



วงจรถอดรื้อเจอร์ออสซิลเลเตอร์อันดับสามโดยใช้วงจรถอด OTRA

อิทธิพล กันศิริ*

นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มนตรี คำเงิน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-4912-1252 อีเมล: ittipon.hack@gmail.com

รับเมื่อ 7 มิถุนายน 2557 ตอบรับเมื่อ 16 ธันวาคม 2557

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2014.12.007 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรถอดรื้อเจอร์ออสซิลเลเตอร์อันดับสามโดยใช้วงจรถอดโอเปอเรชันแนลทรานส์รีซิสแตนซ์แอมพลิไฟเออร์ (Operational Transresistance Amplifier: OTRA) เป็นวงจรถอดพื้นฐาน วงจรถอดออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอกำเนิดสัญญาณได้แม่นยำ เงื่อนไขของการออสซิลเลทและความถี่ของการออสซิลเลทสามารถควบคุมได้อิสระจากกัน ด้วยการกำหนดค่าอุปกรณ์พาสซีฟ ขั้วสัญญาณเอาต์พุตมีอิมพีแดนซ์ต่ำซึ่งทำให้สามารถต่อใช้งานกับโหลดได้โดยไม่ต้องการวางจบบัฟเฟอร์ วงจรถอดที่นำเสนอจะถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อยืนยันการทำงานของวงจรถอด

คำสำคัญ: วงจรถอดรื้อเจอร์ออสซิลเลเตอร์อันดับสาม วงจรถอดโอเปอเรชันแนลทรานส์รีซิสแตนซ์แอมพลิไฟเออร์ วงจรโหมดแรงดัน



A Third-order Quadrature Oscillator Using OTRAs

Ittipon Kansiri*

Student, Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Montree Kumngern

Assistant Professor, Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08-4912-1252, E-mail: ittipon.hack@gmail.com

Received 7 June 2014; Accepted 16 December 2014

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2014.12.007 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This paper presents a third-order quadrature oscillator using operational transresistance amplifiers (OTRAs) as an active element. The proposed oscillator provides high precision of oscillating frequency. Oscillating condition and oscillating frequency can be orthogonally controlled by setting the value of passive components. Output terminals possess low impedance which can be directly connected to the load without buffer circuits. PSPICE simulators are used to confirm the workability of the proposed structure.

Keywords: Third-order Quadrature Oscillator, Operational Transresistance Amplifier, Voltage-mode Circuit

1. บทนำ

วงจรร OTA เป็นอุปกรณ์แอมป์ที่มีอินพุตกระแสสองอินพุตและเอาต์พุตแรงดันหนึ่งเอาต์พุต อุปกรณ์ชนิดนี้มีคุณสมบัติคือ มีความต้านทานทางอินพุตและเอาต์พุตต่ำ ด้วยเหตุนี้วงจรร OTA จึงมีค่าพารามิเตอร์แฝง เช่น ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน มีค่าเล็ก ซึ่งได้กล่าวไว้ใน [1]-[3] ดังนั้นวงจรรต่าง ๆ ที่ใช้วงจรร OTA เป็นวงจรรพื้นฐานจะให้ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนที่แม่นยำ โดยเฉพาะเมื่อต่อป้อนกลับแบบลบเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรรที่ใช้วงจรร CCTA (Current Conveyor Transconductance Amplifier) หรือ วงจรร CDTA (Current Differencing Transconductance Amplifier) เป็นวงจรรพื้นฐานเพราะโดยปกติวงจรร CCTA และ CDTA จะมีขั้วเอาต์พุตกระแสที่มีอิมพีแดนซ์สูง ดังนั้นเมื่อนำไปต่อป้อนกลับ ค่าพารามิเตอร์แฝงที่ขั้วเอาต์พุตเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อการตอบสนองความถี่ของวงจรร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่อินพุตอิมพีแดนซ์ไม่เข้าใกล้ศูนย์ และถ้าเปรียบเทียบกับโครงสร้างกับวงจรร CDDBA (Current Differencing Buffered Amplifier) วงจรร OTA จะมีโครงสร้างที่ง่ายกว่าเพราะไม่ต้องใช้ค่าอิมพีแดนซ์มาทำการแปลงกระแสความแตกต่างอินพุตเป็นแรงดันและไม่ใช้วงจรรบัฟเฟอร์ทางเอาต์พุต นอกจากนี้ OTA ยังมีค่า Slew Rate และค่าแบนด์วิดท์ที่กว้างที่เป็นอิสระจากอัตราการขยายเมื่อเปรียบเทียบกับออปแอมป์ [1]-[3] ดังนั้นที่ผ่านมาจึงมีวงจรรแอนาลอกที่ใช้วงจรร OTA เป็นวงจรรพื้นฐานนำเสนอไว้มากมายในวารสารต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น [4]-[16]

วงจรรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์เป็นวงจรรที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสาร ระบบเครื่องมือวัด และระบบควบคุม เช่น สามารถนำมาใช้ในการผสมสัญญาณแบบควอดราเจอร์และตัวกำเนิดสัญญาณแบบซิงเกิลไซด์แบนด์ เป็นต้น เนื่องจากโครงข่ายที่มีอันดับสูง จะให้ความแม่นยำสูง มีค่าตัวประกอบคุณภาพสูง และมีการตอบสนองความถี่ที่ดี [17] ดังนั้นจึงมีวงจรรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ที่สร้างจากสมการโพลีโนเมียลอันดับที่สาม หรือเรียกว่าวงจรรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์

อันดับที่สาม นำเสนอไว้มากมายในวารสารต่าง ๆ [18]-[29] วงจรรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์อันดับที่สามที่ใช้วงจรร OTA เป็นวงจรรพื้นฐานได้ถูกนำเสนอไว้แล้วใน [26], [27] แต่วงจรรใน [26] ยังมีข้อเสียคือต้องการเงื่อนไขความสมพ่วงกันของค่าอุปกรณ์ เช่น $R=R_1=R_2$ และ $C=C_1=C_2$ และถึงแม้วงจรรที่นำเสนอจะใช้อุปกรณ์แอมป์และพาสซีฟเท่ากันกับวงจรรใน [27] แต่การออกแบบวงจรรไม่เหมือนกัน จากข้อดีของวงจรร OTA ที่ได้กล่าวมา บทความนี้จึงได้นำมาสร้างเป็นวงจรรควอดราเจอร์อันดับที่สาม วงจรรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอสามารถกำเนิดสัญญาณได้อย่างแม่นยำ วงจรรสามารถควบคุมค่าความถี่และเงื่อนไขการออสซิลเลทได้ด้วยอุปกรณ์พาสซีฟอย่างละหนึ่งตัว ค่าความถี่ของการออสซิลเลทและเงื่อนไขของการออสซิลเลทสามารถควบคุมได้อย่างอิสระจากกันโดยการกำหนดค่าอุปกรณ์ วงจรรที่นำเสนอมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำจึงสามารถต่อกับโหลดได้โดยตรงโดยไม่ต้องการวงจรรบัฟเฟอร์

2. วงจรรที่นำเสนอ

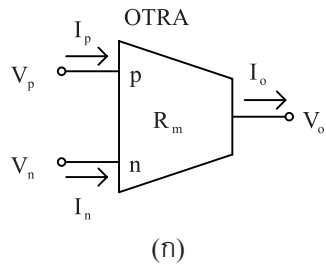
สัญลักษณ์ของวงจรร OTA สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1(g) และคุณสมบัติของวงจรรแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{pmatrix} V_p \\ V_n \\ V_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ R_m & -R_m & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_p \\ I_n \\ I_o \end{pmatrix} \quad (1)$$

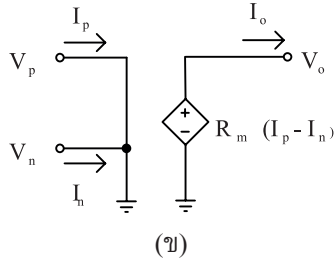
โดยที่ R_m คือค่าอัตราการขยายทรานส์ซิสแตนซ์ (Transresistance Gain) ของวงจรร OTA I_p และ I_n คือกระแสอินพุต V_p และ V_n คือแรงดันที่ขั้ว p และขั้ว n ตามลำดับ ส่วน V_o คือแรงดันเอาต์พุต วงจรรเสมือน OTA แสดงได้ดังรูปที่ 1(ข)

วงจรรออสซิลเลเตอร์อันดับที่สามสามารถสร้างได้จากสมการโพลีโนเมียลอันดับที่สาม [18] คือ

$$N(s) = a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3 \quad (2)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 วงจรOTRA(ก) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้า(ข) วงจรเสมือน

ถ้ากำหนดให้ $N(s) = 0$ และ $s = j\omega$ สมการที่ (2) จะกลายเป็นสมการคุณสมบัตินอของออสซิลเลเตอร์อันดับที่สามซึ่งแสดงได้คือ

$$0 = -j\omega^3 a_0 - \omega^2 a_1 + j\omega a_2 + a_3 \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ของค่าจริงและค่าจินตภาพจะได้สมการสองสมการคือ

$$a_3 - \omega^2 a_1 = 0 \quad (4)$$

และ

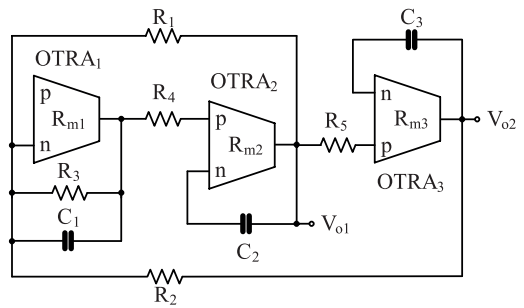
$$\omega a_2 - \omega^3 a_0 = 0 \quad (5)$$

จากสมการที่ (4) และ (5) ค่าเงื่อนไขของการออสซิลเลทสามารถกำหนดได้คือ

$$a_0 a_3 = a_1 a_2 \quad (6)$$

และความถี่ของการออสซิลเลทสามารถกำหนดได้คือ

$$\omega = \sqrt{\frac{a_3}{a_1}} = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}} \quad (7)$$



รูปที่ 2 วงจรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอ

วงจรถอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์อันดับที่สามที่ใช้วงจรถอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 2 วงจรที่นำเสนอประกอบด้วยวงจรถอดราเจอร์ OTRA สามวงจรถอดราเจอร์ห้าตัวและตัวเก็บประจุสามตัว สมการคุณสมบัตินอของวงจรถอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์สามารถเขียนคือ

$$s^3 + \frac{1}{C_1 R_2} s^2 + \frac{1}{C_1 C_2 R_3 R_4} s + \frac{1}{C_1 C_2 C_3 R_4 R_5} = 0 \quad (8)$$

เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์สมการที่ (8) โดยใช้สมการที่ (6) และ (7) ค่าเงื่อนไขของการออสซิลเลทและความถี่ของการออสซิลเลทกำหนดได้ดังสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ คือ

$$R_5 = \frac{C_1 R_2 R_3}{C_3 R_1} \quad (9)$$

และ

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_3 R_4}} \quad (10)$$

จากสมการที่ (9) และ (10) จะเห็นว่าค่าเงื่อนไขของการออสซิลเลทสามารถควบคุมได้โดยกำหนดค่า R_5 ส่วนค่าความถี่ของการออสซิลเลทสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับค่า R_4 ดังนั้นเงื่อนไขของการออสซิลเลทและความถี่ของการออสซิลเลทสามารถควบคุมได้อย่างอิสระจากกัน จากรูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขั้ว V_{o1} และขั้ว V_{o2} กำหนดได้คือ

$$\frac{V_{o2}}{V_{o1}} = \frac{1}{sC_3R_5} \quad (11)$$

ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่า เอาต์พุต V_{o1} และ V_{o2} ของวงจร ออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอมีสัญญาณต่างเฟสกัน 90 องศา อย่างแน่นอน

3. การวิเคราะห์ความไม่เป็นอุดมคติ

ในการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านมา จะสมมติว่าวงจร OTRA มีค่าอัตราการขยายทรานส์ซิสแตนท์ที่เป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติค่าอัตราการขยายทรานส์ซิสแตนท์จะมีค่าอยู่ในช่วงที่จำกัด ไม่ได้มีค่าเป็นอนันต์ตามที่สมมติไว้ ดังนั้นผลกระทบของค่าอัตราการขยายทรานส์ซิสแตนท์ที่จำกัดจึงนำมาพิจารณาในหัวข้อนี้ ค่าอัตราการขยายทรานส์ซิสแตนท์ที่ไม่เป็นอุดมคติ (R_{mi}) สามารถกำหนดได้คือ [4]

$$R_{mi}(s) = \frac{1}{s \frac{1}{R_o \omega_o} + \frac{1}{R_o}} \quad (12)$$

ถ้ากำหนดให้ $R_o = \infty$ ค่า $R_{mi}(s)$ จะกลายเป็น

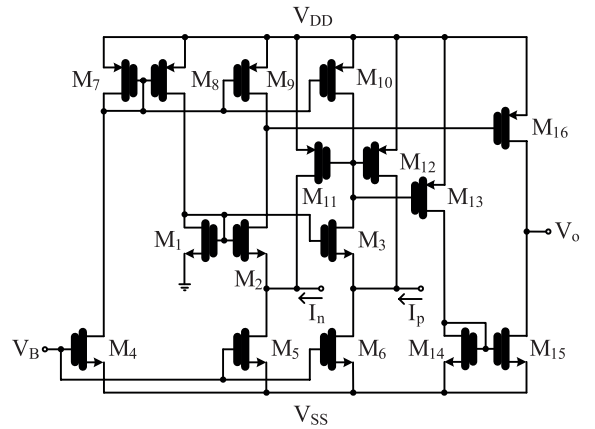
$$R_{mi}(s) \cong \frac{1}{sC_p} \quad (13)$$

เมื่อ R_o เป็นค่าอัตราการขยายทางไฟฟ้ากระแสตรงของ ทรานส์ซิสแตนท์ ส่วน C_p เป็นค่าตัวเก็บประจุแฝงภายใน วงจร OTRA [14] เมื่อใช้สมการที่ (13) ในการคำนวณ สมการเงื่อนไขและความถี่ของการออสซิลเลทสามารถ เขียนใหม่ได้คือ

$$R_5 = \frac{C_1 R_2 R_3}{C_3 R_1 \left(1 + \frac{C_{p3}}{C_3}\right)} \quad (14)$$

และ

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_3 R_4 \left(1 + \frac{C_{p1}}{C_1}\right) \left(1 + \frac{C_{p2}}{C_2}\right)}} \quad (15)$$



รูปที่ 3 วงจร OTRA ที่สร้างจากซีมอส [9]

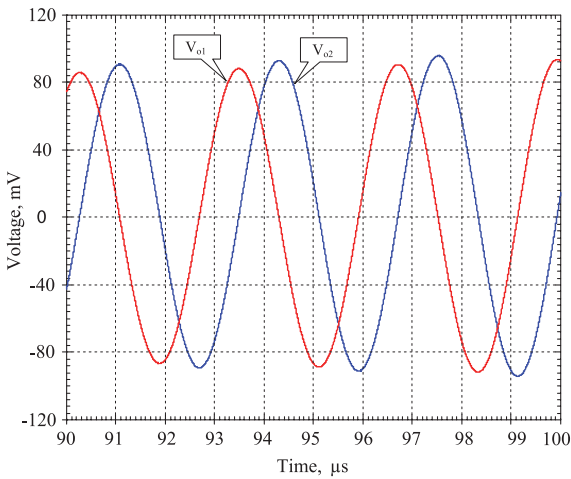
เมื่อ C_{p1} , C_{p2} และ C_{p3} เป็นตัวเก็บประจุแฝงภายในของ OTRA ตัวที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งจะมีผลทำให้เงื่อนไข และความถี่ของการออสซิลเลทเปลี่ยนไปจากค่าอุดมคติ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อวงจรทำงานที่ความถี่สูง แต่เงื่อนไขและความถี่ของการออสซิลเลทยังคงควบคุมได้อย่างอิสระ จากกันเช่นเดิม

4. การจำลองการทำงาน

เพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานของวงจรที่นำเสนอ วงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอในรูปที่ 2 จะถูกจำลองด้วย โปรแกรม PSPICE โดยใช้วงจร OTRA ดังแสดงในรูปที่ 3 [9] โดยมอสทรานซิสเตอร์ทั้งหมดใช้พารามิเตอร์ $0.25 \mu\text{m}$ จาก TSMC และกำหนดค่า W/L และแรงดันไบอัส ดังตารางที่ 1 [9]

ตารางที่ 1 ค่า W/L ของมอสทรานซิสเตอร์และแรงดันไบอัส ที่ใช้ในรูปที่ 3 [9]

ทรานซิสเตอร์	ค่า
M_1 - M_3 , M_5 , M_6	$30 \mu\text{m} / 1.25 \mu\text{m}$
M_4	$10 \mu\text{m} / 1.25 \mu\text{m}$
M_7 - M_{10} , M_{11} , M_{12}	$90 \mu\text{m} / 1.25 \mu\text{m}$
M_{13} , M_{16}	$5.25 \mu\text{m} / 0.28 \mu\text{m}$
M_{15} , M_{16}	$0.25 \mu\text{m} / 1.25 \mu\text{m}$
V_B	-0.9018 V



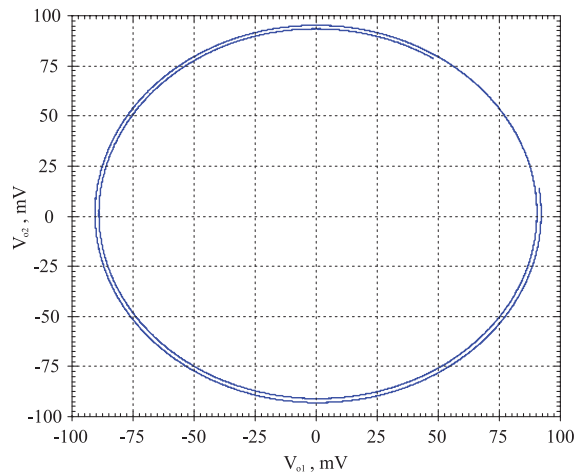
รูปที่ 4 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่โหนด V_{o1} และ V_{o2}

คุณสมบัติของวงจร OTRA เมื่อจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 [9]

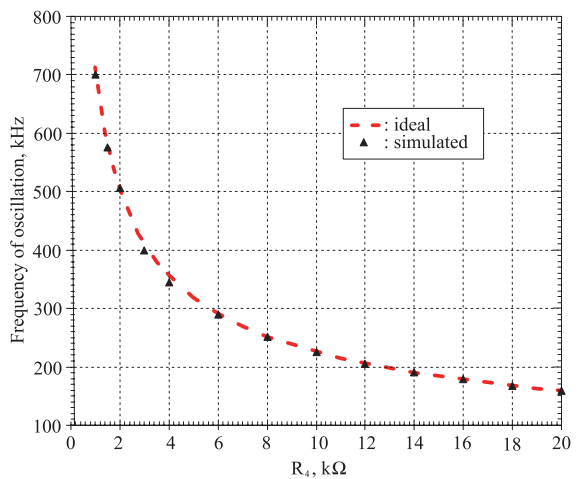
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองวงจรในรูปที่ 3 [9]

พารามิเตอร์	ค่า
Technology	0.25 μm
Supply Voltage	$\pm 1.5 \text{ V}$
Input Current Range	-50 μA to 50 μA
Offset Input Current	0.1 μA
Differential Input Resistance	26.07 k Ω
DC Open Loop Transresistance Gain	144 M Ω
Gain-bandwidth Product	57.6 THz Ω
Power Dissipation	0.82 μW

รูปที่ 4 แสดงสัญญาณเอาต์พุตเมื่อวงจรกำหนดให้ C_1, C_2 และ C_3 มีค่าเท่ากับ 100 pF และ R_1, R_2, R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากับ 5 k Ω และ R_5 มีค่าเท่ากับ 4.9 k Ω ค่า R_5 จะเป็นตัวควบคุมเงื่อนไขของการออสซิลเลตดังแสดงในสมการที่ (9) จากรูปความถี่ที่ได้จากการจำลองมีค่าเท่ากับ 315 kHz ในขณะที่ค่าทางทฤษฎีคือ 318.3 kHz จากรูปที่ 4 สัญญาณ V_{o1} และ V_{o2} มีค่าความผิดเพี้ยนรวม (Total Harmonic Distortion: THD) เท่ากับ 2.79% และ 4.84% รูปที่ 5 แสดงคุณสมบัติทางเฟสของสัญญาณ V_{o1} เทียบกับ

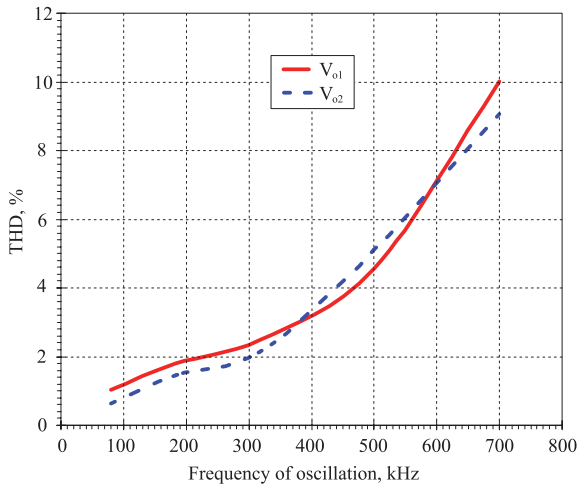


รูปที่ 5 คุณสมบัติทางเฟสของสัญญาณ V_{o1} และ V_{o2}

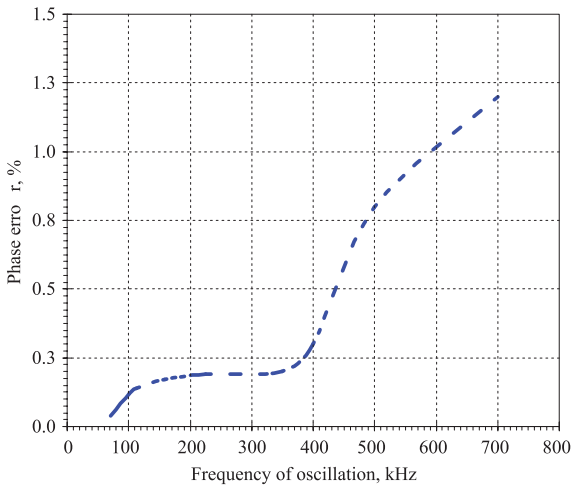


รูปที่ 6 ความถี่ของการออสซิลเลตเมื่อเปลี่ยนค่า R_4 เป็นค่าต่างๆ

V_{o2} ของสัญญาณในรูปที่ 4 รูปที่ 6 แสดงค่าความถี่ของการออสซิลเลตเมื่อ R_4 ถูกเปลี่ยนเป็นค่าต่างๆ ซึ่งผลการจำลองนี้สามารถยืนยันได้ด้วยสมการที่ (10) รูปที่ 7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ THD ของสัญญาณที่ได้ในกรณี R_4 ถูกเปลี่ยนเป็นค่าต่างๆ โดยค่า THD จะถูกพล็อตเทียบกับความถี่ที่วงจรกำเนิดขึ้นมาในขณะที่เปลี่ยนค่า R_4 เป็นค่าต่างๆ และจากกรณีเดียวกัน ที่ความถี่ค่าต่างๆ ในกรณีเปลี่ยนค่า R_4 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดทางเฟส



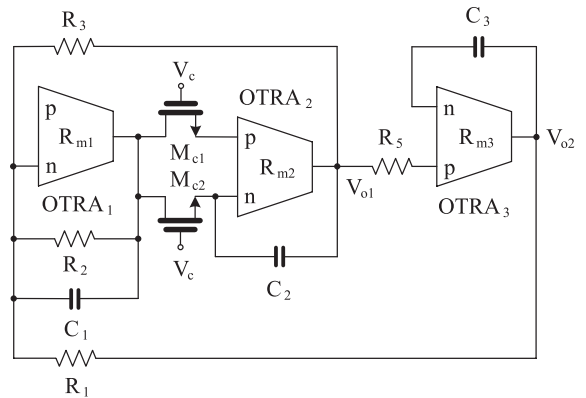
รูปที่ 7 ค่า THD ของสัญญาณ V_{o1} และ V_{o2}



รูปที่ 8 เปรอ์เซ็นต์ความผิดพลาดทางเฟสของ V_{o1} และ V_{o2} ที่ผิดพลาดไปจาก 90 องศา

ของสัญญาณ V_{o1} และ V_{o2} ที่ผิดพลาดไปจาก 90 องศา สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8

โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนค่าความถี่ในวงจรออสซิลเลเตอร์โดยการเปลี่ยนค่าตัวต้านทานอาจจะดูยุ่งยาก ดังนั้นจึงมีวิธีการเปลี่ยนค่าความถี่ด้วยแรงดันหรือกระแสซึ่งทำได้ง่ายกว่า วงจรออสซิลเลเตอร์ในรูปที่ 2 สามารถทำงานเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันได้ด้วยการแทน R_4 ด้วยมอสทรานซิสเตอร์



รูปที่ 9 วงจรควอดร่าเจอร์ออสซิลเลเตอร์อันดับที่สามที่ปรับค่าความถี่ด้วยแรงดัน V_c

สองตัวที่ทำงานในช่วงเชิงเส้นและมีคุณสมบัติสมพงษ์กัน [12] ดังนั้นวงจรควอดร่าเจอร์ออสซิลเลเตอร์ที่ปรับค่าความถี่ด้วยแรงดันหรือเรียกว่าปรับค่าความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 จากรูปค่าความถี่ของการออสซิลเลทสามารถปรับค่าได้ด้วยการไบอัสแรงดัน V_c ของ M_{c1} และ M_{c2} โดยแรงดัน V_c จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขมอสทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงเชิงเส้นคือ $V_{DS} > V_c - V_S - V_{TH}$ โดยที่ V_{DS} คือแรงดันระหว่างขาเดรนและซอร์ส V_S คือแรงดันที่ขาซอร์ส และ V_{TH} คือแรงดันแทรชโฮล

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรถอดร่าเจอร์อันดับที่สามโดยใช้วงจร OTRA เป็นวงจรพื้นฐาน วงจรที่นำเสนอประกอบด้วยวงจร OTRA สามวงจรถูกเก็บประจุสามตัวและตัวต้านทานห้าตัว วงจรสามารถกำเนิดความถี่ได้แม่นยำ ความถี่และเงื่อนไขของวงจรออสซิลเลทสามารถควบคุมได้อิสระจากกันด้วยการกำหนดค่าของอุปกรณ์พาสซีฟ ขั้วเอาต์พุตของวงจรมีอิมพีแดนซ์ต่ำทำให้สามารถนำไปต่อกับโหลดได้โดยตรงโดยไม่ต้องการวงจรมัฟเฟอร์ วงจรที่นำเสนอถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อยืนยันการทำงานและทฤษฎีที่นำเสนอหนึ่งถึงแม้ว่าวงจร OTRA จะมีข้อดีหลายประการ

ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น แต่ข้อเสียหลักของวงจรที่ใช้วงจร OTRA เป็นวงจรพื้นฐานคือต้องการอุปกรณ์พาสซีฟแบบลอยตัว

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.-J. Chen, H. W. Tsao, and C. C. Chen, "Operational transresistance amplifier using CMOS technology," *Electronics Letters*, vol. 28, pp. 2087-2088, 1992.
- [2] J.-J. Chen, H.-W. Tsao, S.-I. Liu, and W. Chiu, "Parasitic-capacitance-insensitive current-mode filters using operational transresistance amplifiers," *IEE Proceeding-Circuits, Devices and Systems*, vol. 142, pp. 186-192, 1995.
- [3] K. N. Salama and A. M. Soliman, "CMOS operational trans-resistance amplifier for analog signal processing," *Microelectronics Journal*, vol. 30, pp.235-245, 1999.
- [4] J.-J. Chen, H.-W. Tsao, and S.-I. Liu, "Voltage-mode MOSFET-C filters using operational transresistance amplifiers (OTRAs) with reduced parasitic capacitance effect," *IEE Proceedings-Circuits, Devices and System*, vol. 148, pp. 242-249, 2001.
- [5] U. Cam, "A novel single-resistance-controlled sinusoidal oscillator employing single operational transresistance amplifier," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 32, pp. 183-186, 2002.
- [6] A. Ravindran, A. Savla, I. Younus, and M. Ismail, "A 0.8V CMOS filter based on a novel low voltage operational transresistance amplifier," in *Proceeding of 45th Midwest Symposium on Circuit and Systems*, Oklhome, USA, 2002, pp. 368-371.
- [7] H. Mostafa and A, M. Soliman, "A modified CMOS realization of the operational transresistance amplifier (OTRA)," *Frequenz*, vol. 60, pp.70-76, 2006.
- [8] S. Kilinc and U. Cam, "Transimpedance type fully integrated biquadratic filters using operational transresistance amplifiers," *Analog Imtegrated Circuits and Signal Processing*, vol. 47, pp.193-198, 2006.
- [9] A. K. Kafrawy and A. M. Soliman, "A modified CMOS differential operational transresistance amplifier (OTRA)," *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 63, pp. 1067-1071, 2009.
- [10] A. Gokcen and U. Cam, "MOS-C single amplifier biquads using the operational transresistance amplifier," *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 63, pp. 660-664, 2009.
- [11] Y. S. Hwang, D. S. Wu, J. J. Chen, C. C. Shih, and W. S. Chou, "Design of current mode MOSFET-C filters using OTRAs," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 37, pp. 397-411, 2009.
- [12] A. Gokcen, S. Kilinc, and U. Cam, "Fully integrated universal biquads using operational transresistance amplifiers with MOS-C realization," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 19, pp. 363-372, 2011.
- [13] R. Pandey, N. Pandey, M. Singh, M. Jain, and S. K. Paul, "Voltage mode biquadratic filter using single OTRA," in *Proceedings of 2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, India2012. pp. 1-4.
- [14] A. Gupta, R. Senani, D. R. Bhaskar, and A. K. Singh, "OTRA-based grounded-FDNR



- and grounded-inductance simulators and their applications,” *Circuits, Systems, and Signal Processing*, vol. 31, pp. 489-499, 2012.
- [15] C.-M. Chang and M. N. S. Swamy, “Analytical synthesis of odd/even-nth-order elliptic Cauer filter structures using OTRAs,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 41, pp. 1248-1271, 2013.
- [16] M. Kumngern, S. Junnapiya, and J. Chanwutitum, “Voltage-mode lowpass, highpass, bandpass biquadratic filter using OTRAs,” in *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, Malaysia, 2013. pp. 230-233.
- [17] M. E. Van Valkenburg, *Analog Filter Design*, Holt Sounders International Edition, 1987.
- [18] P. Prommee and K. Dejhan, “An integrable electronic-controlled quadrature sinusoidal oscillator using CMOS operational transconductance amplifier,” *International Journal of Electronics*, vol. 89, pp. 365-379, 2002.
- [19] J.-W. Horng, C.-L. Hou, C.-M. Chang, W.-Y. Chang, H.-I. Tang, and Y.-I. Wen, “Quadrature oscillator using CCIIs,” *International Journal of Electronics*, vol. 92, pp. 21-31, 2005.
- [20] S. Maheshwari and I. A. Khan, “Current controlled third order quadrature oscillator,” *IEE Proceeding of Circuits Devices and System*, vol. 152, pp. 605-607, 2005.
- [21] J.-W. Horng, “Current-mode third-order quadrature oscillator using CDTAs,” *Active and Passive Electronic Components*, vol. 2009, Article ID 789171, doi:10.1155/2009/789171.
- [22] S. Maheshwari, “Current-mode third-order quadrature oscillator,” *IET Circuits, Devices and Systems*, vol. 4, pp. 188-195, 2010.
- [23] J.-W. Horng, H. Lee and J.-Y. Wu, “Electronically tunable third-order quadrature oscillator using CDTAs,” *Radioengineering*, vol. 19, pp. 326-330, 2010.
- [24] P. Prommee and K. Angkeaw, “Log-domain current-mode third-order sinusoidal oscillator,” in *Proceedings of 2011 IEEE 54th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Korea, 2011, pp. 1-4.
- [25] M. Kumngern and S. Junnapiya, “Current-mode third-order quadrature oscillator using minimum elements,” in *Proceedings of International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI 2011)*, Indonesia, 2011, pp. 1-4.
- [26] R. Pandey, N. Pandey, and S. K. Paul, “MOS-C third order quadrature oscillator using OTRA,” in *Proceedings of 2012 Third International Conference on Computer and Communication Technology (ICCCT)*, India, 2012, pp. 77-80.
- [27] R. Pandey, N. Pandey, G. Komanapalli and R. Anurag, “OTRA based voltage mode third order quadrature oscillator,” *ISRN Electronics*, vol. 2014, Article ID: 126471, pp. 1-5, 2014.
- [28] M. Kumngern and J. Chanwutitum, “Single MCCCCTA-based mixed-mode third-order quadrature oscillator,” in *Proceeding of 2012 Fourth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, Vietnam, 2012, pp. 426-429.
- [29] M. Kumngern and U. Torteanchai, “A current-mode four-phase third-order quadrature oscillator using a MCCCFTA,” in *Proceeding of 2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 2012, pp. 156-159.