

การสังเคราะห์วงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งโหมดกระแสด้วย DO-CCTA
The Synthesis of a Current-Mode First-Order All-Pass Filter Using DO-CCTA

อดิเรก จันตะคุณ

Adirek Jantakun

อาจารย์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

adirek.ja@muti.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งโหมดกระแส โครงสร้างวงจรประกอบด้วย วงจรขยายความนำถ่ายโอนสายพานกระแสสองเอาต์พุต (Dual-output current conveyor transconductance amplifier : DO-CCTA) จำนวน 2 ตัว ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ 1 ตัว และตัวต้านทานต่อลงกราวด์อีก 1 ตัว โดยวงจรกรองผ่านทุกความถี่ สามารถควบคุมการทำงานด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับกระแสไบแอส และการทำงานของวงจรไม่เปลี่ยนแปลงตาม อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม อีกทั้งขั้วเอาต์พุตกระแสมีค่าอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของวงจรโหมดกระแส ผลการจำลอง การทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE แสดงให้เห็นความถี่โพล ผลตอบสนองเฟสและผลตอบสนองสภาวะชั่วครู่ มีความ สอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์ไว้

คำสำคัญ: วงจรกรองผ่านทุกความถี่ วงจรขยายความนำถ่ายโอนสายพานกระแสสองเอาต์พุต ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ ตัวต้านทานต่อลงกราวด์

Abstract

This article presents the synthesis of a current-mode first-order all-pass filter using DO_CCTA. The all-pass filter consisted of two DO-CCTAs, a single grounded capacitor and a single grounded resistor. The experimented circuit could be electronically controlled with DC bias currents. The results were found to be slightly affected by the environmental temperature differences. Also, the output current had high impedances which is an advantage of the current-mode configuration. The results of simulation with a PSPICE program were that frequency, phase and transient response agreed very well with theoretical analysis.

Keywords : All-pass Filter; Dual Output Current Conveyor Transconductance Amplifier; Grounded Capacitor; Grounded Resistor

1. บทนำ

วงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่ง หรือ เป็นที่รู้จักกันดี ในชื่อ วงจรเลื่อนเฟส (Phase shift circuit) ที่ใช้เลื่อนเฟส ของสัญญาณ โดยวงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งนี้ มีการประยุกต์ใช้งานในระบบประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก อย่างมากมาย เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ วงจรกำเนิด สัญญาณไซน์หลายเฟส วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่มีค่าตัว ประกอบคุณภาพสูง (High quality factor) [1-8] เป็นต้น ปัจจุบันการสังเคราะห์และออกแบบวงจรรวมแอนะล็อก โดยมากแล้วจะพยายามสังเคราะห์ให้วงจรทำงานในโหมด

กระแส เนื่องจากโหมดกระแสมีข้อดี เช่น วงจรมีโครงสร้างที่ ง่ายไม่ซับซ้อน มีแบนด์วิดท์กว้าง พิสัยพลวัตกว้าง ใช้ แรงดันไฟฟ้าต่ำ [9-10] เป็นต้น อีกทั้งนิยมให้อุปกรณ์พาสซีฟ (Passive) ในวงจรต่อลงกราวด์ ทั้งนี้เพื่อให้เหมาะและง่าย ต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม (IC) [4-7, 10] จากการศึกษา ค้นคว้าวงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่ง พบว่ามีผู้วิจัยและ นำเสนอจำนวนมาก ดังในเอกสารอ้างอิงที่ [1-8, 11-22] โดย แต่ละวงจรมีข้อดี-ข้อด้อยแตกต่างกันไป ได้สรุปและ เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของแต่ละวงจรให้เห็นดังตารางที่ 1 และพบว่าวงจรที่นำเสนอในอ้างอิงที่ [1-8, 11-22] สามารถ

ควบคุมการทำงานได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ แต่จะมีข้อบกพร่องที่สำคัญ คือ ความถี่โพลและผลตอบสนองของเฟสของวงจรจะเปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิของสถานะแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นหากนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกหรือในระบบสื่อสารจะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ไม่ดีหรือไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากระบบจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติตามอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าบางวงจร เช่น ในอ้างอิงที่ [8, 17-18, 20] ใช้ตัวเก็บประจุแบบลอย (Floating Capacitor) ทั้งนี้หากนำวงจรดังกล่าวไปสร้างเป็นวงจรรวม จะทำให้วงจรรวมใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ [7]

จากเหตุผลและหลักการที่ได้นำเสนอข้างต้น จึงนำมาซึ่งการสังเคราะห์วงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งโหมดกระแส ที่มีข้อเด่นหลายประการ ได้แก่

ก) ใช้อุปกรณ์พาสซีฟต่อลงกราวด์ทำให้ง่ายต่อการสร้างเป็นวงจรรวม

ข) ควบคุมการทำงานของวงจรได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ง่าย

ค) ไม่ต้องการความสมพงษ์ (Matching) กันของอุปกรณ์ในวงจร

ง) เอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าสูง ทำให้สามารถขับโหลดหรือต่อพ่วง ในโหมดกระแสได้ง่าย

จ) การทำงานของวงจรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสถานะแวดล้อม นั่นคือความถี่โพลและผลตอบสนองของเฟสของวงจรไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสถานะแวดล้อม

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบวงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่ง

Ref.	Active element	Numbers of active element	Numbers of R+C	Electronic tune	Matching condition	Current-mode output	Temperature insensitive
[1]	DVCCTA	1	1+1	✓	✗	✗	✗
[2]	CCCDTA	1	0+1	✓	✗	✓	✗
[3]	CCCCTA	1	1+1	✓	✗	✓	✗
[4]	CCCII	2	1+1	✓	✗	✓	✗
[5]	CCCII	2	0+1	✓	✗	✓	✗
[6]	CCCII+OA	1	0+1	✓	✗	✗	✗
[7]	ZC-CFTA	1	0+1	✓	✗	✓	✗
[8]	CDTA	2	0+1	✓	✗	✓	✗
[11]	VDTA	1	0+1	✓	✗	✓	✗
[12]	DDCC	1	3+1	✓	✓	✓	✗
[13]	OTA	3	0+1	✓	✗	✓	✗
[14]	CFTA	1	2+1	✓	✗	✓	✗
[15]	DBTA	1	1+1	✓	✗	✗	✗
[16]	CCCCTA	2	0+1	✓	✗	✓	✗
[17]	CCCII	1	1+1	✓	✗	✗	✗
[18]	OTRA	1	3+1	✓	✓	✓	✗
[19]	CC-VCIII	1	0+1	✓	✗	✗	✗
[20]	OTRA	1	3+1	✓	✓	✓	✗
[21]	CDCTA	1	1+1	✓	✗	✓	✗
[22]	OTA	3	0+1	✓	✗	✓	✗
Experimented circuit	DO-CCTA	2	1+1	✓	✗	✓	✓

2. วงจรและหลักการทํางานของวงจร

2.1 หลักการพื้นฐานของ DO-CCTA

อดิเรก และ มนตรี [23] ได้นำเสนอวงจรรยายความนำถ่ายโอนสายพานกระแสสองเอาต์พุต (Dual-output current conveyor transconductance amplifier) หรือ DO-CCTA ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วย วงจรสายพานกระแส (Current conveyor) ต่อเรียงกันกับวงจรรยายความนำถ่ายโอน (Operational transconductance amplifier) 2 ตัว ทำให้ DO-CCTA มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังสมการที่ (1) ส่วนสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าและวงจรมุมูลย์ แสดงได้ดังรูปที่ 1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_{o1} \\ I_{o2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm g_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & \pm g_{m2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ V_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

ทั้งนี้หากโครงสร้างของ DO-CCTA สร้างจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แล้ว ค่าความนำถ่ายโอน หรือ g_m สามารถแสดงได้เป็น

$$g_{m1} = \frac{I_{B1}}{2V_T}, \quad g_{m2} = \frac{I_{B2}}{2V_T} \quad (2)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (2) จะพบว่าค่าความนำถ่ายโอนหรือ g_m จะสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระแสไบแอส I_{B1} และ I_{B2} ส่วน V_T เป็นศักดาความร้อน (Thermal voltage) ที่มีค่าประมาณ 26mV ที่อุณหภูมิห้อง

2.2 วงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่ง

วงจรรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งโหมดกระแสที่นำเสนอ แสดงได้ดังรูปที่ 2 โครงสร้างวงจรประกอบด้วย DO-CCTA จำนวน 2 ตัว ตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ 1 ตัว และตัวต้านทานต่อลงกราวด์อีก 1 ตัว โดยที่ I_{B1} , I_{B2} และ I_{B3} , I_{B4} เป็นค่ากระแสไบแอสของ DO-CCTA₁ และ DO-CCTA₂ ตามลำดับ จากคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ DO-CCTA จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของวงจร ดังนี้

$$\frac{I_{out}(s)}{I_{in}(s)} = \frac{g_{m2}g_{m3}R_1C_1 s - 1}{g_{m1}g_{m4} \left(\frac{g_{m2}g_{m3}R_1C_1}{g_{m1}g_{m4}} s + 1 \right)} \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) ความถี่โพลของวงจรจะมีค่าเป็น

$$\omega_p = \frac{g_{m1}g_{m4}}{g_{m2}g_{m3}R_1C_1} \quad (4)$$

และผลตอบสนองของเฟสจะได้เท่ากับ

$$\phi(\omega) = 180 - 2 \tan^{-1} \left(\omega \frac{g_{m2}g_{m3}R_1C_1}{g_{m1}g_{m4}} \right) \quad (5)$$

แทนค่า g_m จากสมการที่ (2) ลงในสมการที่ (3) - (5) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร ความถี่โพลและผลตอบสนองของเฟสตามลำดับดังนี้

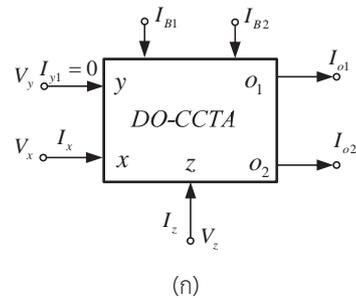
$$\frac{I_{out}(s)}{I_{in}(s)} = \frac{\frac{I_{B2}I_{B3}R_1C_1}{I_{B1}I_{B4}} s - 1}{\frac{I_{B2}I_{B3}R_1C_1}{I_{B1}I_{B4}} s + 1} \quad (6)$$

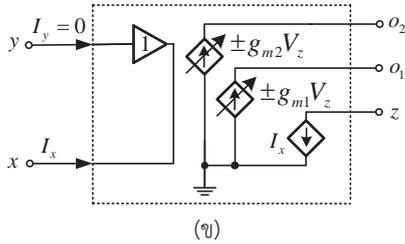
$$\omega_p = \frac{I_{B1}I_{B4}}{I_{B2}I_{B3}R_1C_1} \quad (7)$$

และ

$$\phi(\omega) = 180 - 2 \tan^{-1} \left(\omega \frac{I_{B2}I_{B3}R_1C_1}{I_{B1}I_{B4}} \right) \quad (8)$$

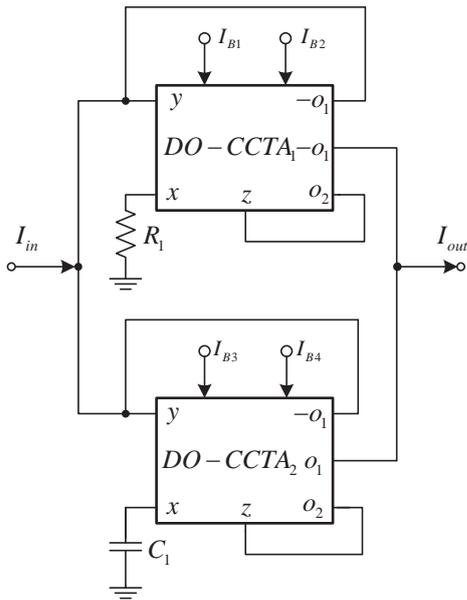
ดังนั้น จากสมการที่ (6)-(8) จะเห็นได้ว่าวงจรจะสามารถเลื่อนเฟสได้ตั้งแต่ 180° ถึง 0° อีกทั้งสามารถปรับความถี่โพลและผลตอบสนองของเฟสได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการปรับกระแสไบแอส I_{B1} ถึง I_{B4} และ ที่สำคัญคือไม่ปรากฏเทอมของศักดาความร้อน หรือ V_T ในสมการความถี่โพลและผลตอบสนองของเฟส นั่นคือ การทํางานของวงจรจะไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม ส่วนกระแสเอาต์พุตของวงจรมีอิมพีแดนซ์สูงทำให้ต่อพ่วงหรือขับโหลดในโหมดกระแสได้โดยตรง





รูปที่ 1 DO-CCTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_{o1} \\ I_{o2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm\beta_1 g_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & \pm\beta_2 g_{m2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \\ V_o \end{bmatrix} \quad (9)$$



รูปที่ 2 วงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่ง

2.3 การวิเคราะห์ความไม่เป็นอุดมคติของวงจร

ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับวงจรกรองผ่านทุกความถี่ จากกรณี DO-CCTA ไม่เป็นอุดมคติ โดยเกิดขึ้นจากการเบี่ยงเบนของกระแสและแรงดันของ DO-CCTA แสดงได้ในสมการคุณสมบัติทางไฟฟ้า ดังนี้

เมื่อ γ คือ ความผิดพลาดในการส่งผ่าน (Tracking error) แรงดันจากขั้ว y ไปยังขั้ว x, α คือ ความผิดพลาดในการส่งผ่านกระแสจากขั้ว x ไปยังขั้ว z และ β คือ ความผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดันจากขั้ว z เพื่อถ่ายโอนเป็นกระแสที่ขั้ว o ซึ่งโดยปกติแล้วพารามิเตอร์เหล่านี้จะมีค่าเป็น 1 เสมอ และหากค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เบี่ยงเบนไปจาก 1 ทำให้สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร ที่เกิดขึ้นจากผลกระทบของพารามิเตอร์เหล่านี้ ได้ดังนี้

$$\frac{I_{out}(s)}{I_{in}(s)} = \frac{\alpha_2 \gamma_2 \beta_2 \beta_3 g_{m2} g_{m3} R_1 C_1 s - 1}{\alpha_1 \gamma_1 \beta_1 \beta_4 g_{m1} g_{m4} s + 1} \quad (10)$$

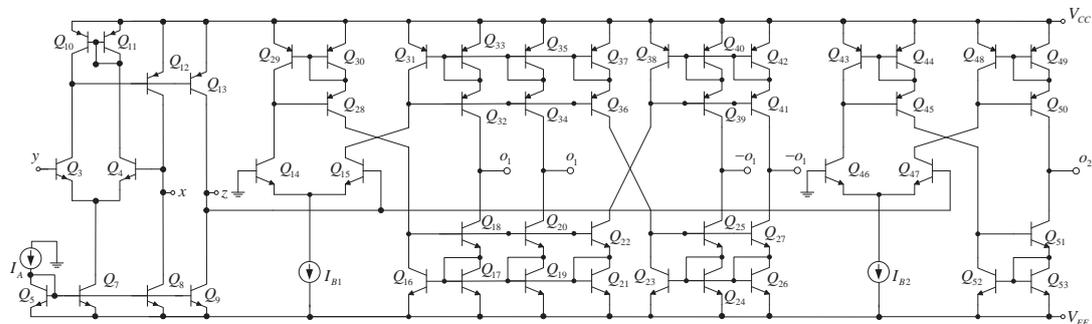
อีกทั้งเกิดผลกระทบต่อความถี่โพลและผลตอบสองของเฟส คือ

$$\omega_p = \frac{\alpha_1 \gamma_1 \beta_1 \beta_4 g_{m1} g_{m4}}{\alpha_2 \gamma_2 \beta_2 \beta_3 g_{m2} g_{m3} R_1 C_1} \quad (11)$$

และ

$$\phi(\omega) = 180 - 2 \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_2 \gamma_2 \beta_2 \beta_3 g_{m2} g_{m3} R_1 C_1}{\alpha_1 \gamma_1 \beta_1 \beta_4 g_{m1} g_{m4}} \right) \quad (12)$$

ทั้งนี้ในทางปฏิบัติพารามิเตอร์เหล่านี้ อาจเกิดจากความไม่สมพ่วงกันของทรานซิสเตอร์ที่นำมาประกอบเป็น



รูปที่ 3 โครงสร้างภายในของ DO-CCTA

โครงสร้างภายในของ DO-CCTA

นอกจากนี้แล้วพารามิเตอร์อย่างหนึ่งที่มีความสำคัญที่ควรพิจารณา คือ ผลกระทบของอุปกรณ์แฝงที่ขั้วของ DO-CCTA เมื่อพิจารณาวงจรที่นำเสนอแล้วพบว่า ความต้านทานแฝงที่ขั้ว $\times (R_x)$ จะมีผลกระทบต่อการทำงานของวงจรมากที่สุด เนื่องจากความต้านทานแฝงที่ขั้ว $\times (R_x)$ จะเสมือนต่ออนุกรมกับอุปกรณ์พาสซีฟของวงจร ดังเช่นที่ DO-CCTA₁ จะได้อิมพีแดนซ์ที่ขั้ว \times คือ $R_1 + R_{x1}$ แต่ถ้า $R_1 \gg R_{x1}$ จะประมาณได้ว่า $R_1 + R_x \approx R_1$ ส่วนที่ DO-CCTA₂ ตัวเก็บประจุ C_1 จะถูกต่ออนุกรมกับ R_{x2} เช่นกัน ดังนั้นทำให้อิมพีแดนซ์ที่ขั้ว \times มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{C_1 s} + R_{x2}$ ส่งผลให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรเปลี่ยนแปลงเป็น

$$\frac{I_{out}(s)}{I_{in}(s)} = \frac{\frac{\alpha_2 \gamma_2 \beta_2 \beta_3 g_{m2} g_{m3} R_1 C_1}{\alpha_1 \gamma_1 \beta_1 \beta_4 g_{m1} g_{m4} (1 + R_{x2} C_1 s)} s - 1}{\frac{\alpha_2 \gamma_2 \beta_2 \beta_3 g_{m2} g_{m3} R_1 C_1}{\alpha_1 \gamma_1 \beta_1 \beta_4 g_{m1} g_{m4} (1 + R_{x2} C_1 s)} s + 1} \quad (13)$$

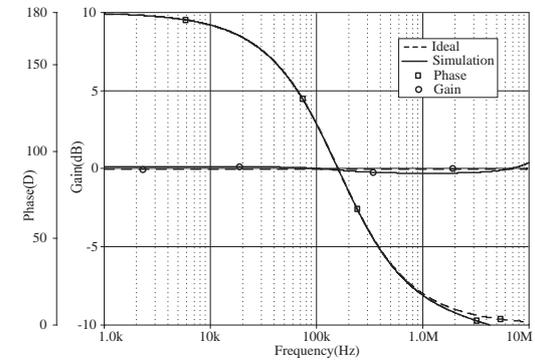
จากสมการที่ (13) จะพบว่าความต้านทานแฝง R_x ที่ขั้วของ DO-CCTA จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อลดผลกระทบดังกล่าวต้องออกแบบโครงสร้างของ DO-CCTA ให้มีค่า R_x ต่ำๆหรือมีค่าเป็นศูนย์

3. ผลการจำลองการทำงานของวงจร

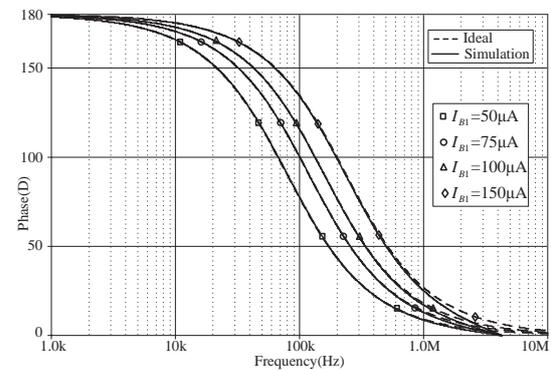
จากที่ได้วิเคราะห์ทฤษฎีในหัวข้อที่ผ่านมา ทำการทดสอบการทำงานของวงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งโหมดกระแส ด้วยการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN จากเบอร์ PR200 และ NR200 ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ ALA400 [23] สำหรับโครงสร้างของ DO-CCTA ที่ใช้ในการจำลองการทำงานนั้น แสดงไว้ในรูปที่ 3 และใช้แหล่งจ่ายแรงดันขนาด $\pm 1.75V$ ทั้งนี้เพื่อความสะดวก ได้กำหนดกระแสไบแอสของ DO-CCTA ให้มีค่าเท่ากันทั้งหมด คือ $I_{A1} = I_{A2} = I_{B1} = I_{B2} = I_{B3} = I_{B4} = 100\mu A$ ส่วนอุปกรณ์พาสซีฟที่ต่อภายนอก เลือกใช้อุปกรณ์ค่ามาตรฐาน คือ $C_1 = 1nF$ และ $R_1 = 1k\Omega$

ผลการจำลองการทำงานของวงจรเพื่อหาเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ พบว่าวงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งที่น่าสนใจ มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูงถึง $753.96k\Omega$ และ จากการกำหนดอุปกรณ์พาสซีฟภายนอก และกระแสไบแอส สามารถคำนวณความถี่โพลได้เท่ากับ $159.1kHz$ และมุมเฟสมีค่าเท่ากับ 90 องศา ผลการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 4 แสดงให้

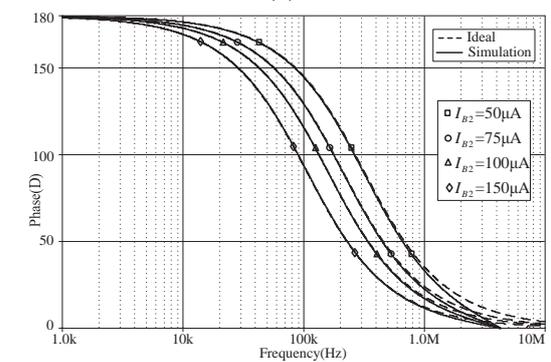
เห็นถึงผลตอบสนองอัตราขยาย (Gain) และ เฟส (Phase) ของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ ซึ่งมีความสอดคล้องกับอุดมคติมาก



รูปที่ 4 ผลตอบสนองอัตราขยายและเฟสของวงจร



(ก)



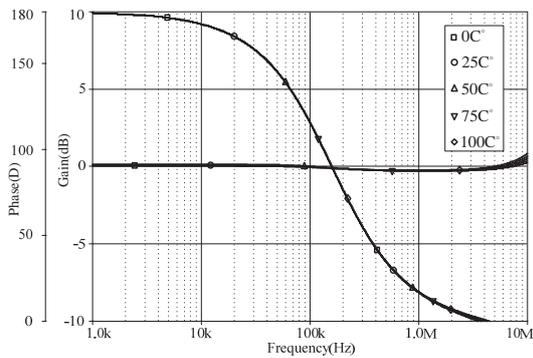
(ข)

รูปที่ 5 สาธิตการปรับผลตอบสนองของเฟสด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยกระแสไบแอส (ก) I_{B1} , (ข) I_{B2}

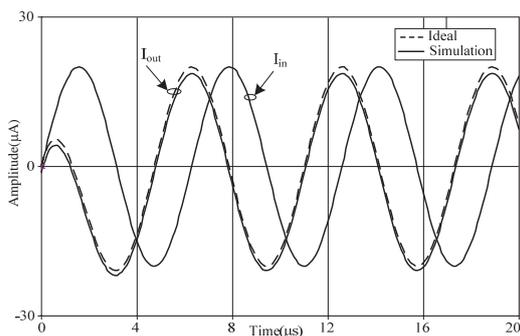
รูปที่ 5 เป็นการสาธิตผลการปรับผลตอบสนองของเฟสด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยปรับกระแสไบแอส I_{B1} และ I_{B2} เมื่อรูปที่ 5 (ก) เป็นการปรับกระแสไบแอส I_{B1} เท่ากับ $50\mu A, 75\mu A, 100\mu A$ และ $150\mu A$ พบว่าความถี่โพลที่มี

มุมเฟส 90 องศา เปลี่ยนเป็น 79.5kHz, 119.3kHz, 159.1kHz และ 238.6kHz ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 5 (ข) ความถี่โพลที่มีมุมเฟส 90 องศา เปลี่ยนเป็น 318.3kHz, 212.1kHz, 159.1kHz และ 106kHz ด้วยการปรับกระแสไบแอส I_{B2} เท่ากับ 50 μ A, 75 μ A, 100 μ A และ 150 μ A ตามลำดับ โดยที่ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 5 มีความใกล้เคียงกับอุดมคติทุกประการ

เพื่อเป็นการยืนยันว่า การทำงานของวงจรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม ดังที่ได้วิเคราะห์ไว้ในสมการที่ (6) – (8) จึงทดสอบการทำงานของวงจรที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 0°C, 25°C, 50°C, 75°C และ 100°C จากผลจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองอัตรายายและเฟสของวงจรเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

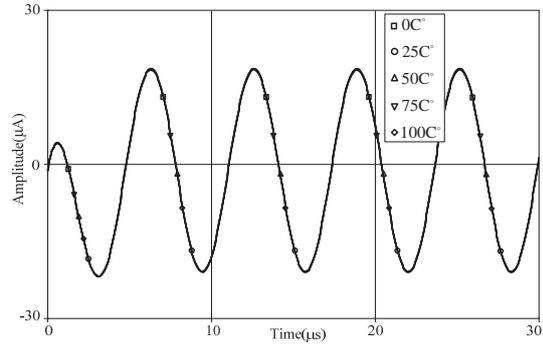


รูปที่ 6 ผลตอบสนองอัตรายายและเฟสของวงจร เมื่อทดสอบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

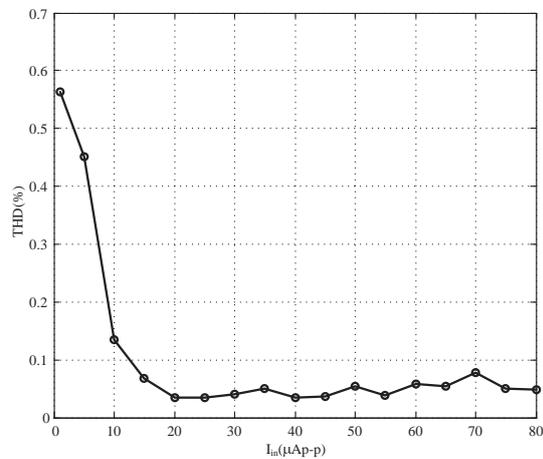


รูปที่ 7 ผลตอบสนองสภาวะชั่วคราว

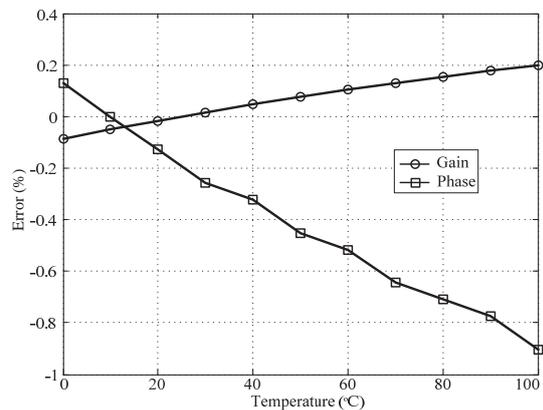
ผลการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 7 แสดงผลตอบสนองสภาวะชั่วคราว (Transient response) โดยป้อนสัญญาณไซน์เข้าที่อินพุตของวงจรด้วยความถี่ 159.1kHz ขนาด 40 μ A_{p-p} จะพบว่ามุมเฟสของสัญญาณไซน์เอาต์พุตเลื่อนไปประมาณ 90° ซึ่งใกล้เคียงกับอุดมคติ



รูปที่ 8 สัญญาณไซน์เอาต์พุต เมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน



รูปที่ 9 %THD กับขนาดของอินพุต



รูปที่ 10 ความผิดพลาดของอัตรายายและเฟส (%) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

สำหรับรูปที่ 8 เป็นสัญญาณไซน์เอาต์พุตของวงจร เมื่อทดสอบการทำงานของวงจรที่อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมแตกต่างกัน คือ 0°C, 25°C, 50°C, 75°C และ 100°C จะเห็นว่าสัญญาณไซน์เอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

นั่นคือ การทำงานของวงจรไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
นั่นเอง

รูปที่ 9 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (%THD) ของ
สัญญาณไซน์เอ๊าต์พุต เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ความถี่
159.1kHz และปรับขนาดของสัญญาณไซน์อินพุต โดย
พบว่า %THD จะมีค่าไม่เกิน 0.1% เมื่อขนาดของสัญญาณ
ไซน์อินพุตมีขนาดตั้งแต่ $15\mu A_{p-p}$ - $80\mu A_{p-p}$

ผลการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 10 แสดง
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอัตราขยายและเฟส เมื่อ
เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมจาก $0^{\circ}C$ ถึง
 $100^{\circ}C$ ซึ่งจะเห็นว่าอัตราขยายผิดพลาดเพียง -0.08% และ
0.19% ที่อุณหภูมิ $0^{\circ}C$ และ $100^{\circ}C$ ตามลำดับ ส่วน
ผลตอบสนองของเฟสผิดพลาดเพียง 0.12% และ -0.90% ที่
อุณหภูมิ $0^{\circ}C$ และ $100^{\circ}C$ ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์ความ
ผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงสรุปได้ว่า การ
ทำงานของวงจร มีความไวต่ำต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจริง

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรกรองผ่านทุก
ความถี่โหมดกระแส โดยใช้ DO-CCTA เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ
หลัก โครงสร้างของวงจรประกอบด้วย DO-CCTA จำนวน 2
ตัว และอุปกรณ์พาสซีฟต่อภายนอกอีก 2 ตัว คือ ตัวเก็บประจุ
ต่อลงกราวด์ 1 ตัว และ ตัวต้านทานอีก 1 ตัว วงจรสามารถ
ปรับความถี่โพลและผลตอบสนองของเฟสได้ด้วยวิธีการ
อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้วงจรร่วมกับระบบ
ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ อีกทั้งการทำงานของวงจรไม่
เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ผลการจำลองการทำงานของ
วงจรด้วยโปรแกรม PSPICE แสดงให้เห็นได้ว่าการทำงานของ
วงจรมีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์ไว้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ศิริปรัชญา
นันท์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ข้อเสนอแนะการทำวิจัย
รวมทั้งเทคนิคการเขียนบทความวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pandey N., Pandey R, Paul S. K. 2012. A first order all pass filters and its application in a quadrature oscillator. *Journal of Electron Devices*, 12, p.772 – 777.
- [2] Kumngern K., Lamun P. 2013. Allpass section-based mixed-mode quadrature sinusoidal oscillator. *2013 IEEE Int. con. Control System, Computing and Engineering*, 29 Nov.-1 Dec 2013, Penang, Malaysia, p. 226-229.
- [3] Kumngern K., Chanwutitum J. 2013. An electronically tunable current-mode first-order allpass filter using a CCCCTA. *The 2013 Int. con. Advanced Technologies for Communications (ATC'13)*, 16-18 October, 2013, Hochiminh, Vietnam, P.733-736.
- [4] Songkla N. S., Jaikla W. 2012. Realization of electronically tunable current-mode first-order allpass filter and its application. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 61, p..410-413.
- [5] Tangsrirat W. 2012. Cascadable current-mode first-order allpass filter using current controlled conveyors. *Przeglad Elektrotechniczny*, R. 89 NR 1a/2013, p.187-190.
- [6] Bajer B., Biolk D. 2010. Voltage-mode electronically tunable all-pass filter employing CCCII+, one capacitor and differential input voltage buffer. *2010 IEEE 26th Convention of Electrical and Electronics Engineering in Israel*, 17-20 November 2010, Eilat, Israel, p. 934-937.
- [7] Tangsrirat W., Mongkolwai P., Pukkalanum T. 2012. Current-mode high-Q bandpass filter and mixed-mode quadrature oscillator using ZC-CFTAs and grounded capacitors. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 50, P.600-607.

- [8] Tangsirat W., Tanjaroen W., Pukkalanum T. 2009. Current-mode multiphase sinusoidal oscillator using CDTA-based allpass sections. **Int. J. Electron. Commun.**, 63, p.616-622.
- [9] อติเรก จันทะคุณ และวินัย ไจกล้ำ. 2555. เทคนิคการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์หลายเฟส. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม**. 11(3). น.91-99.
- [10] สุรพงษ์ สิริพงษ์ดี, สันติ ตันตระกูล. 2555. เทคนิคการสังเคราะห์วงจรกรองความถี่โหมดกระแสหลายหน้าที่อันดับสอง. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม**, 11(1). น. 251-259.
- [11] Maneewan S., Udorn N., Dungmalai, Silapan P., Jaikla W. 2014. A voltage-mode first order allpass filter based on VDTA. **Advance in Electrical and Electronic Engineering**, 12(1), p.40-46.
- [12] Kumngern K., Torteanchai U. 2011. Current-tunable current-mode all-pass section using DDCC. **2011 Int. Con. Electronics Devices, Sys. and App.**, 25-27 April 2011, Kuala Lumpur, Malaysia, p. 217-220.
- [13] Tsukutani T., Tsukutani H., Sumi Y., Yabuki N. 2010. Electronically tunable first-order all pass section using OTAs. **2010 Int. Con. Computer App. and Industrial Electronics (ICCAIE2010)**, December 5-7, 2010, Kuala Lumpur, Malaysia, p.548-511.
- [14] Torteanchai U., Kumngern K. 2014. First-order allpass network using CFTA. **The 4th JICTEE 2014**, Changrai, Thailand.
- [15] Herencsar N., Koton J., Vrba K., Metin B. 2012. Fully cascable dual-mode all-pass filter based on single DBTA. **35th Int. Con. Telecommunication and Signal Processing (TSP)**, 3-4 July 2012, Prague, p.374-377.
- [16] Jaikla W., Noppakarn, Lawanwisut S. 2012. New gain controllable resistor-less current-mode first order allpass filter and its application. **Radioengineering**, 21(1), p.312-316.
- [17] Toker A., Gunes E. O., Ozoguz S. 2001. New high-Q band-pass filter configuration using current controlled current conveyor based all-pass filters. **The 8th IEEE Int. Con. Electronics, circuits and Systems**, 2-5 September 2001, p.165-168.
- [18] Cakir C., Cam U., Cicekoglu O. 2005. Novel allpass filter configuration employing single OTRA. **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, 52(3), p.122-125.
- [19] Herencsar N., Koton J., Vrba K., Metin B. 2011. Novel voltage conveyor with electronic tuning and its application to resistorless all-pass filter. **34th Int. Con. Telecommunication and Signal Processing (TSP)**, 18-20 Aug. 2011, Budapest, p.265-268.
- [20] Kilinc S., Cam U. 2004. Operational transistance amplifier based first-order allpass filter with an application example. **The 47th IEEE Int. Midwest Symposium on Circuits and Systems**, 25-28 July 2004, I-65-68.
- [21] Saied A. B., Salem S. B., Masmoudi D. S., 2013. A quadrature oscillator based on a new optimized DDCC all-pass filter. **Circuits and Systems**, 4, p.498-503.
- [22] Kumngern M. 2012. Realization of electronically tunable first-order allpass filter using single-ended OTAs. **2012 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA2012)**, 23-26 September 2012, Bandung, p.100-103.
- [23] อติเรก จันทะคุณ, มนตรี ศิริปรัชญานันท์. 2553. วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยใช้ DO-CCTA. **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33**, โรงแรมเซ็นทาราดวงตะวัน จ. เชียงใหม่, 1-3 ธันวาคม 2553, o.1101-1104.