

วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์โหมดกระแส

โดยใช้ CCCCTA เพียงตัวเดียว

Current-mode quadrature sinusoidal oscillator

using a single CCCCTA

ผาณิต ละมุล มนตรี คำเงิน ภัทรพงษ์ ผาสุกกิจ กอบชัย เดชหาญ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์โหมดกระแสที่ควบคุมด้วยกระแสโดยใช้วงจร CCCCTA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ วงจรที่นำเสนอประกอบด้วยวงจร CCCCTA 1 วงจร ตัวเก็บประจุแบบต่อกราวด์ 2 ตัว และตัวต้านทานแบบมอสทรานซิสเตอร์ 1 ตัว ทำให้วงจรเหมาะสำหรับนำไปสร้างเป็นวงจรรวมเนื่องจากตัวเก็บประจุทุกตัวต่อลงกราวด์ วงจรที่นำเสนอสามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ และค่าความถี่ได้อย่างอิสระจากกัน วงจรสามารถให้ทั้งเอาต์พุตแรงดันและเอาต์พุตกระแสที่มีเฟสต่างกัน 90° และค่าความไวของวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟมีค่าต่ำ คุณสมบัติทางทฤษฎีของวงจรสามารถยืนยันโดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE

คำสำคัญ : วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์, โหมดกระแส, CCCCTA

Abstract

A current-controlled current-mode quadrature sinusoidal oscillator using current-controlled current conveyor transconductance amplifier (CCCCTA) as an active element is presented. The proposed circuit consists of one CCCCTA, two grounded capacitors and one MOS resistor. This circuit is beneficial to monolithic integrated circuit implementation by the use of only grounded capacitors. The proposed circuit offers the advantage of independent control of the oscillation condition and the oscillation frequency, availability of both voltage and current outputs of quadrature sinusoidal with 90° phase difference and low active and passive sensitivities. PSPICE simulation results which confirm theoretical predictions were provided.

Key words : Quadrature sinusoidal oscillator, Current-mode, CCCCTA

1. บทนำ

วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอดราเจอร์คือวงจรที่ให้สัญญาณทางเอาต์พุตสองสัญญาณมีเฟสต่างกัน 90° ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย

ตัวอย่างเช่น เป็นวงจรผสมสัญญาณแบบควอดราเจอร์ เป็นตัวกำเนิดสัญญาณแบบซิงเกิลไซด์แบนด์ในระบบโทรคมนาคม หรือเป็นตัวกำเนิดสัญญาณแบบเวกเตอร์ในระบบเครื่องมือวัด ดังนั้นจึงมีวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ถูกนำเสนอไว้มากมายในเอกสาร [1–12]

ใน [1–2] ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ไว้หลายแบบโดยใช้วงจรสายพานกระแส (CCII) เป็นอุปกรณ์พื้นฐาน วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ที่ใช้ CDDBA (Current differencing buffered amplifier) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานนำเสนอใน [3–4] วงจรโดยส่วนใหญ่ที่กล่าวข้างต้นใช้อุปกรณ์พาสซีฟ และอุปกรณ์แอคทีฟจำนวนมาก อีกทั้งวงจรยังไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์ วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ในเอกสาร [5–6] ใช้วงจรสายพานกระแสควบคุมด้วยกระแส (CCCII) เป็นอุปกรณ์พื้นฐาน โดยมีข้อเด่นที่อุปกรณ์พวกนี้มีความต้านทานแฝงภายในทำให้สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์ผ่านทางกรไบแอสด้วยกระแสจากภายนอก อย่างไรก็ตามวงจรใน [5] ใช้อุปกรณ์แอคทีฟจำนวนมาก (ใช้ CCCII 4 วงจร) ในขณะที่วงจรใน [6] ไม่สามารถที่จะควบคุมความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้อย่างอิสระจากเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ที่ใช้อุปกรณ์แอคทีฟเพียงตัวเป็นอุปกรณ์พื้นฐานนำเสนอใน [7–9] แต่วงจรเหล่านี้ยังคงใช้อุปกรณ์พาสซีฟเป็นส่วนประกอบจำนวนมาก อีกทั้งต้องใช้วงจรตามกระแสเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นกับโหลด ปัจจุบันวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ที่ใช้ OTA (Operational transconductance amplifier) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานซึ่งสามารถใช้งานได้จริงและสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์แสดงในเอกสาร [10] อย่างไรก็ตามวงจรนี้ทำงานได้เฉพาะโหมดแรงดันเท่านั้น วงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกที่ทำงานในโหมดกระแสเป็นวงจรที่น่าสนใจ เนื่องจากมีข้อดี คือมีช่วงปฏิบัติงานกว้าง วงจรตอบสนองความถี่สูงได้ดี มีอัตราบริโภคกำลังงานต่ำ มีความเป็นเชิงเส้นสูง และวงจรมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับวงจรที่ทำงานในโหมดแรงดัน วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์โหมดกระแสที่นำเสนอในเอกสาร [11–12] ซึ่งใช้วงจรตามกระแสและวงจร CDTA (Current differencing transconductance amplifier) เป็นอุปกรณ์พื้นฐาน อย่างไรก็ตามวงจรเหล่านี้ใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุแบบลอยตัวทำให้ไม่เหมาะที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอ

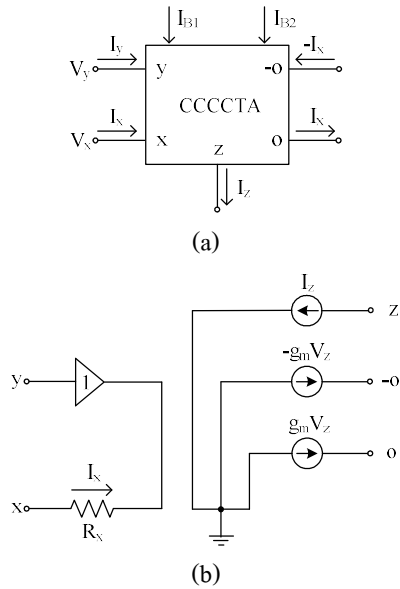
อุปกรณ์แอคทีฟโหมดกระแสเชื่อว่า CCTA (Current conveyor transconductance amplifier) [13] ซึ่งเป็น การรวมกันของวงจรสายพานกระแส (CC) ที่ต่อкасцепกับวงจร OTA โดยวงจรมีอินพุตเป็นกระแสและแรงดัน ส่วนเอาต์พุตของวงจรเป็นกระแส

ในบทความนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ที่ใช้วงจร CCCCTA (Current controlled current conveyor transconductance amplifier) [14] เป็นอุปกรณ์พื้นฐาน ซึ่งวงจร CCCCTA ถูกพัฒนามาจากวงจร CCTA และมีคุณสมบัติทั่วไปเหมือนกัน โดยจะต่างกันที่วงจร CCCCTA มีค่าความต้านทานแฝงภายในที่เกิดขึ้นที่ขั้ว x (R_x) ทำให้วงจร CCCCTA มีข้อเด่น 2 ประการ คือ วงจรสามารถควบคุมค่าความต้านทานแฝง R_x และค่าความนำถ่ายโอน g_m ได้ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์ผ่านทางกรไบแอสกระแสจากภายนอก ดังนั้นวงจรที่นำเสนอสามารถสร้างได้จากวงจร CCCCTA เพียง 1 วงจร ตัวเก็บประจุแบบต่อกราวด์ 2 ตัว และตัวต้านทานที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์ 1 ตัว ทำให้วงจรเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม โดยวงจรที่นำเสนอสามารถให้ทั้งเอาต์พุตแรงดันและเอาต์พุตกระแส ค่าเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณและค่าความถี่สามารถควบคุมได้อย่างอิสระจากกัน นอกจากนี้ค่าความถี่สามารถควบคุมด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์จากการปรับค่ากระแสไบแอส และค่าความไวของความถี่ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของอุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟของวงจรที่นำเสนอมีค่าต่ำ คุณสมบัติของวงจรที่นำเสนอถูกตรวจสอบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 วงจร CCCCTA

วงจร CCCCTA [14] เป็นวงจรที่พัฒนามาจากวงจร CCTA โดยมีสัญลักษณ์และวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของวงจร CCCCTA แสดงได้ดังรูปที่ 1 (a) และ (b) ตามลำดับความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ขั้วต่างๆ ของวงจร CCCCTA สามารถเขียนเป็นสมการเชิงเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 1: วงจร CCCCTA (a) สัญลักษณ์ (b) วงจรสมมูล

$$\begin{pmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_x & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm g_m & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ V_o \end{pmatrix} \quad (1)$$

ในรูปที่ 2 แสดงวงจร CCCCTA ที่สร้างมาจาก มอสมทรานซิสเตอร์ โดยค่าความต้านทาน R_x ที่ขั้ว x ของ วงจรซึ่งควบคุมได้ด้วยกระแสไบแอส I_{B1} สามารถคำนวณ ค่าความต้านทานภายในได้ดังสมการที่ (2)

$$R_x \approx \frac{1}{\sqrt{8\mu C_{ox}(W/L)I_{B1}}} \quad (2)$$

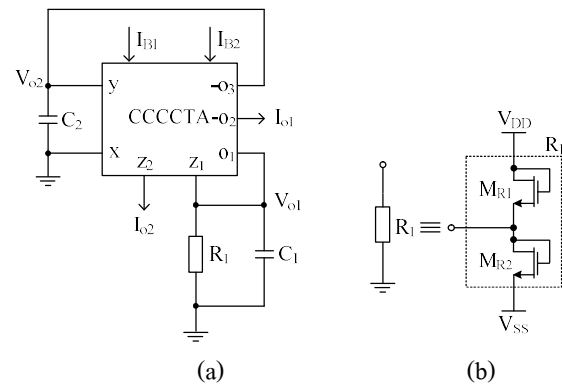
เมื่อ $K = \mu_0 C_{ox}(W/L)$ เป็นพารามิเตอร์ทางกายภาพของ มอสมทรานซิสเตอร์ μ_0 คือค่าความคล่องตัวที่ผิวออกไซด์ ของแชนแนล C_{ox} คือค่าความจุไฟฟ้าที่ขาท่อหน่วยพื้นที่

W และ L คือความกว้างและความยาวของแชนแนลของ มอสมทรานซิสเตอร์ M_2 และ M_4 ตามลำดับ และ I_{B1} คือ กระแสไบแอสจากภายนอก ในขณะที่ค่าความนำถ่ายโอน (g_m) ซึ่งควบคุมด้วยกระแสไบแอส I_{B2} ที่กำหนดให้ M_5 และ M_6 ทำงานในสภาวะอิ่มตัว สามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ (3)

$$g_m = \sqrt{\mu C_{ox}(W/L)I_{B2}} \quad (3)$$

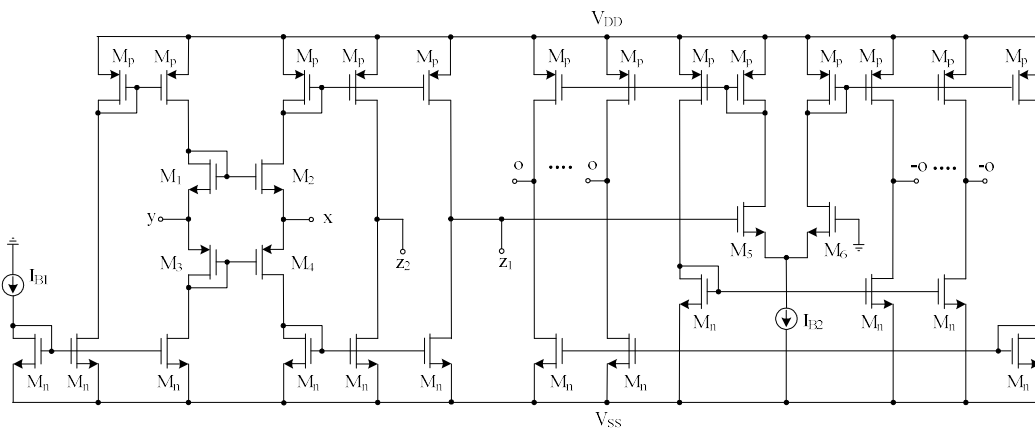
2.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ที่น่าสนใจ

วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์โหมด กระแสที่ให้ทั้งสัญญาณเอาต์พุตแรงดันและเอาต์พุต กระแสแสดงในรูปที่ 3 โดยสมการคุณสมบัติของวงจรใน รูปที่ 3(a) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4)



รูปที่ 3: (a) วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ (b) ตัวต้านทานที่สร้างจาก NMOS

$$s^2 + \frac{sg_m}{C_1 R_1} \left(\frac{1}{g_m} - R_1 \right) + \frac{g_m}{C_1 C_2 R_x} = 0 \quad (4)$$



รูปที่ 2: วงจร CCCCTA ที่สร้างจาก CMOS

จากสมการที่ (4) เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณและค่าความถี่สามารถกำหนดได้ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$R_1 \geq \frac{1}{g_m} \quad (5)$$

$$\omega_o = \sqrt{\frac{g_m}{C_1 C_2 R_x}} \quad (6)$$

จากสมการที่ (5) และ (6) จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณสามารถควบคุมได้ด้วยค่า g_m โดยการไบแอสกระแส I_{B2} และค่าความถี่สามารถควบคุมได้อย่างอิสระด้วยการปรับเปลี่ยนค่า R_x ผ่านทางการไบแอสกระแส I_{B1} โดยไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ ด้วยเหตุนี้จึงเรียกวจรที่นำเสนอว่า “วจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ที่ควบคุมด้วยกระแส” ในรูปที่ 3(b) ได้ทำการออกแบบตัวต้านทาน R_1 ด้วยการใช้มอสทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS 2 ตัว [15] โดยกำหนดให้ M_{R1} และ M_{R2} มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการและทำงานในสภาวะอิ่มตัว ซึ่งค่าความต้านทานของมอสทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 3(b) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_1 = \frac{1}{2K(V_{DD} - V_{TH})} \quad (7)$$

เมื่อ $K = \mu_o C_{ox} (W/L)$ V_{TH} เป็นค่าแรงดันแธรชโฮลด์ V_{DD} คือแหล่งจ่ายแรงดัน ($V_{DD} = -V_{SS}$) จากสมการที่ (7) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานสามารถกำหนดได้จากค่า W/L ผ่านทางค่า K หรือได้จากการเปลี่ยนค่าแหล่งจ่ายแรงดัน V_{DD}

จากวงจรในรูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุต I_{o1} และ I_{o2} และความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต V_{o1} และ V_{o2} สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ

$$\frac{I_{o1}}{I_{o2}} = sC_2 R_x \quad (8)$$

$$\frac{V_{o1}}{V_{o2}} = -\frac{sC_2}{g_m} \quad (9)$$

จากสมการที่ (8) และ (9) สามารถยืนยันได้ว่าวจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่นำเสนอมีกระแสเอาต์พุต I_{o1} และ I_{o2} และ

แรงดันเอาต์พุต V_{o1} และ V_{o2} มีเฟสต่างกัน 90° ในส่วนของค่าความไวของค่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ (ω_o) ต่อพารามิเตอร์ของอุปกรณ์พาสซีฟและแอคทีฟของวงจรในรูปที่ 3 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (10) พบว่าวจรที่นำเสนอมีค่าความไวของอุปกรณ์พาสซีฟและแอคทีฟต่ำ

$$S_{g_m}^{\omega_o} = -S_{R_x}^{\omega_o} = -S_{C_1}^{\omega_o} = -S_{C_2}^{\omega_o} = \frac{1}{2} \quad (10)$$

3. ผลการจำลองการทำงาน

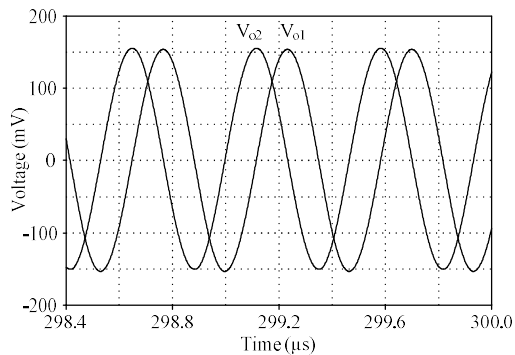
เพื่อยืนยันคุณสมบัติของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่นำเสนอในรูปที่ 3 จะใช้โปรแกรม PSPICE ในการจำลองการทำงาน โดยวงจร CCCCTA ที่จากสร้างจาก CMOS ในรูปที่ 2 ใช้พารามิเตอร์ $0.25\mu m$ ของ TSMC MOSIS [16] ค่าอัตราส่วน W/L ของมอสทรานซิสเตอร์กำหนดตามตารางที่ 1 ใช้แหล่งจ่ายแรงดัน $V_{DD} = -V_{SS} = 1.5V$

ตารางที่ 1 ค่าอัตราส่วน W/L ในวงจร CCCCTA

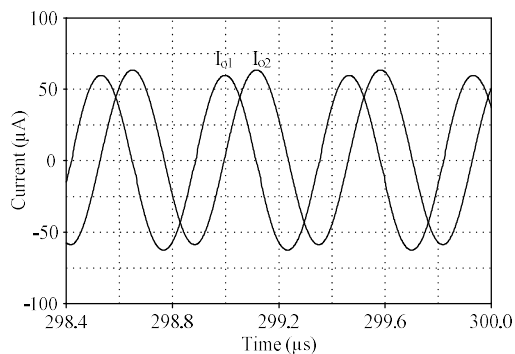
MOS transistor	W/L ($\mu m/\mu m$)
M ₁ –M ₂	2/0.5
M ₃ –M ₄	7/0.5
M ₅ –M ₆	5/0.5
All NMOS (M_n)	5/0.5
All PMOS (M_p)	15/0.5

ตัวอย่างการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์จากวงจรในรูปที่ 3 จะกำหนดให้ $C_1 = C_2 = 30pF$ $I_{B1} = 40\mu A$ $I_{B2} = 100\mu A$ ($g_m = 415.6\mu A/V$) และ ค่าขนาดของมอสทรานซิสเตอร์ M_{R1} และ M_{R2} มีค่า W/L เท่ากับ $2.75\mu m/2\mu m$ ($R_1 \approx 2.5k\Omega$) จากสมการที่ (5) ค่าความต้านทานของ R_1 จะต้องออกแบบให้มีค่ามากกว่าค่า $1/g_m$ อยู่เล็กน้อยเพื่อให้วงจรสามารถให้กำเนิดสัญญาณได้ จากเงื่อนไขในการออกแบบดังกล่าว วงจรสามารถให้กำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ $2.115MHz$ ในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรในรูปของเอาต์พุตแรงดัน และเอาต์พุตกระแส ตามลำดับ ผลการจำลองการทำงานให้ค่าความถี่ในการกำเนิดสัญญาณไซน์เท่ากับ $2.14MHz$ ซึ่งพบว่ามีค่าต่างกับทฤษฎีประมาณ 1.18% ส่วนค่าความเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิก (THD) ของแรงดัน

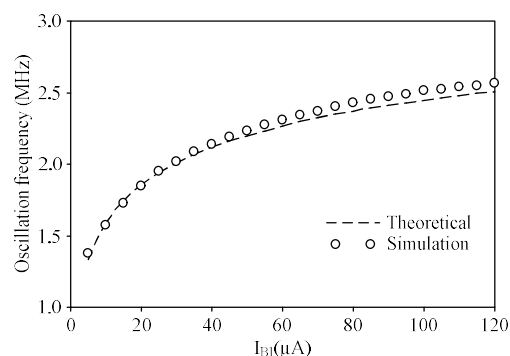
เอาต์พุต และกระแสเอาต์พุต (V_{o1} , V_{o2} , I_{o1} และ I_{o2}) มีค่าเป็น 0.902% 0.545% 1.481% และ 1.293% ตามลำดับ



รูปที่ 4: สัญญาณเอาต์พุตแรงดัน V_{o1} และ V_{o2}



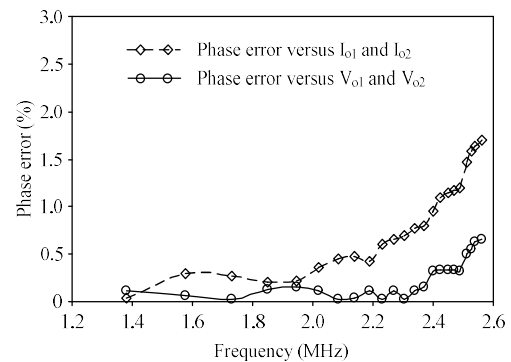
รูปที่ 5: สัญญาณเอาต์พุตกระแส I_{o1} และ I_{o2}



รูปที่ 6: ค่าความถี่ต่างๆ เมื่อปรับค่ากระแสไบแอส I_{B1}

ในรูปที่ 6 แสดงการปรับค่าความถี่ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการปรับค่ากระแสไบแอส I_{B1} จาก 5 μA ถึง 120 μA โดยกำหนดให้ $C_1 = C_2 = 30\text{pF}$ และ $I_{B2} = 100\mu\text{A}$ ทำให้ได้ความถี่อยู่ในช่วง 1.38MHz ถึง 2.55MHz ซึ่งสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีเป็นอย่างดี ในรูปที่ 7 แสดงคุณสมบัติความเป็นควอดราเจอร์ของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 3 ซึ่งแสดงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดทางเฟสที่ได้จากการคำนวณ โดยค่าความผิดพลาดทางเฟส

สูงสุดระหว่างแรงดัน V_{o1} และ V_{o2} และกระแส I_{o1} และ I_{o2} ที่ความถี่ 2.55MHz มีค่าเป็น 0.66% และ 1.7% ตามลำดับ



รูปที่ 7: ค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดทางเฟสระหว่างแรงดัน

V_{o1} และ V_{o2} และ กระแส I_{o1} และ I_{o2}

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์โหมดกระแสที่ควบคุมด้วยกระแสโดยใช้วงจร CCCCTA เป็นอุปกรณ์พื้นฐาน วงจรที่นำเสนอสามารถให้กำเนิดสัญญาณไซน์ทั้งในรูปของเอาต์พุตแรงดัน และเอาต์พุตกระแสที่มีเฟสต่างกัน 90° ค่าความถี่สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้กระแสไบแอสจากภายนอกซึ่งไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ จากการใช้อุปกรณ์พาสซีฟเฉพาะตัวเก็บประจุแบบต่อกราวด์ทำให้วงจรเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE จะเห็นได้ว่าค่าความเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกและค่าความผิดพลาดทางเฟสของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าสูงสุดเป็น 1.481% และ 1.7% ตามลำดับ ทำให้วงจรที่นำเสนอมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารได้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J.-W. Horng, C.-L. Hou, C.-M. Chang, W.-Y. Chung, H.-W. Tang, and Y.-H. Wen, "Quadrature oscillator using CCII's," International Journal of Electronics, Vol. 92, No. 1, 2005, pp. 21-31.
- [2] J.-W. Horng, C.-L. Hou, C.-M. Chang, H.-P. Chou, C.-T. Lin, and Y.-H. Wen, "Quadrature

- oscillators with grounded capacitors and resistors using FDCCIs,” ETRI Journal, Vol. 28, No. 4, 2006, pp. 486-494.
- [3] J.-W. Horng, “Current differencing buffered amplifiers based single resistance controlled quadrature oscillator employing grounded capacitors,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E85-A, No. 6, 2002, pp. 1416-1419.
- [4] W. Tangsirat, D. Prasertsom, T. Piyatat, and W. Surakamponorn, “Single-resistance-controlled quadrature oscillator using current differencing buffered amplifiers,” International Journal of Electronics, Vol. 95, No. 11, 2008, pp. 1119-1126.
- [5] S. Maheshwari and I. A. Khan, “Current controlled third order quadrature oscillator,” IEE Proceeding of Circuits Devices and Systems, Vol. 152, No. 6, 2006, pp. 605-607.
- [6] B. Knobob, M. Kumngern, and K. Dejhan, “Current-Mode Quadrature Oscillator using Translinear Current Conveyors,” International Symposium on Communications and Information Technologies 2008, pp. 196-199.
- [7] M. T. Abuelma’atti, “Grounded capacitor current-mode oscillator using single current follower,” IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 39, No. 12, 1992, pp. 1018-1020.
- [8] M. T. Abuelma’atti and H. A. Al-Zaher, “Current-mode sinusoidal oscillators using single FTFN,” IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing, Vol. 46, No. 1, 1999, pp. 69-74.
- [9] J.-J. Chen, C.-C. Chen, H.-W. Tsao, and S.-I. Liu, “Current-mode oscillators using single current follower,” Electronics Letters, Vol. 27, No. 22, 1991, pp. 2056-2059.
- [10] P. Prommee and K. Dejhan, “An integrable electronic-controlled quadrature sinusoidal oscillator using CMOS operational transconductance amplifier,” International Journal of Electronics, Vol. 89, No.5, 2002, pp. 365-379.
- [11] กอบชัย เดชหาญ, พยาร์ ฐปเหลื่อง, นภัทร สระเอี่ยม, เชื้อ นกอยู่ และ ชัยรินทร์ สุนัขั่น, “วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์โหมดกระแสโดยใช้วงจรตามกระแส,” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 16 ฉบับที่ 2, พ.ศ. 2542, หน้า 62-66
- [12] A. U. Keskin and D. Biolek, “Current-mode quadrature oscillator using current differencing transconductance amplifiers (CDTA),” IEE Proceedings-Circuits Devices and Systems, vol. 153, No. 3, 2006, pp. 214-218.
- [13] R. Prokop and V. Musil, “Modular approach to design of modern circuit blocks for current signal processing and new device CCTA,” Proceedings of the Seventh IASTED International Conference on Signal and Image Processing, 2005, pp. 494-499.
- [14] M. Siripruchyanun and W. Jaikla, “Current controlled current conveyor transconductance amplifier (CCCCTA): a building block for analog signal processing,” Electrical Engineering, Vol. 90, No. 6, 2008, pp. 443-453.
- [15] Z. Wang, “2-MOSFET transistor with extremely low distortion for output reaching supply voltage,” Electronics Letters, Vol. 26, No. 13, 1990, pp. 951-952.
- [16] P. Prommee and M. Somdunyanok, “CMOS-based current-controlled DDCC and its applications to capacitance multiplier and universal filter,” International Journal of Electronics and Communications, (doi:10.1016/j.aeue.2009.12.002).