

# วงจรรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งอย่างง่ายที่สามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์

## An Electronically Tunable First-order All-pass Filter with Simple Configuration

อนูรี หล่อสวัสดิ์ศิริ<sup>1</sup> และ วินัย ศิลารวม<sup>2</sup>

สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร<sup>1,2</sup>

E-mail: anuree@mut.ac.th<sup>1</sup>, vinai@mut.ac.th<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งในโหมดกระแสโดยใช้ตัวทรานสคอนดักเตอร์แบบเอาต์พุตคู่เพียง 1 ตัวและตัวเก็บประจุ 1 ตัวเท่านั้น ซึ่งวงจรมีข้อดีคือ โครงสร้างวงจรรียบง่ายและสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของวงจรมีได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการทำงานของวงจรมีที่นำเสนอและการประยุกต์ใช้งานในวงจรออสซิลเลเตอร์แบบเลื่อนเฟส ยืนยันได้จากผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม SPICE ซึ่งใช้แบบจำลองของทรานซิสเตอร์แบบซีมอส 0.18  $\mu\text{m}$  TSMC ด้วยไฟเลี้ยงของวงจรมี  $\pm 0.75$  V

**คำสำคัญ:** วงจรรองผ่านทุกความถี่, ตัวทรานสคอนดักเตอร์, การปรับค่าทางอิเล็กทรอนิกส์, ออสซิลเลเตอร์

### Abstract

This paper describes a current-mode first order all-pass filter using a dual output transconductor and only one capacitor. The key feature of the proposed circuit is a simple structure and electronic tunability of its parameter. To confirm the theory, the proposed all-pass filter and its application of phase shift oscillator are

simulated using 0.18  $\mu\text{m}$  TSMC CMOS transistor technology with  $\pm 0.75$  V power supply.

**Keywords:** All-pass filter, Transconductor, Electronic tuning, Oscillator

### 1. บทนำ

วงจรรองผ่านทุกความถี่หรือบางที่เรียกว่า วงจรเลื่อนเฟสนั้น นับเป็นวงจรมีที่สำคัญอย่างหนึ่งในการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานประมวลผลสัญญาณได้หลากหลาย อาทิเช่น วงจรออสซิลเลเตอร์ ระบบสื่อสาร ระบบควบคุม ระบบเครื่องมือวัด และระบบประมวลผลสัญญาณเสียง เป็นต้น รวมถึงใช้เป็นวงจรมีกำหนดความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์อีกด้วย [1]

จากการสืบค้นผลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีการนำเสนอวงจรรองผ่านทุกความถี่บนพื้นฐานของอุปกรณ์แบบแอคทีฟ (active building block: ABB) พหุสมมาตร อาทิเช่น วงจรขยายค่าความนำที่ส่งผ่านกระแส (operational transconductance amplifier: OTA) [2-6, 8] วงจรสายพานกระแสรุ่นที่ 2 แบบผลต่างแรงดัน (fully differential second-generation current conveyor: FDCCII) [7] และตัวทรานสคอนดักเตอร์แบบลบและแบบบวก (negative

transconductor : NT and positive transconductor : PT) [9] เป็นต้น ในตารางที่ 1 ได้เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรที่ได้นำเสนอมาก่อนหน้านี้กับวงจรในบทความนี้ด้วย อย่างไรก็ตาม วงจรกรองผ่านทุกความถี่เหล่านี้ก็มีข้อที่ควรปรับปรุง คือ

- 1) ใช้อุปกรณ์ ABB ที่มีจำนวนทรานซิสเตอร์มากเกินไป [2-9]
- 2) ใช้ตัวต้านทานภายนอก [3-5, 9]
- 3) ไม่มีการปรับพารามิเตอร์ของวงจรด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ [7] ทำให้ไม่สะดวกในการใช้งาน

จากข้อ 1 หากจำนวนทรานซิสเตอร์จำนวนมาก ก็ทำให้ใช้พื้นที่ในการออกแบบวงจรรวมเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบวงจรกรองผ่านทุกความถี่

ลำดับเอกสารอ้างอิง	อุปกรณ์ ABB/จำนวนทรานซิสเตอร์	จำนวนอุปกรณ์ R+C	การปรับทางอิเล็กทรอนิกส์	แรงดันไฟเลี้ยง
[2]	2 OTAs, 1 OA (30)	0+0	ใช่	-
[3]	1 OTA (8)	1+2	ใช่	-
[4]	2 OTAs (16)	1+1	ใช่	-
[5]	1 OTA, 1 OA (24)	1+2	ใช่	±5 V
[6]	2 OTAs (22)	0+1	ใช่	-
[7]	1 FDCCII (27)	0+1	ไม่	±1.25 V
[8]	2 OTAs (27)	0+1	ใช่	±1 V
[9]	2 NTs, 2 PTs (12)	2+1	ใช่	0.7 V
วงจรมำเสนอ	2 TCs (8)	0+1	ใช่	±0.75V

## 2. วงจรที่นำเสนอ

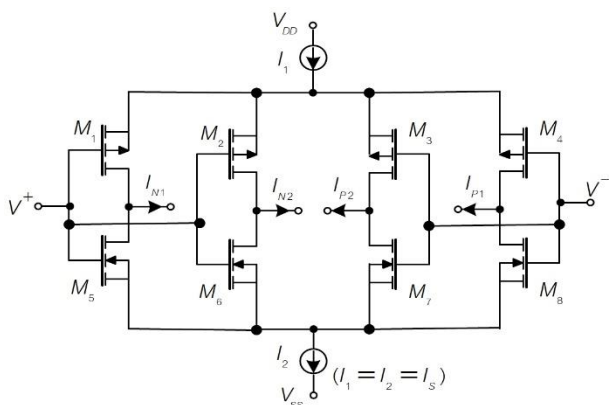
ในส่วนแรกนี้ จะกล่าวถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวทรานสดักเตอร์ก่อน ซึ่งวงจรถอดคอดักเตอร์แบบเอาต์พุตคู่ได้แสดงดังในรูปที่ 1 (ก) และมี

และข้อ 2 นั้นจะทำให้โครงสร้างของวงจรมีความซับซ้อน เพื่อปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าวข้างต้น วงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งจึงถูกนำเสนอในบทความนี้ซึ่งวงจรมำเสนอประกอบด้วยตัวทรานสดักคอดักเตอร์ (transconductor: TC) เพียง 1 ตัวต่อร่วมกับตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวเท่านั้น โดยปราศจากตัวต้านทานภายนอก จึงทำให้วงจรที่นำเสนอมีโครงสร้างเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ ยังสามารถปรับพารามิเตอร์ของวงจรด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ได้อีกด้วย การจำลองการทำงานของวงจรที่นำเสนอด้วยโปรแกรม SPICE ก็ยืนยันการทำงานได้ด้วยดี

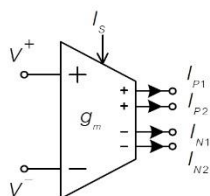
สัญลักษณ์ดังรูปที่ 1 (ข) [10] ซึ่งวงจรถอดคอดักด้วยทรานซิสเตอร์แบบซีมอส (CMOS) 8 ตัว เมื่อกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวทำงานในย่านอิมิตัวและมีค่า

ทรานส์คอนดักแตนซ์เท่ากัน จะได้สมการของกระแสเอาต์พุตของตัวทรานส์คอนดักเตอร์เป็น

$$I_{P1} = I_{P2} = -I_{N1} = -I_{N2} = g_m (V^+ - V^-) \quad (1)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ตัวทรานส์คอนดักเตอร์อย่างง่าย

(ก) วงจร (ข) สัญลักษณ์

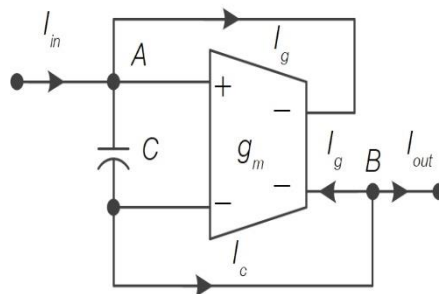
โดยที่  $g_m$  เป็นค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของตัวคอนดักเตอร์ ซึ่งมีสมการเป็น

$$g_m = \left( -\frac{\mu_0 C_{ox}}{2} \frac{W}{L} \frac{1}{I_s} \right)^2, \quad (2)$$

โดยที่  $\mu_0$ ,  $C_{ox}$  และ  $W/L$  เป็นพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์แบบซีมอส ส่วน  $I_s$  คือ ค่ากระแสไบอัสของตัวทรานส์คอนดักเตอร์

สำหรับวงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งในโหมดกระแสที่นำเสนอนี้ได้แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยกันระหว่างตัวทรานส์คอนดักแตนซ์และ

ตัวเก็บประจุอย่างละ 1 ตัว เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรจะได้ว่า



รูปที่ 2 วงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่นำเสนอนี้

$$I_{in} = I_c + I_g \quad (2)$$

$$I_{out} = I_c - I_g \quad (3)$$

เนื่องจาก  $I_g = g_m V_{AB}$  เมื่อแทนลงในสมการ (2) และ (3) แล้วจัดสมการใหม่ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งในโหมดกระแสเป็น

$$H(s) = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{sC/g_m - 1}{sC/g_m + 1} \quad (4)$$

ซึ่งจะมีขนาดและเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรที่นำเสนอนี้เป็น

$$|H(j\omega)| = 1 \quad (5)$$

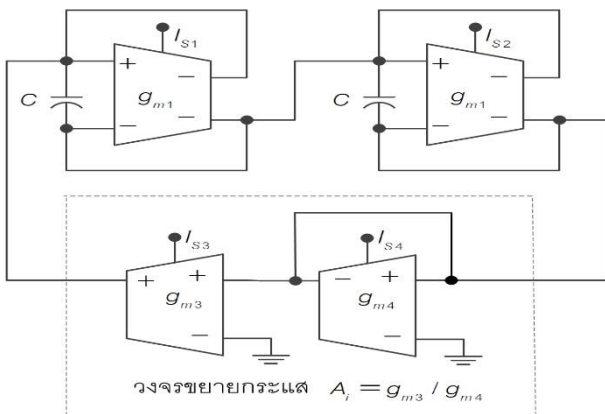
$$\angle H(j\omega) = \pi - 2 \tan^{-1}(\omega C/g_m) \quad (6)$$

จากสมการ (6) เห็นได้ว่า เมื่อมีสัญญาณอินพุตป้อนให้วงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่นำเสนอนี้ จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดการเลื่อนเฟสได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการเปลี่ยนค่า  $g_m$  ด้วยการปรับกระแสไบอัส  $I_s$  ของตัวทรานส์คอนดักเตอร์นั่นเอง

### 3. การประยุกต์ใช้งานกับวงจรรออสซิลเลเตอร์

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานของ วงจรรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งที่ได้นำเสนอใน หัวข้อที่ 2 มาประกอบเป็นวงจรรออสซิลเลเตอร์ดังแสดง ในรูปที่ 3 ซึ่งมีวงจรรองผ่านทุกความถี่ทำหน้าที่เป็น วงจรเลื่อนเฟส 2 วงจรต่อร่วมกับวงจรขยายกระแส 1 วงจร เป็นที่ทราบกันดีว่า วงจรรออสซิลเลเตอร์จะเกิด การออสซิลเลตได้นั้นอัตราขยายแบบเปิดของวงจร ต้องมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อกำหนดให้  $I_{S1} = I_{S2} = I_S$  นั่นคือ จะได้เงื่อนไขการออสซิลเลตของวงจรในรูปที่ 3 เป็น

$$A_f \left( \frac{sC/g_m - 1}{sC/g_m + 1} \right)^2 = 1 \quad (7)$$



รูปที่ 3 วงจรรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้วงจรรองผ่านทุกความถี่

โดยที่  $A_f$  คือ อัตราขยายของวงจรขยายกระแส เมื่อ แทนค่า  $s = j\omega$  ด้วยเงื่อนไขการออสซิลเลต จะได้ว่า  $A_f = 1$  โดยมีความถี่ของการออสซิลเลตเป็น

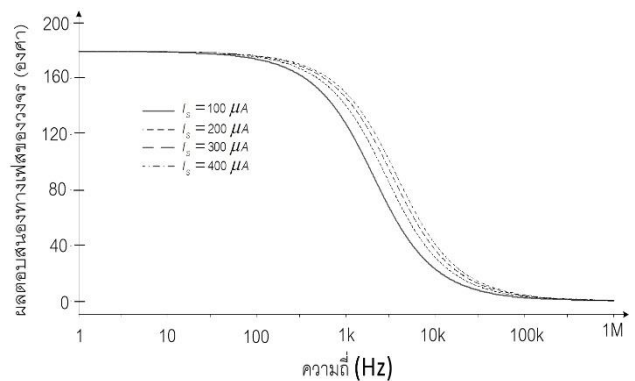
$$f_{osc} = \frac{g_m}{2\pi C} \quad (8)$$

นั่นคือ ความถี่ของการออสซิลเลตก็สามารถปรับค่าได้ ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการปรับกระแส ไบอัสของตัวทรานซิสคอนดักเตอร์เช่นเดียวกัน

### 4. การทดลองและผล

เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรรองผ่านทุก ความถี่ที่ได้นำเสนอรวมถึงวงจรรออสซิลเลเตอร์ที่ กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมาด้วย ในหัวข้อนี้ จะทำการ จำลองการทำงานของวงจรเหล่านี้ด้วยโปรแกรม SPICE ซึ่งทรานซิสเตอร์แบบซีมอสของตัวทรานซิสคอน ดักเตอร์จะใช้เทคโนโลยี 0.18  $\mu\text{m}$  TSMC และไฟเลี้ยง  $\pm 0.75\text{V}$  [11] โดยทรานซิสเตอร์ทุกตัวเลือกใช้  $L = 0.54 \mu\text{m}$  และส่วนทรานซิสเตอร์แบบพีมอส (PMOS) และแบบเอ็นมอส (NMOS) เลือก  $W = 9 \mu\text{m}$  และ  $W = 3.6 \mu\text{m}$  ตามลำดับ

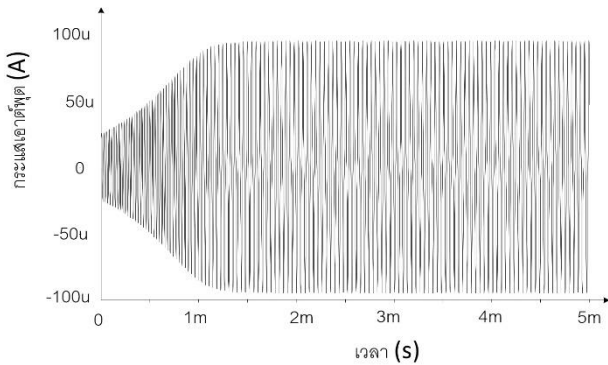
จากวงจรรองที่นำเสนอในรูปที่ 2 เมื่อ กำหนดให้ตัวเก็บประจุ  $C = 20 \text{ nF}$  และกระแสไบอัส เป็น  $100 \mu\text{A}$ ,  $200 \mu\text{A}$ ,  $300 \mu\text{A}$  และ  $400 \mu\text{A}$  จะได้ ผลตอบสนองเชิงความถี่ของเฟสของวงจรแสดงดังใน รูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าเฟสมีการเลื่อนตามการปรับ กระแสไบอัสของวงจรรานซิสคอนดักเตอร์ในช่วง 180 องศาถึง 0 องศา เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น



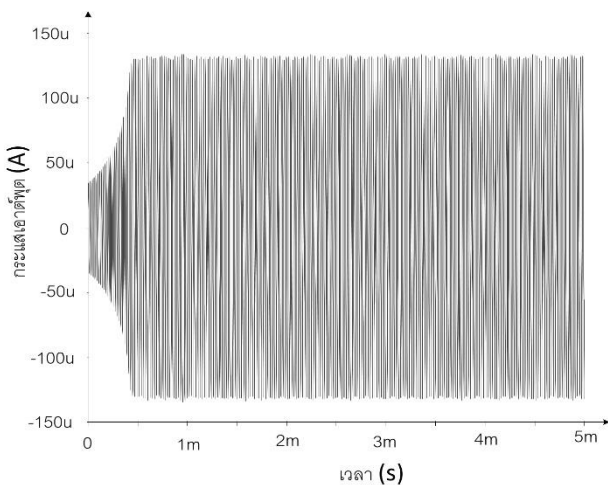
รูปที่ 4 ผลตอบสนองเชิงความถี่ทางเฟสของวงจรที่นำเสนอ

สำหรับการทดสอบการทำงานของวงจรรอ ออสซิลเลเตอร์ในรูปที่ 3 เมื่อกำหนดตัวเก็บประจุเป็น  $1 \text{ nF}$  และ  $I_{S3} = I_{S4} = 100 \mu\text{A}$  โดยเลือก  $I_{S1} = I_{S2} = I_S = 100 \mu\text{A}$  (ความถี่ 22.60 kHz) จะได้สัญญาณ

เอาต์พุตดังรูปที่ 5 และเมื่อเปลี่ยน  $I_{S1} = I_{S2} = I_S = 200 \mu A$  จะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีความถี่ 45.33 kHz ดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า วงจรออสซิลเลเตอร์ในรูปที่ 3 สามารถปรับค่าความถี่ได้ตามต้องการด้วยการปรับกระแสไบอัสของตัวทรานส์คอนดักเตอร์



รูปที่ 5 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อ  $I_S = 100 \mu A$



รูปที่ 6 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อ  $I_S = 200 \mu A$

## 5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งซึ่งประกอบด้วยตัวทรานส์คอนดักเตอร์แบบเอาต์พุตคู่ 1 ตัวต่อร่วมกับตัวเก็บประจุอีก 1 ตัวเท่านั้นโดยไม่ใช้ตัวต้านทานภายนอกเลย จึงทำให้วงจรที่นำเสนอมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ คือ มีโครงสร้างเรียบง่ายไม่ซับซ้อนและสามารถปรับค่าพารามิเตอร์

ของวงจรด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงยังใช้ไฟเลี้ยงของวงจรต่ำอีกด้วย การจำลองการทำงานของวงจรกรองที่นำเสนอและการประยุกต์ใช้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ด้วยโปรแกรม SPICE พบว่า ให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎีด้วยดี นอกจากนี้ ในส่วนของตัวทรานส์คอนดักเตอร์อาจเพิ่มวงจรสะท้อนกระแส เพื่อความสะดวกในการปรับกระแสไบอัสได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Bolek D., Senani R., Biolkova V., and Kolka Z., "Active elements for analog signal processing: classification, review, and new proposals," *Radioengineering*, vol. 17, pp. 15-32, 2008.
- [2] Jantakun A. and Jaikla W., "Active-only current-mode first-order allpass filter and its application in quadrature oscillator," *Indian J. Pure Appl. Phys.*; 53, 557-63, 2015.
- [3] Bhanja M. and Ray B., "A hierarchical and programmable OTA-C filter," In: *Proceedings of the IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI 2017)*, Bochum, Germany, pp. 513-8, 2017.
- [4] Jaikla W., Talabthong P., Siripongdee P., Supavarasuwat P., Suwanjan P. and Chaichana A., "Electronically controlled voltage mode first order multifunction filter using low-voltage low-power bulk-driven

- OTAs,” *Microelectron. J.*; 91, pp. 22-35, 2019.
- [5] Chaichana A., Siripongdee S. and Jaikla W., “Electronically adjustable voltage-mode first-order allpass filter using single commercially available IC,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 559, 2019: 012009.
- [6] Singh G., “CMOS realization of VDVTa and OTA based fully electronically tunable first order all pass filter with optimum linearity at low supply voltage  $\pm 0.85$  V,” *Circ. Syst.*; 11, 39-49, 2020.
- [7] Mohan J. and Chaturved B., “CMOS realizable and highly cascable structures of first-order all-pass filters,” *Walailak J. Sci. Tech.*, vol. 18, no. 14, pp.1-19, 2021:21451.
- [8] Chaturvedi B., Mohan J. and Gupta S. N., “First order mixed mode MOS-C all-pass frequency selective analog network with electronic tuning,” *Trens Sci.*, vol. 19, no. 13, pp.1-18, 2022:4616.
- [9] Masud M. I. and Khan I. A., “CNTFET Based Fully Differential First Order All Pass Filter,” *Computer Systems Science&Engineering*, vol. 44, no. 3, pp. 2425-2438, 2023.
- [10] Arbel A. F. and Goldminz L. “Output stage for current-mode feedback amplifiers, theory and applications” *Analog Integrated Circuit and Signal Processing*, 1992, Vol.2, No. 3, pp. 243-255.
- [11] The MOSIS Service, USA. Wafer electrical test data and SPICE model parameter. 4 pages. [Online] Cited 2012-01-31. Available at: <http://www.mosis.org/test/>.