

วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอเตรเจอร์โหมดกระแส ด้วยความต้านทานแบบลบโดยใช้ CCCFTAs ที่ควบคุมได้ด้วย วิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์

ภาณุพงษ์ โพธิ์ศรี และ มนตรี ศิริปรัชญานันท์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ในโหมดกระแส ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีสองสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา หรือเรียกว่าสัญญาณควอเตรเจอร์ โดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลักในการออกแบบ จำนวน 2 ตัว ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ จำนวน 2 ตัว ลักษณะเด่นของวงจรที่ได้นำเสนอคือ วงจรกำเนิดสัญญาณสามารถควบคุมเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณ และความถี่การกำเนิดสัญญาณได้อย่างอิสระต่อกันด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำให้วงจรที่ได้มีการสังเคราะห์ขึ้นมานั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นได้ง่ายและมีความสะดวกในการใช้งาน หรือการนำไปใช้ร่วมกับระบบควบคุมแบบอัตโนมัติและเป็นวงจรที่เหมาะสมในการนำวงจรไปพัฒนาเป็นวงจรรวมอีกด้วย ผลของการทดสอบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice โดยกำหนดให้วงจรที่สังเคราะห์ทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงที่ $\pm 1.5V$ พบว่า วงจรสามารถกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์สองสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา และมีค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิกส์ (THD) ของสัญญาณเอาต์พุต I_{O1} เท่ากับ 1.1% และ I_{O2} เท่ากับ 1.4% ที่ความถี่สัญญาณ 570kHz มีอัตราการใช้กำลังไฟฟ้าที่ 3.65 mW

คำสำคัญ : วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ โหมดกระแส CCCFTA

An Electronically Tunable Negative Resistance Current-mode Quadrature Oscillator Using CCCFTAs

PanupongPosree and Montree Siripruchyanun

Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Abstract

This article proposes current-mode sinusoidal oscillator whose output signals are in 90° difference phase or called quadrature. It employs 2 current-controlled current follower amplifiers and 2 grounded capacitors. The principal feature is that it can generate a quadrature signal with electronically/independently adjustable consequently, it can be used in microcontroller-based applications and easily developed in integrated circuit architecture. The results obtained, from PSpice with $\pm 1.5V$ supplies, are found that it can offer a precise quadrature signal, where total harmonic distortions of I_{O1} and I_{O2} are 1.1% and 1.4%, respectively, for 570 kHz of frequency. The total power consumption is about 3.65mW.

Keywords: quadrature oscillator, current-mode, CCCFTA.

1. บทนำ

วงจรกำเนิดสัญญาณถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง จึงทำให้เกิดการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้ในระบบสื่อสาร ระบบเครื่องมือวัด ระบบเครื่องมือแพทย์ในห้องทดลอง อิเล็กทรอนิกส์ และระบบประมวลผลสัญญาณเป็นต้น และได้มีการพัฒนางจรกำเนิดสัญญาณให้สามารถกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ได้สองสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา ที่เรียกว่า สัญญาณควอดเรเจอร์สามารถนำไปใช้ในระบบสื่อสาร เช่นในการมอดูเลตสัญญาณ (single side sand)SSB [1]

ในปัจจุบันวงจรถ่ายสัญญาณได้ถูกพัฒนาให้มีแรงดันไฟเลี้ยงของวงจรอิเล็กทรอนิกส์น้อยลงเนื่องมาจากความต้องการที่จะนำมาใช้กับอุปกรณ์แบบพกพา หรืออุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลังงาน ด้วยเหตุผลนี้เองจึงมีผู้พัฒนางจรนำเทคนิคการทำงานในโหมดกระแส (current-mode) มาใช้ในการออกแบบซึ่งมีลักษณะเด่นหลายประการ ได้แก่ มีช่วงพิสัยพลวัตกว้าง (larger dynamic range) มีแบนด์วิธกว้าง รวมถึงบริโภคกำลังงานต่ำ[2-3] ซึ่งจากการนำเสนอที่ผ่านมามีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิดแตกต่างกันที่สามารถทำงานได้ในโหมดกระแส ได้แก่ วงจรขยายความนำถ่ายโอน (operational transconductance amplifier OTA) [4] วงจรสายพานกระแสแบบเปรียบเทียบกับแรงดันผลต่างอินพุต (differencing voltage current conveyor DVCC) [5] วงจรขยายผลต่างกระแสส่งผ่านแรงดันที่ควบคุมด้วยกระแส (current controlled current differencing buffer amplifier CCCDBA) [6] วงจรสายพานกระแสแบบขยายผลต่างเต็มตัว (fully differential second-generation current conveyor FDCCII) [7] วงจรขยายผลต่างกระแสส่งผ่านความนำ (current differencing transconductance amplifiers CDTA) [8] วงจรขยายป้อนกลับกระแสที่สามารถควบคุมด้วยกระแส (current-controlled current feedback amplifier CCCFA) [9] วงจรสายพานกระแสส่งผ่านความนำที่สามารถควบคุมด้วยกระแส (current controlled current conveyor transconductance amplifier CCCCTA) [10]

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ในโหมดกระแส โดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟที่แตกต่างกันไปเช่น DVCC [5] CCCDBA [6] FDCCII [7] CDTA [8] CCCFA [9] และ CCCCTA [10] เป็นต้น พบว่าวงจรที่ได้มีการออกแบบจะมีการใช้อุปกรณ์พาสซีฟ และแอคทีฟจำนวนมาก [5-7,11] มีความซับซ้อนในการออกแบบวงจร [12-13] วงจรไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ [5,7] และวงจรยังใช้ตัวเก็บประจุแบบลอยซึ่งไม่เหมาะสมที่จะสร้างเป็นวงจรรวม [8-9] เป็นต้น

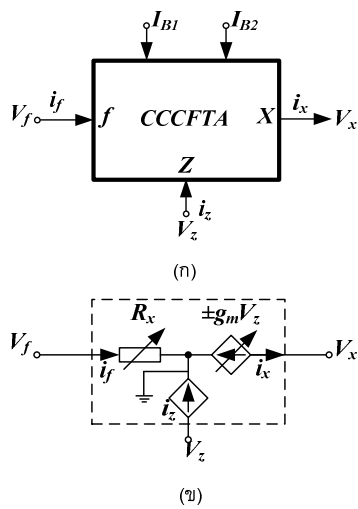
เมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้มีการนำเสนอตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (current follower transconductance amplifier, CFTA) [14] ซึ่งถือได้ว่าตัวอุปกรณ์แอคทีฟ CFTA เป็นอุปกรณ์ที่มีประโยชน์หลายอย่างในการออกแบบวงจรที่มีการประมวลผลสัญญาณที่เป็นแอนะล็อก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วงจรกรองความถี่ วงจรกำเนิดสัญญาณ [14-16] ซึ่งสามารถใช้อุปกรณ์นี้เป็นทางเลือกที่ดีทางเลือกหนึ่ง ที่ใช้ในการออกแบบวงจรที่ทำงานในโหมดกระแส หรือในโหมดแรงดัน หรือในโหมดผสม อย่างไรก็ตามวงจรที่ได้มีผู้เสนอไปแล้วนั้นยังคงใช้ตัวต้านทาน ต่อที่ขา f ให้สามารถปรับเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณ [15] ซึ่งไม่สามารถควบคุมความต้านทานแฝงที่ขั้วอินพุตได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ ต่อมาได้นำเสนออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (current control current follower transconductance amplifier CCCFTA) [17] ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับ CFTA ลักษณะโครงสร้าง CCCFTA จะมีตัวต้านทานแฝงอยู่ทางด้านอินพุตที่ขา f และยังสามารถควบคุมความต้านทานแฝงได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับกระแสไบแอส

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อนำเสนอวงจรถ่ายสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ที่ใช้ตัวอุปกรณ์แอคทีฟ CCCFTA จำนวน 2 ตัว ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ จำนวน 2 ตัว โดยวงจรสามารถควบคุมความถี่และเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นอิสระต่อกัน

2. วงจรและหลักการทำงาน

2.1 หลักการทำงานของCCCFTA

ในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอโดยใช้อุปกรณ์ CCCFTA เป็นอุปกรณ์หลักที่มีโครงสร้างไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์ อินพุตคือขา f และมีเอาต์พุตคือขา z และ x ที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงทุกขา โดยสัญลักษณ์ และวงจรสมมูลของ CCCFTA แสดงได้ดังภาพที่ 1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 1 CCCFTA (ก) สัญลักษณ์ และ (ข) วงจรสมมูล

ลักษณะสมบัติของ CCCFTA สามารถแสดงด้วยสมการเมตริกซ์ได้ในสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} V_f \\ i_z \\ i_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm g_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ v_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

ซึ่งความต้านทานแฝงที่ขา f คือ R_f สามารถแสดงได้ในสมการที่ (2)

$$R_f = \frac{V_T}{2I_{B1}} \quad (2)$$

ส่วนค่าความนำถ่ายโอน คือ

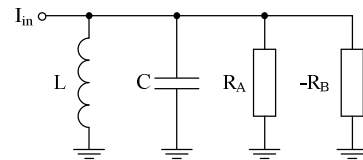
$$g_m = \frac{I_{B2}}{2V_T} \quad (3)$$

จากสมการที่ (2) และ (3) พบว่าความต้านทานแฝงสามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบแอส I_{B1} และ g_m คือค่าความนำถ่ายโอน ควบคุมได้ด้วยกระแสไบแอส I_{B2} และสมการ V_T

(thermal voltage) คือศักดาความร้อนมีค่าประมาณ 26 mV ที่อุณหภูมิห้อง

2.2 หลักการสังเคราะห์และออกแบบวงจร

หลักการสังเคราะห์วงจรจะมีพื้นฐานมาจากวงจร วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่สร้างจากตัวต้านทานแบบลบ (Oscillator Based-on Negative Resistor) [18] ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 หลักการสังเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณ

โดยมีสมการคุณสมบัติ (Characteristic equation) ของวงจรดังสมการที่ (4)

$$s^2 LC + sL \left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) + 1 = 0 \quad (4)$$

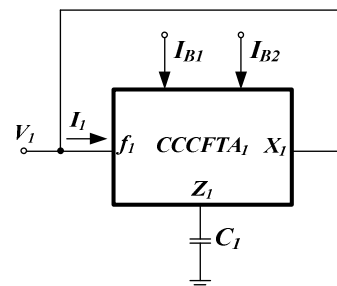
สมการความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ

$$\omega_{osc} = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (5)$$

และสมการของเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ

$$R_A = R_B \quad (6)$$

ในภาพที่ 3 จะเป็นวงจรจำลองค่าความเหนี่ยวนำโดยใช้ CCCFTA โดยประกอบไปด้วย CCCFTA ตัวที่ 1 ต่อร่วมกับ C_1 เพื่อทำหน้าที่ตัวเหนี่ยวนำเสมือน และส่วนในภาพที่ 4 จะเป็นวงจรจำลองตัวต้านทานชนิดบวกและลบโดยใช้ CCCFTA จะทำหน้าที่ตัวต้านทานเสมือนชนิดบวกและลบต่อขนานกัน

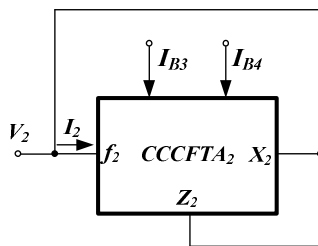


ภาพที่ 3 วงจรจำลองค่าความเหนี่ยวนำโดยใช้ CCCFTA

จากวงจรในภาพที่ 3 พบว่ามีตัวต้านทานชนิดบวกที่สามารถควบคุมค่าความต้านทานจาก I_{B1} กับตัวเหนี่ยวนำเสมือนที่สามารถควบคุมค่าความเหนี่ยวนำเสมือน จาก I_{B1} และ I_{B2} ดังสมการที่ (7) และสมการที่ (8)

$$R_A = \frac{V_T}{2I_{B1}} \quad (7)$$

$$L_{eq} = \frac{C_1 s V_T^2}{I_{B1} I_{B2}} \quad (8)$$



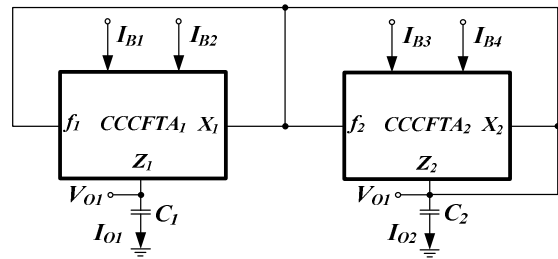
ภาพที่ 4 วงจรจำลองตัวต้านทานชนิดบวกและลบโดยใช้ CCCFTA

จากวงจรในภาพที่ 4 พบว่าตัวต้านทานเสมือนชนิดบวกและลบที่ต่อลงกราวด์ที่สามารถควบคุมค่าความต้านทานชนิดบวก R_A จาก I_{B3} และตัวต้านทานชนิดลบ R_B ที่สามารถควบคุมค่าความต้านทานจาก I_{B4} ดังแสดงในสมการที่ (9) และสมการที่ (10)

$$R_A = \frac{4I_{B3}}{V_T} \quad (9)$$

$$R_B = -\frac{2V_T}{I_{B4}} \quad (10)$$

เมื่อนำวงจรในภาพที่ 3 และวงจรในภาพที่ 4 มาต่อкасцепกันโดยหลักการสังเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ในภาพที่ 2 จะได้วงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ที่นำเสนอในภาพที่ 5 วงจรประกอบไปด้วย CCCFTA จำนวน 2 ตัวและตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์จำนวน 2 ตัว โดย I_{B1} และ I_{B2} เป็นกระแสไบอัสให้กับ CCCFTA ตัวที่ 1 และ I_{B3} และ I_{B4} เป็นกระแสไบอัสให้กับ CCCFTA ตัวที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์แบบควอดราเจอร์

โหมตกระแสที่นำเสนอ

เมื่อพิจารณาวงจรในภาพที่ 5 และใช้คุณสมบัติของ CCCFTA สามารถเขียนสมการลักษณะสมบัติของวงจรกำเนิดสัญญาณ (Characteristic equation) สามารถแสดงได้ในสมการที่ (11)

$$s^2 + \left(\frac{2}{R_{f2}} + \frac{1}{R_{f1}} - g_{m2} \right) \frac{s}{C_2} + \frac{g_{m1}}{R_{f1} C_1 C_2} = 0 \quad (11)$$

เมื่อพิจารณาในส่วนจำนวนจริง (Real Part) จะได้สมการความถี่ในการกำเนิดสัญญาณแสดงได้ในสมการที่ (12)

$$\omega_{osc} = \sqrt{\frac{g_{m1}}{R_{f1} C_1 C_2}} \quad (12)$$

จากสมการที่ (5) เมื่อแทนค่า $R_{f1} = V_T / 2I_{B1}$ และ $g_{m1} = I_{B2} / 2V_T$ จะสามารถจัดรูปสมการได้ใหม่แสดงในสมการที่ (13)

$$\omega_{osc} = \frac{1}{V_T} \sqrt{\frac{I_{B1} I_{B2}}{C_1 C_2}} \quad (13)$$

สำหรับเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณพิจารณาได้จากส่วนจำนวนจริงจินตภาพ (Imaginary Part) สามารถแสดงได้ในสมการที่ (14)

$$\frac{2}{R_{f2}} + \frac{1}{R_{f1}} = g_{m2} \quad (14)$$

จากสมการที่ (14) เมื่อแทนค่า $R_{f1} = V_T / 2I_{B1}$ $R_{f2} = V_T / 2I_{B3}$ และ $g_{m2} = I_{B4} / 2V_T$ จะได้เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณสามารถแสดงได้ในสมการที่ (15)

$$8I_{B3} + 4I_{B1} = I_{B4} \quad (15)$$

จากสมการที่ (13) เมื่อ $\omega_{osc} = 2\pi f_{osc}$ ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณสามารถแสดงได้ในสมการที่ (16)

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi V_T} \sqrt{\frac{I_{B1} I_{B2}}{C_1 C_2}} \quad (16)$$

จากสมการที่ (15) และสมการที่ (16) แสดงให้พบว่า วงจรที่นำเสนอสามารถควบคุมความถี่และเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณโดยสามารถควบคุมความถี่ด้วย I_{B2} โดยการกำหนด I_{B1} ในส่วนของความถี่ ให้มีค่าเท่ากับ I_{B1} ในส่วนของสมการเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณ และเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณปรับด้วย I_{B1}, I_{B3}, I_{B4} ให้สอดคล้องกันสมการที่ (15) เมื่อพิจารณา วงจรในภาพที่ 4 จะได้ฟังก์ชันโอนย้ายของ I_{O1} และ I_{O2} จะได้

$$\frac{I_{O2}(s)}{I_{O1}(s)} = \frac{1}{sC_1 R_{f1}} \quad (17)$$

เมื่อพิจารณาในช่วงอยู่ตัว (Steady state) ของสัญญาณไซน์ จากสมการที่ (17) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{I_{O2}(j\omega)}{I_{O1}(j\omega)} = \frac{1}{\omega C_1 R_{f1}} e^{-j90^\circ} \quad (18)$$

จากสมการที่ (18) พบว่า I_{O1} และ I_{O2} จะมีเฟสต่างกัน

$$\phi = -90^\circ \quad (19)$$

จากสมการที่ (19) ยืนยันได้ว่าวงจรกำเนิดสัญญาณที่นำเสนอสามารถให้กำเนิดสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ได้

2.3 การวิเคราะห์วงจรในกรณีไม่เป็นอุดมคติ

ในกรณีที่ CCCFTA ที่ใช้ในวงจรเกิดความไม่เป็นอุดมคติสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ (20)

$$\begin{bmatrix} V_f \\ i_z \\ i_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm\beta g_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ v_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (20)$$

เมื่อ β คือค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดัน (Voltage Tracking Error) จากขั้ว z ไปยังขั้ว x และ α คือค่าความผิดพลาดในการส่งผ่านกระแส (Current Tracking Error) จากขั้ว f ไปยังขั้ว z กล่าวคือ α, β เป็นค่าส่งผ่านกระแสและแรงดันจากอินพุตไปยังเอาต์พุตที่สามารถเบี่ยงเบนไปจาก 1 ซึ่งสามารถเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของทรานซิสเตอร์ภายในตัวของ CCCFTA นอกจากนี้หากพิจารณาที่ความถี่สูงจะพบว่าค่าความต้านทาน และค่าความจุแฝงที่ตัวของ CCCFTA จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ได้สังเคราะห์ไว้ ในการวิเคราะห์กรณีไม่เป็นอุดมคติจึงมีการกำหนดตัวแปรเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ได้ โดยค่าความต้านทานแฝงในวงจรเป็นค่าตรงข้ามความต้านทาน conductance (G) เป็นแอดมิตแตนซ์ของอิลิเมนต์ในวงจรสามารถเขียนแทนจะได้ $G_x = 1/R_x$ และ $G_z = 1/R_z$ และ $C_A = C_{x1} + C_{x2} + C_{z2} + C_2$ เป็นค่าความจุแฝงในวงจรโดยกำหนดเป็นแอดมิตแตนซ์นั่นเอง

$$\frac{(1+\alpha_2)(C_A+G_{z2})}{R_{f2}} + \frac{(C_A+G_{z1})}{R_{f1}} = \beta_2 g_{m2} (C_A + G_{z2}) \quad (21)$$

และ

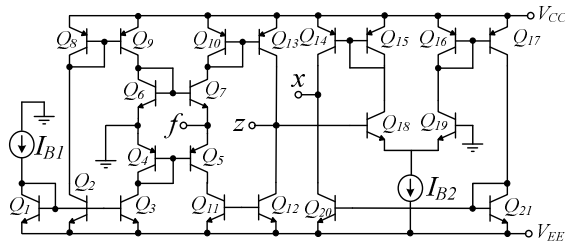
$$\omega_{osc} = \sqrt{\frac{\alpha_1 \beta_1 g_{m1}}{R_{f1} C_A (C_1 + C_{z1}) + G_{z1}}} \quad (22)$$

จากสมการที่ (21) และสมการที่ (22) พบว่า วงจรยังคงให้กำเนิดสัญญาณได้แต่เงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณจะมีการเบี่ยงเบนไปตามพารามิเตอร์ภายในของตัว CCCFTA ในทางปฏิบัตินั้น พารามิเตอร์ α, β ที่ค่าความจุและความต้านทานแฝงในตัว CCCFTA จะมีผลต่อการทำงานของวงจรเมื่อความถี่ และอุณหภูมิสูงขึ้น

3. ผลการทดสอบการทำงาน

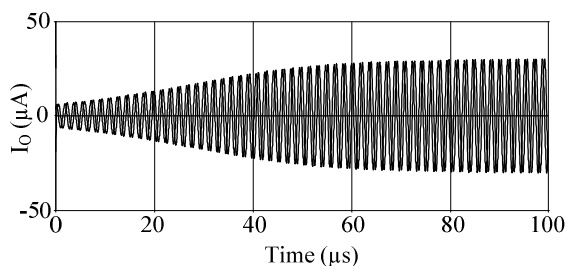
3.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณ

การจำลองนี้ได้ใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ PR200N และ NR200N ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 ของ AT&T [19] ในโปรแกรม PSpice โดยใช้โครงสร้างภายในของ CCCFTA ในภาพที่ 6 มีแรงดันไฟเลี้ยงอยู่ที่ $\pm 1.5V$

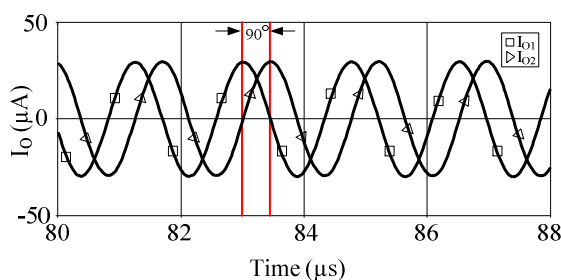


ภาพที่ 6 โครงสร้างภายในของ CCCFTA

ในการจำลองการทำงานของวงจร ลำดับแรกให้ปรับกระแสไบแอสของวงจร $I_{B1} = 50\mu A$, $I_{B2} = 200\mu A$, $I_{B3} = 10\mu A$, $I_{B3} = 280\mu A$ และค่าของตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = 1nF$ ผลในการจำลองการทำงานของวงจรแสดงในภาพที่ 7 เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่อยู่ในสภาวะเริ่มต้น ในส่วนของภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่ากระแสเอาต์พุต I_{O1} และ I_{O2} ที่อยู่ในสภาวะอยู่ตัวสัญญาณทั้งสองจะมีเฟสต่างกัน 90°

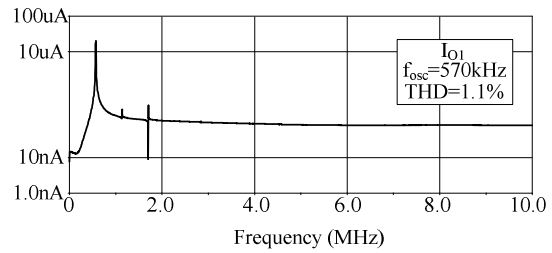


ภาพที่ 7 สัญญาณเอาต์พุตในสภาวะเริ่มต้น

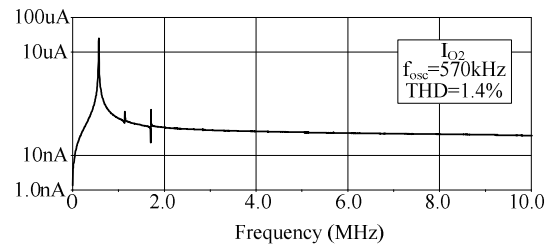


ภาพที่ 8 สัญญาณเอาต์พุตในสภาวะอยู่ตัว

ส่วนในภาพที่ 9 และภาพที่ 10 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่มีความถี่ 570kHz ซึ่งมีค่าผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกส์ (THD) ที่ I_{O1} เท่ากับ 1.1% และ I_{O2} เท่ากับ 1.4%

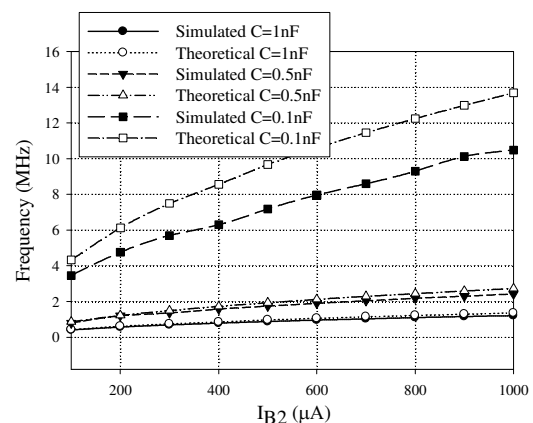


ภาพที่ 9 สเปกตรัมของสัญญาณ I_{O1}



ภาพที่ 10 สเปกตรัมของสัญญาณ I_{O2}

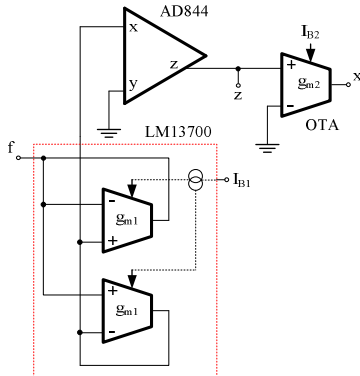
ส่วนของค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต เมื่อกำหนดค่ากระแสไบแอสของวงจร I_{B2} และค่าตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = C$ ทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุไปจำนวนสามค่าตามลำดับดังนี้ 1nF, 0.5nF และ 0.1nF ซึ่งการจำลองการทำงานนี้พบว่า การปรับค่าความถี่โดยการปรับค่ากระแสไบแอสและตัวเก็บประจุ ส่งผลทำให้การกำเนิดสัญญาณได้ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามสมการที่ได้วิเคราะห์แสดงในภาพที่ 11



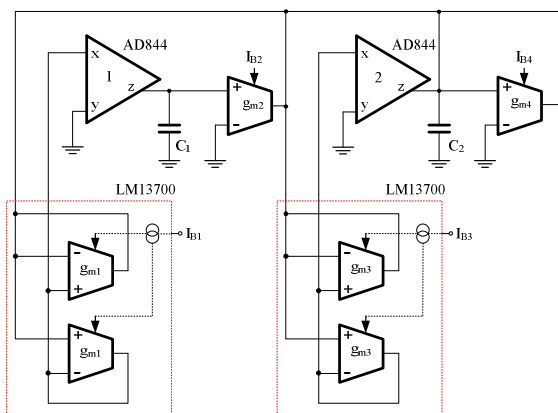
ภาพที่ 11 ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อปรับกระแสไบแอส และตัวเก็บประจุ

3.2 ผลทดลองด้วยการต่อวงจรจริง

เพื่อแสดงถึงการทำงานของวงจรถ้าเนตสัญญาณจากภาพที่ 12 เป็นการออกแบบการต่อวงจรที่ประกอบเป็นตัวอุปกรณ์ CCCFTA หนึ่งตัว ประกอบไปด้วยไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD844 จำนวน 1 ตัว ต่อกับ LM13700 จำนวน 1 ตัว ออกแบบเสมือนตัวต้านทานแฝงที่ χ ของตัวอุปกรณ์ CCCFTA ที่มีค่าความต้านทานปรับค่าได้ด้วยกระแสไบแอสและ OTA จำนวน 1 ตัว



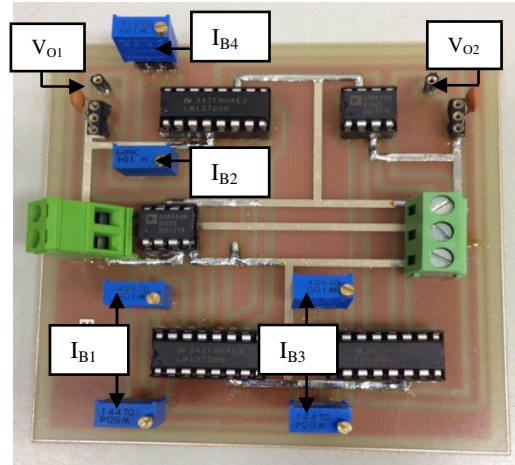
ภาพที่ 12 การต่ออุปกรณ์ CCCFTA โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถหาได้ในเชิงพาณิชย์



ภาพที่ 13 วงจรที่ใช้ในการต่อจริง

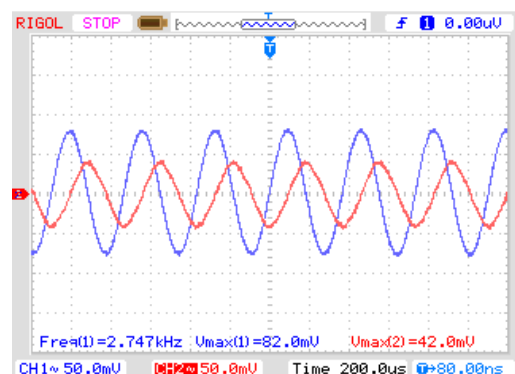
เพื่อเป็นการแสดงถึงความสามารถในการทำงานของวงจรถ้าเนตสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ที่ได้สังเคราะห์และออกแบบไว้ จึงได้ทำการทดลองต่อวงจรจริง จากภาพที่ 13 โดยประกอบไปด้วยโครงสร้างตัวอุปกรณ์ CCCFTA จำนวน 2 ตัว ต่อกับตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์จำนวน 2 ตัว ในแผนวงจรพิมพ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองแสดงในภาพที่ 14 จะพบว่าในการต่อใช้งานจริงนั้นจะไม่สามารถวัดสัญญาณเอาต์พุตในโหมดของกระแสได้ ดังนั้นจะต้องทำการวิเคราะห์

วงจรในโหมดของแรงดันเพื่อให้สามารถทำการวัดเอาต์พุตของวงจรได้ ซึ่งพิจารณา วงจรในภาพที่ 14 ที่ตำแหน่ง V_{O1} และ V_{O2}



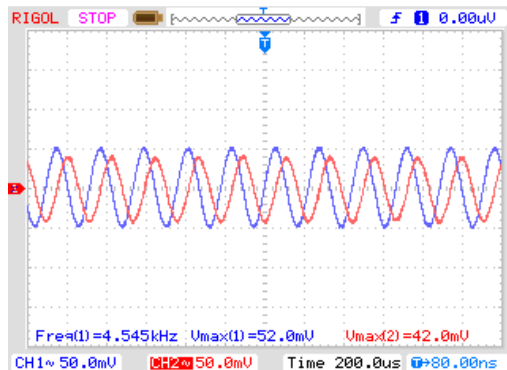
ภาพที่ 14 ภาพวงจรที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง

จากวงจรที่ได้สร้างขึ้นเพื่อยืนยันว่าวงจรถ้าเนตสัญญาณที่นำเสนอสามารถให้กำเนิดสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ได้โดยได้กำหนดไฟเลี้ยงให้วงจร เท่ากับ $\pm 12V$ และแรงดันที่จะทำการบ่อนกระแสไบแอส เท่ากับ $5V$ จากนั้นทำการปรับกระแสไบแอสที่ $I_{B1} = 50\mu A$ $I_{B2} = 50\mu A$ $I_{B3} = 10\mu A$ และ $I_{B4} = 315\mu A$ มีค่าตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2 = 100nF$ จะได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีลักษณะเป็นสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ที่มีความถี่สภาวะคงตัว เท่ากับ $2.747kHz$ แสดงให้เห็นในภาพที่ 15



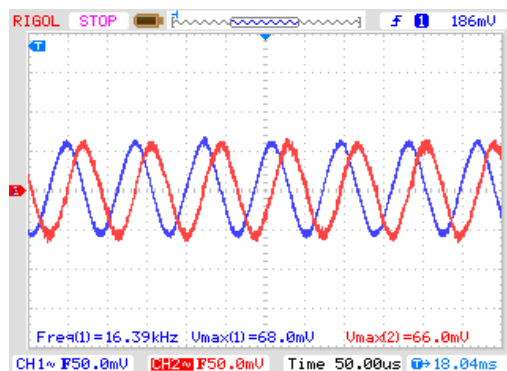
ภาพที่ 15 ผลของสัญญาณเอาต์พุตจากออสซิลโลสโคปที่ความถี่ $2.747kHz$

ลำดับต่อมาเมื่อทำการปรับกระแสไบแอสที่ $I_{B2} = 100\mu A$ จะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีความถี่ $4.545kHz$ แสดงในภาพที่ 16



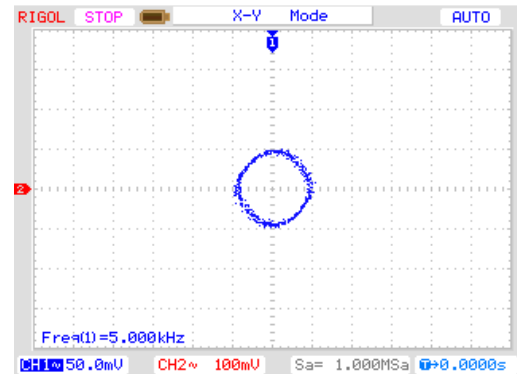
ภาพที่ 16 ผลของสัญญาณเอาต์พุตจากออสซิลโลสโคปที่ความถี่ $4.545kHz$

ต่อมาทำการลดค่าตัวเก็บประจุ มีค่าเท่ากับ $C_1 = C_2 = 10nF$ และกระแสไบแอสของวงจรกำหนดให้ $I_{B1} = 50\mu A$, $I_{B2} = 50\mu A$, $I_{B3} = 10\mu A$, $I_{B4} = 315\mu A$ จะได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ที่ความถี่เท่ากับ $16.39kHz$ แสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ผลของสัญญาณเอาต์พุตจากออสซิลโลสโคปที่ความถี่ $16.39kHz$

และในภาพที่ 18 แสดงผลของมอดูเลชันสัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบ Lissajous จะพบว่าผลของสัญญาณที่ได้นั้นมีลักษณะกลม ที่ความถี่ $5kHz$ ซึ่งแปลว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรที่ทำการต่อจริงมีมอดูเลชันต่างเฟสกัน 90 องศา



ภาพที่ 18 ผลต่างเฟสของสัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบ Lissajous

4. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวคิดการสังเคราะห์และออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ที่ใช้ตัวอุปกรณ์แอคทีฟ CCCFTA จำนวน 2 ตัว ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ จำนวน 2 ตัว โดยวงจรสามารถควบคุมความถี่และเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณได้อย่างเป็นอิสระจากกันด้วยกระแสไบแอสซึ่งสามารถนำวงจรไปประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมอัตโนมัติ หรือใช้ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์

จากการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมมีลักษณะเด่นคือ สามารถปรับค่าเงื่อนไขและความถี่ในการกำเนิดสัญญาณได้อย่างอิสระจากกันด้วยกระแสไบแอส เมื่อจำลองการทำงานตามหลักการวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณ รวมถึงวงจรสามารถผลิตสัญญาณรูปคลื่นไซน์ได้สองสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งมีค่าผิดเพี้ยนทางฮาร์โมนิกส์ (THD) ที่ I_{O1} เท่ากับ 1.1% และ I_{O2} เท่ากับ 1.4% และยังมีอัตราการดึงกำลังไฟฟ้าโดยรวม 3.65 mW ที่แรงดันไฟเลี้ยง $\pm 1.5V$ นอกจากนี้ในการทดลองด้วยการต่อจริงของวงจรที่ได้นำเสนอสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าการออกแบบโดยนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถหาได้ในเชิงพาณิชย์ทำการออกแบบวงจร พบว่าสามารถกำเนิดสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ได้เป็นอย่างดี รวมถึงสามารถทำการปรับความถี่และเงื่อนไขในการกำเนิดสัญญาณได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นอิสระจากกันด้วยกระแสไบแอสซึ่งวงจรที่ได้นำเสนอนี้จึงเหมาะสมในการนำไปพัฒนาใช้งานกับแหล่งจ่ายกำลังที่เป็นแบตเตอรี่ได้เป็นอย่างดี เช่น ระบบ

เครื่องมือวัด อุปกรณ์แบบพกพา หรือ อุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สาย เป็นต้นอย่างไรก็ตามในการนำไปใช้นั้นที่จุดเอาต์พุตเป็นกระแสไหลผ่าน C ซึ่งในทางปฏิบัติทำได้ยาก และมีแนวทางแก้ไขคือออกแบบที่จุดเอาต์พุตของวงจรให้เป็น high impedance เพื่อให้เหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] I. A. Khan, and S. Khawaja, "An integrable gm-C quadrature oscillator", International Journal of Electronics, vol. 87, pp. 1353-1357, 2000.
- [2] C. Toumazou, F. J. Lidgey, and D. G. Haigh, "Analogue IC design: the current-mode Approach", London: Peter Peregrinus, 1990.
- [3] D. R. Bhaskar, V. K. Sharma, M. Monis and S. M. I. Rizvi, "New current-mode universal biquad filter", Microelectronics Journal, vol. 30, pp. 837-839, 1999.
- [4] D. Birolek, M. Siripruchyanun and W. Jaikla, "CCII and OTA based Current-mode Universal Biquadratic Filter", The sixth PSU Engineering Conference, pp.238-241, 2008.
- [5] J. W. Horng, "Current-mode quadrature oscillator with grounded capacitors and resistors using two DVCCs", IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E86-A, pp. 2152-2154, 2003.
- [6] W. Jaikla and M. Siripruchyanun, "A Versatile quadrature oscillator and universal biquad filter using CCCDBAs", Proceedings of ECTI con 2006, Ubon-ratchathani, Thailand, pp.501-504, May 2006.
- [7] 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, pp. 486-494, 2006.
- [8] W. Jaikla, M. Siripruchyanun, J. Bajer and D. Birolek, "A simple current-mode quadrature oscillator using single CDTA", Radioengineering, vol.17, pp. 33-40, 2008.
- [9] J. Kumbun, P. Silapan, M. Siripruchyanun and P. Prommee, "A current-mode quadrature oscillator based on CC-CFAs", Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2009, 6th International Conference, vol. 1, pp.542-545, 2009.
- [10] M. Siripruchyanun, and W. Jaikla, "Current controlled current conveyor transconductance amplifier (CCCCTA): a building block for analog signal processing", The Proceeding of ISCIT 2007, Sydney, Australia, pp. 1072-1075, 2007.
- [11] A. Jantakun, N. Pisutthipong and M. Siripruchyanun, "A synthesis of temperature insensitive/electronically controllable floating simulators based on DV-CCTAs", Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2009. 6th International Conference, vol.1, pp. 560-563, 2009.
- [12] W. Jaikla, M. Siripruchyanun and A. Lahiri, "Resistorless dual-mode quadrature sinusoidal oscillator using a single active building block", Microelectronics Journal, vol.42, pp.135-140, 2011.
- [13] R. Prokop, and V. Musil, "New modern circuit block CCTA and some its applications", The Fourteenth International Scientific and Applied Science Conference - Electronics

- ET'2005, Book 5, Sofia: TU Sofia, pp. 93-98, 2005.
- [14] N. Herencsar, J. Koton, K. Vrba, and J. Misurec, "A Novel Current-Mode SIMO Type Universal Filter Using CFTAs", Contemporary Engineering Sciences, vol. 2, no. 2, 59 – 66, 2009.
- [15] K. Pitaksuttayaprot, K. Phanruttanachai and W. Jaikla, "Realization of Electronic Tunable Current-mode Quadrature Oscillator Based on Third Order Technique " EENET2012. 4th, pp. 505-508, 3-2 Apr. 2012.
- [16] S. Lawanwisut, M. Siripruchyanun, "A Current-mode Multifunction Biquadratic Filter Using CFTAs" Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, vol. 22, 2015.
- [17] C. Wichito, P. Leekrunton, S. Srisakultiew and S. Lawanwisut, "A Current-mode Tow Thomas Universal Filter Employing Single CCCFTA" Journal of Industrial technology (I-TECH), vol. 12, 2015.
- [18] P. Kumar and R. Senani, "New grounded simulated inductance circuit using a single PFTFN", Analog Integr Circ Sig Process, vol. 62, 105–112, 2010.
- [19] D. R. Frey, "Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering," in IEE proceedings of Circuit Devices Systems, vol. 40, pp. 406-416, 1