

# วงจรรองความถี่หลายหน้าที่รูปแบบกระแสที่ใช้โครงสร้างของวงจรรองความถี่สูงผ่านแบบไม่สูญเสีย

## Current-mode Universal Filter based-on Lossless High-pass Filter Structure

มนตรี สมดุลยกัน\* และ พิพัฒน์ พรหมมี\*\*

\*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม โทร. 0-2457-0068 ต่อ 123 E-mail: [monsom@siamu.com](mailto:monsom@siamu.com)

\*\*คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โทร. 0-2326-4238 โทรสาร 0-2326-4554 E-mail: [pipat@telecom.kmitl.ac.th](mailto:pipat@telecom.kmitl.ac.th)

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรรองความถี่หลายหน้าที่รูปแบบกระแสแบบใหม่ ที่ใช้วงจรรองความถี่สูงผ่านแบบไม่สูญเสียเพียงสองวงจร โดยผลลัพธ์ที่ได้ยังคงบรรลุข้อดีเช่นเดียวกับการใช้ OTAs และตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์สองตัว วงจรที่นำเสนอเป็นวงจรที่มีสามอินพุตและหนึ่งเอาต์พุตสามารถกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนการกรองความถี่ได้ห้ารูปแบบ (LPF, BPF, HPF, BRF, APF) ในวงจรเดียวกัน นอกจากนี้ วงจรที่นำเสนอให้ค่าความถี่ตอบสนองของการกรองความถี่ ( $\omega_p$ ) ที่สูงขึ้น ด้วยการปรับแต่งค่ากระแสไบอัสของ OTAs โดยไม่กระทบต่อความถี่เสถียรของค่าคุณภาพ ( $Q_p$ ) คุณลักษณะของวงจรรองความถี่ที่นำเสนอถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice และผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ในทางทฤษฎี

### Abstract

This paper presents new current-mode universal filter employing only two lossless high-pass filters by which the obtained result still achieves the advantages obtained by employing OTAs and two grounded capacitors. The proposed filter consists of three inputs and single output, where either one of the five filtering transfer functions (LPF, BPF, HPF, BRF, APF) can be achieved by this only one filter. In addition, higher filtering response frequency ( $\omega_p$ ) can be obtained through adjusting bias current of OTAs

without affecting its quality factor ( $Q_p$ ) stability. Characteristics of the proposed filter are simulated using PSpice and its results are in agreement with the theory.

### 1. บทนำ

ปัจจุบันการประมวลผลสัญญาณที่ทำงานในรูปแบบกระแสกำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเพราะมีข้อดี คือ มีช่วงปฏิบัติการกว้าง ค่าพิสัยพลวัตและความเป็นเชิงเส้นดี มีความเที่ยงตรงและใช้กำลังงานน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรที่ทำงานในรูปแบบแรงดัน [1-2] ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการออกแบบวงจรรองความถี่รูปแบบกระแส โดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟ เช่น วงจรตามกระแส (Current Follower: CF) [3] วงจรสายพานกระแส (CCII) [4] และวงจรรายความนำ (Operational Transconductance Amplifier: OTA) [5-10]

สมการไบควอดเรติก ถือเป็นหลักการที่นิยมใช้กันอย่างมาก และถูกนำมาสังเคราะห์เป็นวงจรรองความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยหลักการดังกล่าวสามารถสร้างวงจรรองความถี่ได้หลายรูปแบบ โดยการทำงานของวงจรรองความถี่ตามหลักการนี้ได้มีผู้เสนอไว้ในอดีต [5-12] ที่ออกแบบด้วยโครงสร้างของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน และเมื่อสร้างเป็นวงจรรองความถี่ มีผลทำให้ค่าอัตราขยายจะลดลงที่ความถี่สูงขึ้น กอปรกับแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์แอกทีฟซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน ดังนั้นอัตราขยายจึงไม่มีความเสถียร แต่ด้วยการใช้โครงสร้างของวงจรรองความถี่สูงผ่านทำให้อัตราขยายสูงที่ความถี่สูง เพื่อชดเชยการตอบสนองทางความถี่ของอุปกรณ์แอกทีฟ และเมื่อนำมาสร้างเป็นวงจร

กรองความถี่ ทำให้เกิดความเสถียรทางความถี่สูงที่ดีขึ้น ทั้งนี้เพื่อชดเชยกับแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์แอกทีฟในวงจร

บทความนี้นำเสนอวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่รูปแบบกระแส โดยวิเคราะห์วงจรด้วยสมการไปควอดเรติก ซึ่งสมการของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ถูกใช้เป็นสมการตั้งต้นและสังเคราะห์โครงสร้างจากวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบไม่สูญเสีย โดยมีโอทีเอและตัวเก็บประจุแบบต่อกราวด์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์หลัก เพื่อให้ได้วงจรกรองความถี่ชนิดหลายอินพุตหนึ่งเอาต์พุตในรูปแบบกระแส สามารถปรับค่าความถี่ตอบสนอง ( $\omega_p$ ) ได้สูง ซึ่งปรับได้จากค่ากระแสไบอัสของโอทีเอ ( $I_B$ ) และยังคงให้คุณสมบัติของวงจรกรองอื่นๆ ได้อย่างครบถ้วน การใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อกราวด์และไม่ใช้ตัวต้านทาน มีผลทำให้วงจรที่นำเสนอเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมต่อไป

## 2. ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 สมการไปควอดเรติก

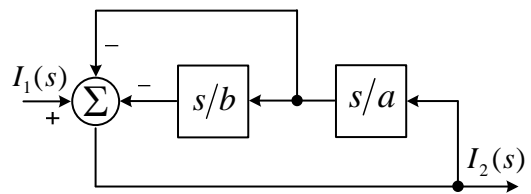
สมการที่ (1) แสดงสมการไปควอดเรติกในรูปแบบของวงจรกรองความถี่ต่ำ (LPF) ทำการ Normalized ความถี่ให้มีค่าเป็น 1

$$\frac{I_2(s)}{I_1(s)} = \frac{ab}{s^2 + sb + ab} \quad (1)$$

ปรับสมการที่ (1) ให้อยู่ในรูปแบบของวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบไม่สูญเสีย ได้ดังสมการที่ (2)

$$I_2(s) = I_1(s) - I_2(s) \left( \frac{s^2}{ab} \right) \left( \frac{s}{a} \right) \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) สามารถนำมาเขียนเป็น Block Diagram ของหลักการที่นำเสนอ ได้ดังรูปที่ 1



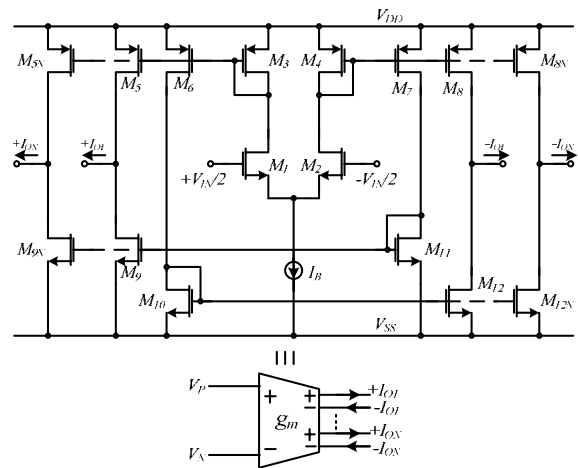
รูปที่ 1 Block Diagram ของหลักการที่นำเสนอ

### 2.2 วงจรโอทีเอหลายเอาต์พุตแบบซีมอส

วงจรโอทีเอหลายเอาต์พุตแบบซีมอสพื้นฐาน (Basic CMOS Multiple-output Operational Transconductance Amplifier: CMOS MO-OTA) ดังรูปที่ 2 จะมีคุณสมบัติให้เอาต์พุตเป็นกระแสโดยมีอินพุตเป็นแรงดัน [11] ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตดังสมการที่ (3)

$$\frac{I_O}{V_{in}} = g_m = \sqrt{(I_B)(\mu_o C_{ox} W/L)}_{1,2} \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) ค่าทรานสคอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) นั้นสามารถปรับได้จากการปรับค่าของกระแสไบอัส ( $I_B$ )

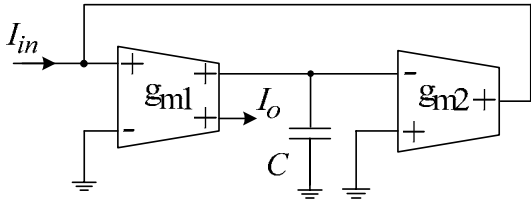


รูปที่ 2 วงจรโอทีเอหลายเอาต์พุตแบบซีมอสพื้นฐาน

### 2.3 วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบไม่สูญเสีย

จากหลักการในรูปที่ 1 อุปกรณ์ที่สังเคราะห์เป็นวงจรกรองความถี่สำหรับบทความนี้ประกอบด้วยวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบไม่สูญเสีย (Lossless High-pass Filter) ที่สร้าง

จากโอทีเอหลายเอาต์พุต และตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 3 โดยมีค่าฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ (4)

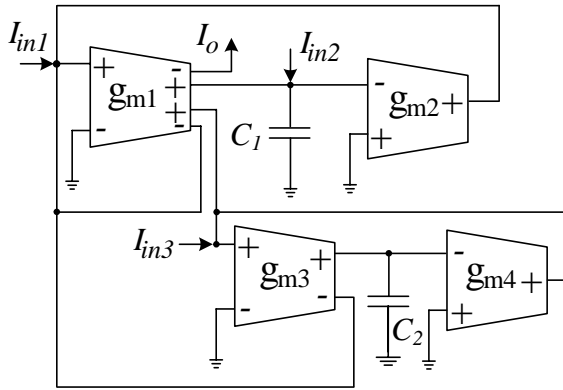


รูปที่ 3 วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบไม่สูญเสีย

$$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{sC}{g_{m2}} \quad (4)$$

### 3. วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่รูปแบบกระแส

จากหลักการของ Block Diagram รูปที่ 1 และรูปที่ 3 ถูกนำมาสังเคราะห์เป็นวงจรกรองความถี่ที่ได้นำเสนอ แสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งมีค่าฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ (5) และเห็นได้ว่าค่าของ  $g_{m3}$  ไม่มีผลต่อกระทบกับสมการที่ (5) เนื่องจากถูกหักล้างกันหมดในเทอมของสมการที่ (4)



รูปที่ 4 วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่รูปแบบกระแสที่นำเสนอ

$$I_o(s) = \frac{-k_3 I_{in3} s^2 + k_1 I_{in1} s \frac{g_{m4}}{C_2} - k_2 I_{in2} \frac{g_{m2} g_{m4}}{C_1 C_2}}{D(s)} \quad (5)$$

$$\text{เมื่อ } D(s) = s^2 + s \frac{g_{m4}}{C_2} + \frac{g_{m2} g_{m4}}{C_1 C_2} \quad (6)$$

จากสมการที่ (5) และ (6) ค่าการตอบสนองความถี่แบบต่างๆ และตัวแปรอินพุต  $k_1$ ,  $k_2$  และ  $k_3$  จะมีค่าเป็นศูนย์หรือมากกว่าศูนย์ สามารถกำหนดได้จากเงื่อนไขของฟังก์ชันในวงจรถัดนั้น วงจรกรองความถี่ที่ได้จะมีค่าของตัวแปร คือ

- ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนแบบความถี่ต่ำผ่าน (LPF) โดยกำหนดให้ตัวแปรอินพุต  $k_3 = k_1 = 0$  และ  $k_2 = 1$
- ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนแบบความถี่สูงผ่าน (HPF) โดยกำหนดให้ตัวแปรอินพุต  $k_1 = k_2 = 0$  และ  $k_3 = 1$
- ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแถบความถี่ผ่าน (BPF) โดยกำหนดให้ตัวแปรอินพุต  $k_2 = k_3 = 0$  และ  $k_1 = 1$
- ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแถบความถี่ที่ต้องการออก (BRF) โดยกำหนดให้ตัวแปรอินพุต  $k_1 = 0$  และ  $k_2 = k_3 = 1$
- ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนแบบผ่านทุกความถี่ (APF) โดยกำหนดให้ตัวแปรอินพุต  $k_1 = k_2 = k_3 = 1$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า วงจรที่นำเสนอสามารถสร้างเป็นวงจรกรองความถี่หลายหน้าที่รูปแบบกระแสได้ทุกรูปแบบ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการกำหนดค่าตัวแปรอินพุต  $k$  เพื่อให้ได้เอาต์พุตตามที่ต้องการ และเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายไฟตรง (DC Gain) ของวงจรกรองความถี่ที่ได้ในแต่ละแบบจะมีค่าแตกต่างกันคือ  $H_{HP}(s) = -1$ ,  $H_{LP}(s) = -1$ ,  $H_{BR}(s) = 1$  และ  $H_{BP}(s) = 1$  เมื่อพิจารณาเทียบกับรูปแบบทั่วไปของสมการไบควอดเรติกเป็น ดังสมการที่ (7)

$$D(s) = s^2 + s \frac{\omega_p}{Q_p} + \omega_p^2 \quad (7)$$

เมื่อตัวแปรที่เกี่ยวข้อง  $\omega_p$  และ  $Q_p$  มีค่าเท่ากับ

$$\omega_p = \sqrt{\frac{g_{m2} g_{m4}}{C_1 C_2}} \quad (8)$$

$$\text{และ } Q_p = \sqrt{\frac{g_{m2} C_2}{g_{m4} C_1}} \quad (9)$$

จากสมการที่ (8) - (9) กำหนดให้  $g_{m2} = g_{m4} = g_m$  และ  $C_1 = C_2 = C$  ทำให้การปรับค่าความถี่ตอบสนอง  $\omega_p$

ซึ่งทำได้โดยการปรับค่า  $g_m$  ผ่านการปรับค่ากระแสไบอัส ( $I_B$ ) ของโอทีเอ โดยไม่มีผลกระทบต่อค่าคุณภาพ  $Q_p$  ซึ่งหมายถึงค่าคุณภาพจะมีเสถียรจากการปรับค่าความถี่ตอบสนอง

#### 4. ค่าความไวของวงจร

วงจรรองความถี่ที่นำเสนอสมากรถึย่นย่นประสิทธิภาพการทำงานได้ โดยการวิเคราะห์ค่าความไวของอุปกรณ์แอกทีฟและแพสซีฟที่มีผลต่อค่าความถี่ตอบสนอง  $S_x^{\omega_p}$  และค่าคุณภาพ  $S_x^{Q_p}$  จากสมการที่ (8) - (9) เมื่อ  $x$  คืออุปกรณ์แอกทีฟและแพสซีฟในวงจรถัดละตัว ซึ่งสามารถหาค่าความไวของพารามิเตอร์  $\omega_p$  และ  $Q_p$  ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความไวตัวแปรแอกทีฟในวงจรถัด

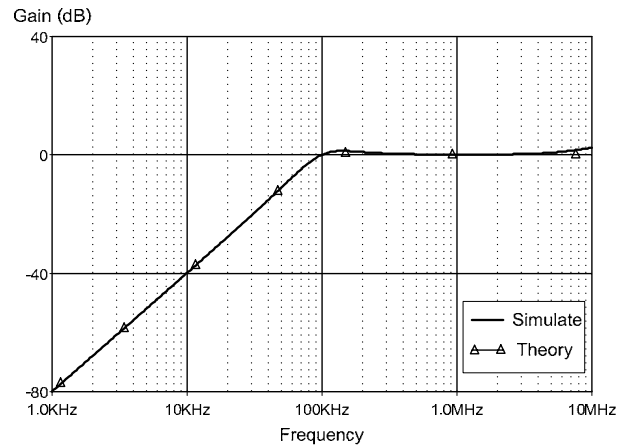
$x$	$S_x^{\omega_p}$	$S_x^{Q_p}$
$g_{m1}$	0	0
$g_{m2}$	0.5	0.5
$g_{m3}$	0	0
$g_{m4}$	0.5	-0.5
$C_1$	-0.5	-0.5
$C_2$	-0.5	0.5

#### 5. ผลจำลองการทำงาน

วงจรรองความถี่ที่รูปแบบกระแสที่นำเสนอสมากรถึย่นย่นคุณลักษณะและประสิทธิภาพของวงจรถัด ด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งใช้แบบจำลอง Model ของ MOSIS TSMC ขนาด  $0.25 \mu\text{m}$  ที่ออกแบบเป็นวงจรถัด CMOS MO-OTA ตามรูปที่ 2 และใช้ตัวเก็บประจุขนาด  $10 \text{ pF}$  ที่แรงดันไฟเลี้ยง  $\pm 1.2$  โวลต์ขนาดของทรานซิสเตอร์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

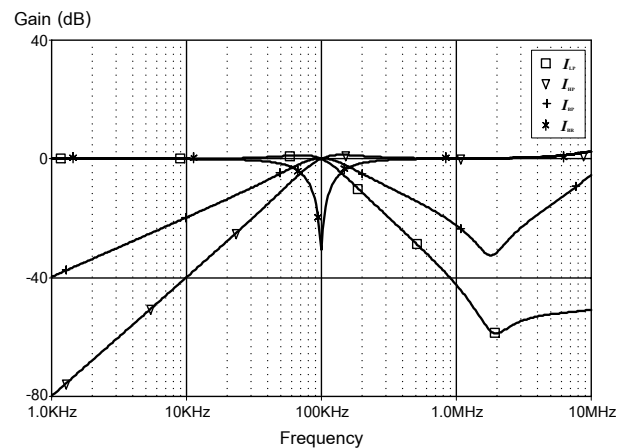
ตารางที่ 2 ขนาดของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ใน CMOS MO-OTA

Transistor	$W(\mu\text{m})$	$L(\mu\text{m})$
$M_1, M_2, M_3, M_4, M_6, M_7$	5	1
$M_5, M_8$	5.5	1
$M_9-M_{12}$	3	1



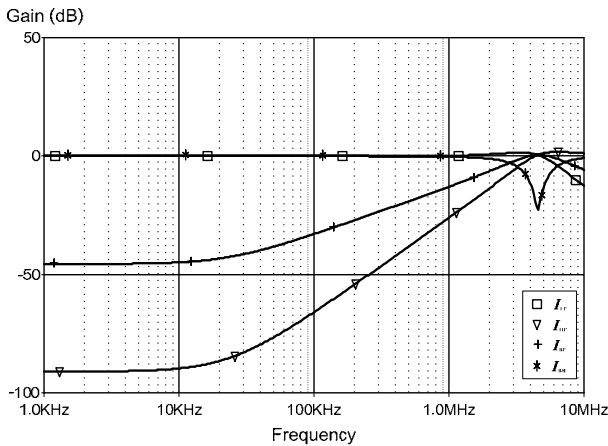
รูปที่ 5 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่สูงผ่านเทียบกับผลจำลองการทำงานกับผลทางทฤษฎี

จากรูปที่ 5 คือการเปรียบเทียบผลจำลองการทำงานกับผลทางทฤษฎี พบว่าค่าการตอบสนองความถี่  $\omega_p$  มีความสอดคล้องกันที่ความถี่ตอบสนอง  $100 \text{ kHz}$



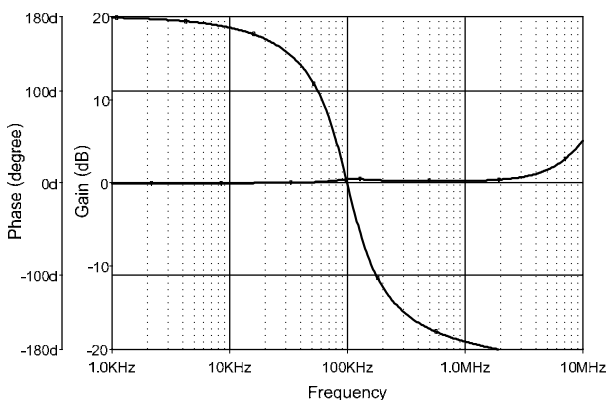
รูปที่ 6 คุณสมบัติของตัวกรองทั้ง 4 แบบ เมื่อปรับค่า  $I_B =$

$$0.5 \mu\text{A}$$



รูปที่ 7 คุณสมบัติของตัวกรองทั้ง 4 แบบ เมื่อปรับค่า  $I_B = 100 \mu A$

จากรูปที่ 6 - 7 ทำการจำลองการทำงานของวงจรเพื่อหาคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ทั้งหมดที่นำเสนอ จากสมการที่ (8) ทำการปรับค่ากระแสไบอัสของโอทีเอ ให้มีค่า  $0.5 \mu A$  และ  $100 \mu A$  ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าความถี่ตอบสนอง  $\omega_p$  ของวงจรเท่ากับ 100 kHz และ 4.6 MHz ตามลำดับ เมื่อค่าคุณภาพ ( $Q_p = 1$ ) เห็นได้ว่าจะสามารถปรับค่าความถี่ตอบสนอง  $\omega_p$  ได้ความถี่สูงขึ้นกว่าการใช้วงจรกรองความถี่รูปแบบกระแสในอดีตที่ผ่านมา จากรูปที่ 8 แสดงเอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอในส่วนของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ (APF) โดยมีความถี่ตอบสนองอยู่ที่ 100 kHz



รูปที่ 8 คุณสมบัติของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่ความถี่ 100 kHz

## 6. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอ วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่รูปแบบกระแส ที่ใช้โครงสร้างวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบไม่สูญเสียสองวงจร และตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์สองตัว วงจรที่นำเสนอมีสามอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต ที่ให้ฟังก์ชันการถ่ายโอนได้ห้ารูปแบบในวงจรเดียวกัน ค่าความถี่ตอบสนอง  $\omega_p$  ของฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าว สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยปรับจากค่ากระแสไบอัสของโอทีเอ และมีการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice ผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ในทางทฤษฎี วงจรที่นำเสนอแสดงให้เห็นได้ว่า สามารถปรับค่าความถี่ตอบสนองได้สูงกว่าวงจรกรองความถี่ที่ใช้โครงสร้างของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีการนำเสนอในอดีต และการใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อกราวด์ซึ่งไม่ใช่ตัวต้านทาน ทำให้วงจรที่นำเสนอเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสยาม ที่ส่งเสริมในเรื่องของการทำวิจัยของคณาจารย์ และ พล.ท.ดร.สมพงษ์ ตุ่มสวัสดิ์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ผู้แนะนำ และให้แนวคิดใหม่ สำหรับการทำงานทางด้านการวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] G. W. Roberts and A. S. Sedra, "All-current-mode frequency selective circuits," *Electronic Letters*, Vol. 25, pp. 759-761, 1989.
- [2] C. M. Chang, "Universal active current filter with single input and three output using CCII's," *Electronics Letters*, Vol.29, pp.1932-1933, 1993.
- [3] S. I. Liu, J. J. Chen, Y. S. Hwang, "New Current mode Biquad filters using current follower," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 42, pp.380-383, July 1995.

- [4] E. O. Gunes, A Toker and S. Ozoguz, "Insensitive current-mode universal filter with minimum component using dual-output current conveyors," *Electron. Lett.*, vol. 35, pp.524-525, April 1999.
- [5] C. Chang, "New multifunction OTA-C biquads," *IEEE Trans. Circuits and Syst.*, vol. 46, pp.820-824, June 1999.
- [6] C. Chang and S. Pai, "Universal current-mode OTA-C biquad with the minimum components," *IEEE Trans. Circuits and Syst.*, vol. 47, pp.1235-1238, Aug. 2000.
- [7] C. Chang, B. M. Al-Hashimi and J. N. Ross, "Unified active filter biquad structure," *IEE Proc. (part G)*, vol.151, pp.273-277, Aug. 2004.
- [8] J. Wu, "Current-mode high-order OTA-C filter," *Int. J. Electron.*, vol. 76, pp.1115-1120, 1994.
- [9] M. T Abuelma'atti and A Bentrchia, "New universal current-mode multiple-input multiple-output OTA-C filter," *Proc. of APCCAS*, pp.1037-1039, Dec. 2004
- [10] E. Sanchez-sinnencio, R. L Geiger and H. Nevarez-Lozano, "Generation of Continuous-Time Two Integrator Loop OTA filter structures," *IEEE Trans. Circuits and Syst.*, vol. 35, pp.936-946, Aug. 1988.
- [11] P.E. Allen and D.R. Holberg, "CMOS Analog circuit design," Holt Rinehart and Winston, Inc., 1987.
- [12] W. J. Kerwin, L. P. Huelsman, and R. W. Newcomb, "State-variable synthesis for insensitive integrated circuit transfer function," *IEEE Trans. Solid-state Circuits*, vol. SC-2, pp.87-92, 1967.