญญาณ เชิงเส้นการใช้สัญญาณกระแสจะสะดวกและง่ายกว่าสัญญาณแรงดันเช่นการรวม (บวก) หรือการหักล้าง (ลบ) สัญญาณสามารถกระทำได้โดยตรงซึ่งไม่สามารถทำได้ในสัญญาณ แรงดัน และในด้านการคัดลอก (copy) สัญญาณในสัญญาณกระแสจะใช้วงจรสะท้อนกระแส ซึ่งง่ายและใช้อุปกรณ์น้อยกว่าวงจรตามแรงดันที่ใช้ในสัญญาณแรงดัน โดยในบทความนี้ได้ นำเสนอ วงจรคุณสี่ควอดแดนต์ที่ทำงานในโหมดกระแสซึ่งออกแบบโดยใช้เทคนิคควอดเตอร์- สแควร์ดังใน [3] และ [4] ซึ่งเป็นวงจรคุณสี่ควอดแดนต์ในโหมดแรงดันโดยที่วงจรใน [3] อาศัยวงจรออปแอมป์เป็นวงจรววกและลบแรงดันกับวงจรยกกำลังและรวมสัญญาณ และ วงจรใน [4] อาศัยวงจรพูล [5] เป็นวงจรววกและลบแรงดันอินพุตและอาศัยกฎกำลังสอง ของมอสเฟตในการยกกำลังค่าผลบวกและผลลบของแรงดันอินพุต โดยวงจรคุณสี่ควอด แดนต์โหมดกระแสในบทความนี้ได้ทำการออกแบบวงจรพูลโหมดกระแสขึ้นมาใหม่ซึ่ง มีเอาพุตของวงจรเป็นผลบวกและผลลบของกระแสโดยตรงซึ่งทำให้เทอมของค่าคงที่ ที่เป็น ตัวคูณในสมการเอาพุตของวงจรมีเปอร์เซ็นต์เข้าใกล้ 1 มากยิ่งขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้ค่าของ กระแส เอาพุตของวงจรมีค่าใกล้เคียงค่าจริงมากขึ้นด้วย

2. หลักการออกแบบวงจรและการทำงาน

หลักการออกแบบวงจรจะใช้เทคนิคควอดเตอร์-สแควร์ ดังวงจรคุณสี่ควอดแดนต์ โหมดแรงดันใน [3] และ [4] ซึ่งมีหลักการจากสมการ

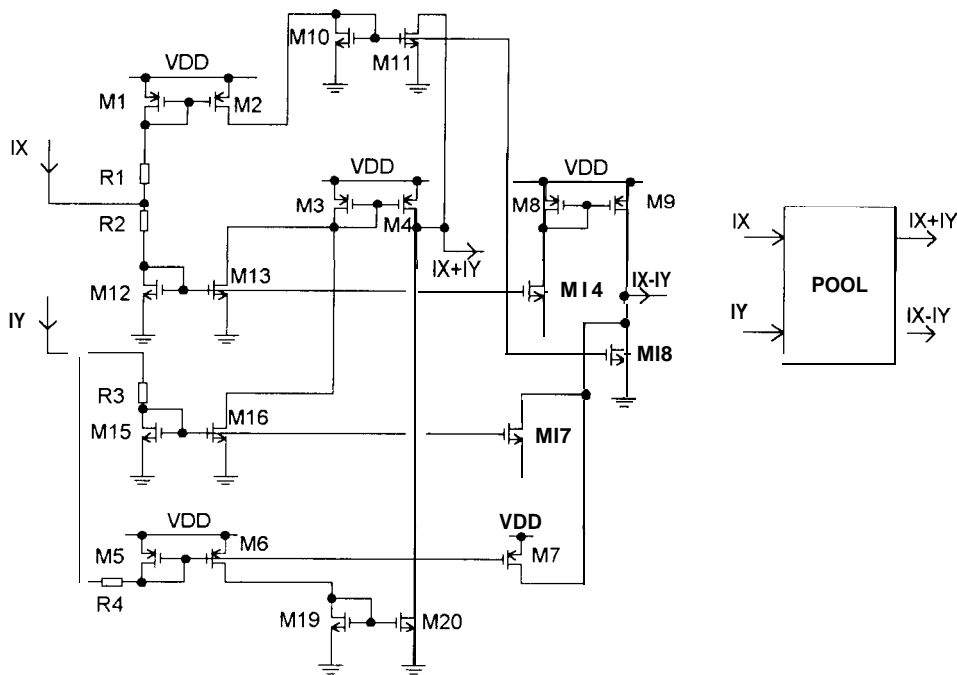
$$(a+b)^2 - (a-b)^2 = 4 a b \quad (1)$$

ถ้า a และ b เป็นกระแสอินพุตทั้งสองเราจะได้รับฟังก์ชันของการคูณโดยง่าย

ในบทความนี้จะทำการออกแบบวงจรเป็นวงจรคุณสี่ควอดแดนต์ในโหมดกระแส โดยมีการออกแบบวงจรพูลโหมดกระแสขึ้นมาใหม่ และในส่วนของวงจรยกกำลังสองผลบวก และผลลบของกระแสนั้นจะใช้วงจรยกกำลังสองกระแสจาก [6] และจะใช้วงจรสะท้อนกระแส ในการหาผลต่างของค่าผลบวกและผลลบยกกำลังสองของกระแสอินพุตทั้งสอง

2.1 วงจรพูลโหมตกระแส

จากวงจรบวกและลบกระแสส่วนมากในเทอมของผลบวกและผลลบของกระแสที่เข้าพุดจะมีค่าคงที่ติดมาด้วย เมื่อนำมาสร้างเป็นวงจรคูณสี่ควอดแดนท์จะทำให้เปอร์เซ็นต์ของค่าคงที่ที่เป็นตัวคูณสมการเข้าพุดของวงจรคูณสี่ควอดแดนท์จะเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้เข้าพุดของวงจรคูณสี่ควอดแดนท์จากค่าที่เป็นจริงมากขึ้น หรือในวงจรบวกและลบกระแสที่ [6] มีค่าของกระแสอินพุตตัวหนึ่งเป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ซึ่งมีทิศทางการไหลของกระแสทางเดียว ทำให้ไม่สามารถแทนค่าบวกและค่าลบของกระแสอินพุตของวงจรคูณสี่ควอดแดนท์ได้ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้ออกแบบวงจรพูลโหมตกระแสซึ่งทำหน้าที่บวกและลบกระแสอินพุตโดยมีค่ากระแสเข้าพุดเป็นผลบวกและผลลบของค่ากระแสอินพุตทั้งสองโดยตรงที่ทำงานได้ทั้งสี่ควอดแดนท์ ซึ่งจะออกแบบโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟ วงจรพูลโหมตกระแสที่สร้างจะใช้วงจระสะท้อนกระแสชนิด N และชนิด P เป็นหลัก โดยรูปของวงจรพูลโหมตกระแส และบล็อกจะแสดงในรูปที่ 1 จากรูปวงจรจะใช้มอสเฟตทั้งหมด 20 ตัว แยกเป็น P แชนแนล 9 ตัว และ N แชนแนล 11 ตัว โดยมีมอสเฟตทุกตัวที่ใช้จะมีค่า $W = 150\mu\text{m}$, $L = 10\mu\text{m}$



รูปที่ 1 วงจรพูลโหมตกระแส และบล็อกสัญลักษณ์

สำหรับชุดของ I_x จะมี M1, M2 เป็นชุดสะท้อนกระแสสำหรับ I_x เป็นลบ และ M12, M13 สำหรับ I_x เป็นบวก ส่วนชุดของ I_y จะมี M5, M6 เป็นชุดสะท้อนกระแสสำหรับ I_y เป็นลบ และ M15, M16 สำหรับ I_y เป็นบวก ตามลำดับ

สำหรับชุดของ $(I_X + I_Y)$ ถ้า I_X และ I_Y เป็นบวก วงจรสะท้อนกระแสชุด M12, M13 และ M15, M16 จะสะท้อนกระแส I_X และ I_Y ตามลำดับ ผ่านวงจรสะท้อนกระแสชุด M3, M4 ได้กระแส $(I_X + I_Y)$ ออกที่จุดขาเดรนของ M4 ถ้าในกรณีที่ว่า I_X หรือ I_Y เป็นลบจะถูกสะท้อนกระแสผ่านชุด M1, M2, M10, M11 หรือ M5, M6, M19, M20 ตามลำดับ เพื่อไปลบกระแสเข้าพุตลงกราวด์

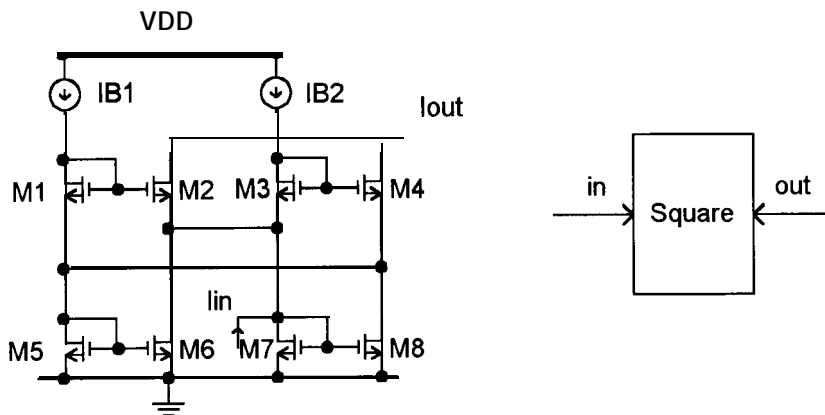
สำหรับชุดของ $(I_X - I_Y)$ ถ้า I_X และ I_Y เป็นบวก วงจรสะท้อนกระแสชุด M12, M14 และ M15, M17 จะสะท้อนกระแส I_X และ I_Y ตามลำดับ ผ่านวงจรสะท้อนกระแสชุด M8, M9 ได้กระแส $(I_X - I_Y)$ ออกที่จุดขาเดรนของ M9 ตามวงจร ถ้าในกรณีที่ว่า I_X หรือ I_Y เป็นลบจะถูกสะท้อนกระแสผ่านชุด M1, M2, M10, M18 หรือ M5, M7 ตามลำดับ เพื่อไปลบหรือบวกกระแสเข้าพุตตามลำดับ

สำหรับ R_1, R_2, R_3, R_4 จะใช้ตัวต้านทานค่า 10 กิโลโอห์ม เพื่อเป็นตัวปรับให้ค่ากระแสเดรนของ M1, M12, M15, M5, มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุดเมื่อ I_X และ I_Y เป็นศูนย์

2.2 วงจรยกกำลังสองโหมตกระแส

วงจรรยกกำลังสองโหมตกระแส ดังเอกสารอ้างอิง [6] จะสร้างจาก วงจรสะท้อนกระแส 4 ชุด ดังรูปที่ 2 ซึ่งจะได้สมการที่ (2) เป็นกระแสเข้าพุต

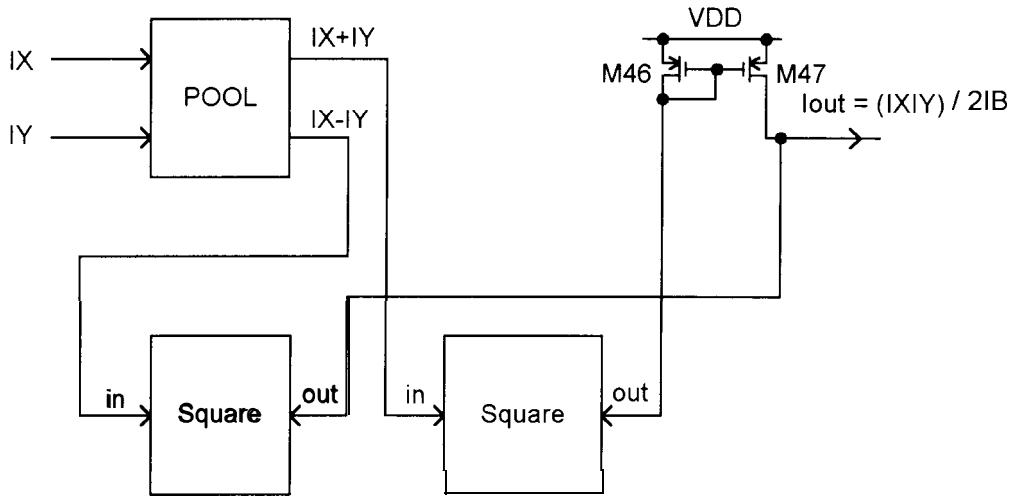
$$I_{out} = \frac{1}{8I_{B}} (I_{in})^2 \quad (2)$$



รูปที่ 2 วงจรรยกกำลังสองโหมตกระแส และบล็อกสัญลักษณ์

จากรูปที่ 2 เป็นวงจรรยกกำลังสองโหมตกระแส ซึ่งจะใช้มอสเฟตแบบ N แชนแนล ทั้งหมด 8 ตัว ซึ่งมอสเฟตทุกตัวมีค่า $W = 100 \mu\text{m}$, $L = 10 \mu\text{m}$ กระแสไบอัส $I_B = I_{B1} = I_{B2} = 20 \mu\text{A}$

2.3 วงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมดกระแส ที่สร้างจากวงจรพูล และ วงจรยกกำลังสองโหมดกระแส



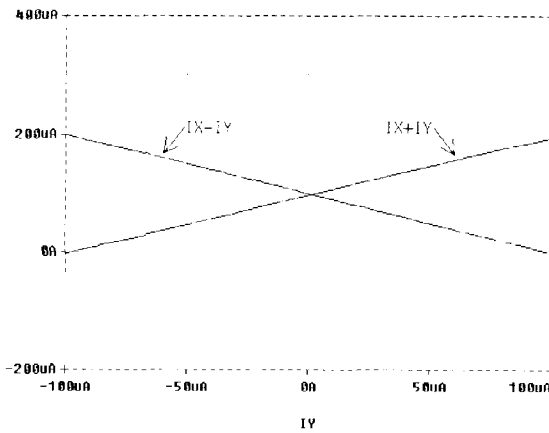
รูปที่ 3 วงจรคูณสี่ควอดแดนท์โหมดกระแสที่สร้างจากวงจรพูลและวงจรรยกกำลังสองโหมดกระแส

จากรูปที่ 3 กระแส I_X กับ I_Y ผ่านเข้าบล็อกวงจรพูลจะได้กระแส $(I_X + I_Y)$ กับ $(I_X - I_Y)$ ออกทางเข้าพุต ซึ่งจากนั้นกระแส $(I_X + I_Y)$ กับ $(I_X - I_Y)$ จะถูกป้อนเป็นกระแสอินพุตให้กับวงจรรยกกำลังสองโหมดกระแส ซึ่งจะได้เข้าพุตออกมาเป็นกระแส $\frac{1}{8I_B} (I_X + I_Y)^2$ และกระแส $\frac{1}{8I_B} (I_X - I_Y)^2$ ตามลำดับจากนั้นจึงนำมาผ่านวงจรสะท้อนกระแส และใช้หลักการกฎของเคอร์ชอฟเพื่อลบกระแสให้ได้กระแสเข้าพุต ดังสมการ (3)

$$\begin{aligned}
 I_{out} &= \frac{1}{8I_B} (I_X + I_Y)^2 - \frac{1}{8I_B} (I_X - I_Y)^2 \\
 &= \frac{1}{8I_B} \left((I_X + I_Y)^2 - (I_X - I_Y)^2 \right) \\
 &= \frac{1}{8I_B} (4I_X I_Y) \\
 &= \frac{I_X I_Y}{2I_B} \tag{3}
 \end{aligned}$$

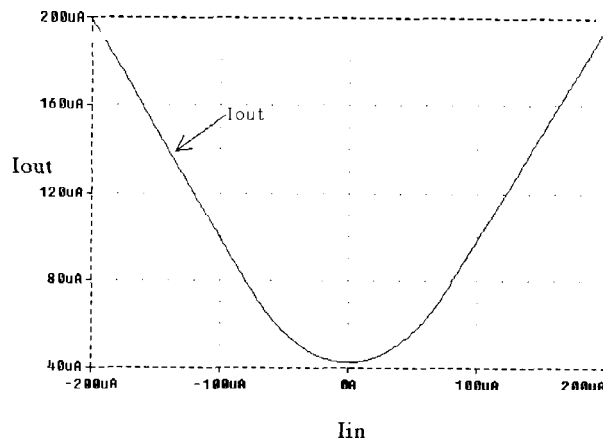
3. ผลการทดลอง

วงจรพอลิโหมตกระแสในรูปที่ 1 นำมาเลียนแบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice ได้กราฟแสดงผลการทดลองดังในรูปที่ 4



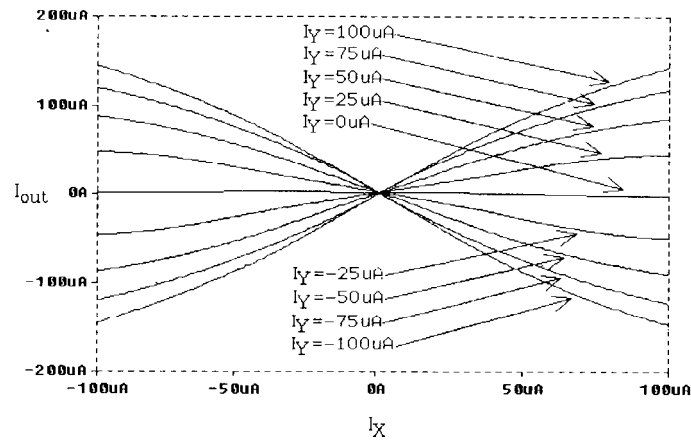
รูปที่ 4 กราฟ $(I_X + I_Y)$ และ $(I_X - I_Y)$ เมื่อ $I_X = 100\mu\text{A}$ และ $I_Y = -100\mu\text{A}$ ถึง $100\mu\text{A}$

ส่วนวงจรยกกำลังสองกระแสในรูปที่ 2 นำมาเลียนแบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice ได้กราฟแสดงผลการทดลองดังในรูปที่ 5



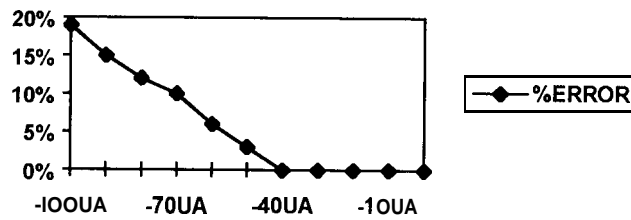
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{in} กับ I_{out} ของวงจรยกกำลังสองโหมตกระแส

และวงจรคูณสี่ควอดแดนต์โหมตกระแสที่แสดงในรูปที่ 3 ได้นำมาเลียนแบบการทำงานของวงจร โดยใช้โปรแกรม PSpice ได้ผลการทดลองเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{out} กับ I_X และ I_Y ดังรูปที่ 6

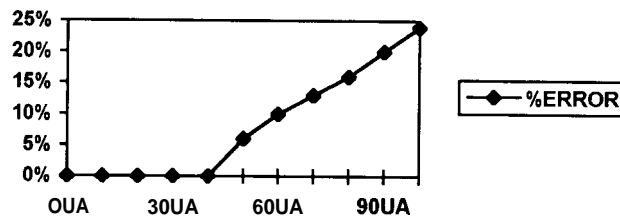


รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{out} กับ I_x และ I_Y โดยให้ $I_x = -100\mu A$ ถึง $100\mu A$
 $I_Y = -100\mu A, -75\mu A, -50\mu A, -25\mu A, 0, 25\mu A, 50\mu A, 75\mu A, 100\mu A$

จากกราฟจะเห็นได้ว่าย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรจะอยู่ที่ประมาณ $-40\mu A$ ถึง $40\mu A$ สำหรับค่ากระแส I_x เนื่องจากข้อจำกัดของย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรพอลิโหมดกระแสซึ่งทำงานได้ดีในช่วงที่กระแสมีค่าต่ำ และค่าความผิดพลาดของวงจรยกกำลังสองกระแสในช่วงกระแสอินพุตมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ โดยกราฟแสดงค่าความผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรจะแสดงในรูปที่ 7



(a)



(b)

รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจร โดยสุ่มจากกราฟของ $I_Y = -100\mu A$ โดยในรูปที่ 7 (a) แสดงเมื่อค่า I_x เท่ากับ $-100\mu A$ ถึง 0 และรูปที่ 7 (b) แสดงเมื่อค่า I_x เท่ากับ 0 ถึง $100\mu A$

4. สรุป

วงจรรูณสี่ควอดแดนต์โหมตกระแสที่ได้นำเสนอในบทความนี้ สร้างขึ้นจากวงจรรูณโหมตกระแส และวงจรรูณกำลังสองโหมตกระแส ซึ่งเป็นวงจรมีประสิทธิภาพดี และง่ายแก่การประยุกต์ใช้งานในด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเส้นในรูปของกระแส ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับวงจรรูณโหมตแรงดันใน [3] และ [4] แล้วจะเห็นได้ว่าวงจรมีประสิทธิภาพที่ได้นำเสนอจะใช้มอสเฟตน้อยกว่ามาก จากการทดสอบเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice จะเห็นได้ว่าผลของการทดสอบจะได้ใกล้เคียงกับทางทฤษฎีในย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นของวงจรรูณ

5. เอกสารอ้างอิง

1. เกียรติศักดิ์ คมวัชระ, วันชัย ธีร์จุฑา และ วัลลภ สุระกำพลธร, 2537, “วงจรรูณอนาลอกโดยใช้ CMO”, การประชุมวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17 หน้า 562-565, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2. พรพรรณ ดุลยกาญจน์, พิพัฒน์ พรหมมี, กอบชัย เดชหาญ และ ถวิล กิ่งทอง, 2537 “วงจรรูณสัญญาณแบบสี่ควอดแดนต์โดยใช้ซีมอส,” การประชุมวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, หน้า 608-611.
3. พรเทพ จันทรคุณภาส, ธงชัย มณีชูเกตุ, วิภา แสงพิสิทธิ์, ปราโมทย์ วาดเขียน และ วิวัฒน์ กิรานนท์, 2539, “วงจรรูณสัญญาณด้วยหลักการควอดเตอร์-สแควร์โดยใช้ซีมอส”, การประชุมวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 19, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า EL-174 - EL-177.
4. Liu, S.I. and Chang, C.C., 1995, “CMOS Analog Divider and Four-Quadrant Multiplier Using Pool Circuits,” *IEEE J.Solid-State Circuits*, vol 30, pp. 1025-1029.
5. Tsay, S.W. and Newcomb, R., 1991, “A neuro-type pool arithmetic unit,” *Proc. IEEE ISCAS'91* (Singapore), pp.2518-2521.
6. Ismail, M. and Fiez, T., 1994, “Analog VLSI Signal and Information Processing,” McGraw-Hill Book Co., pp. 225-304.