

วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมอดูเลชันนำแบบสมดุล
และปรับค่าความถี่ด้วยกระแส

A Fully-Balanced Current-Tunable Phase-Lead All-Pass Filter

ภูมินทร์ สุวรรณธาดา¹ ณัฐวุฒิ สุวรรณธา² และ วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล^{3*}

¹นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ²อาจารย์ ³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมอดูเลชันนำ วงจรจะนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ โดยที่สถาปัตยกรรมของวงจรไม่สลับซับซ้อน และ สมดุลด้วยสัญญาณความแตกต่าง วงจรประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN เพียง 6 ตัว และตัวเก็บประจุอีกหนึ่งตัว โดยปราศจากตัวต้านทานภายนอกและเงื่อนไขในการสมดุลกันของอุปกรณ์ ทำให้เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวม จากผลการจำลอง ความถี่จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่ากระแส เมื่อกระแสมีค่ามากขึ้นจะส่งผลต่อความถี่ให้มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน ความถี่จะมีความสัมพันธ์กับค่าความจุของตัวเก็บประจุ ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ และความถี่สูงสุด 250 MHz

Abstract

A new integrable fully-balanced current-tunable in phase-lead all-pass filter is presented. The architecture of the circuit is relatively simple and symmetry with differential signals consisting of merely 6 NPN Bipolar transistors. Without external resistors and matching condition, the proposed circuit is very appropriate to further develop into an integrated circuit. Simulation results shown that: frequency is a function of bias current- the increasing currents effect the higher frequency, frequency is a function of capacitance, low-power-consumption and the maximum useful frequency of 250 MHz

คำสำคัญ : ปรับความถี่ด้วยกระแส สมดุล วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด

Keywords : Current-tunable, Fully balanced, All-Pass Filter

*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ wor_nui@yahoo.com โทร. 08 6851 4433

1. บทนำ

วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด (All Pass Filter, APF) คือ วงจรที่ใช้กรองสัญญาณผ่านทุกความถี่ โดยสัญญาณที่ผ่านจะมีขนาดเท่ากับสัญญาณอินพุตแต่มีเฟสแตกต่างจากสัญญาณอินพุต 90 องศา ด้วยคุณลักษณะดังกล่าวจึงถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในวงจรต่างๆ ทั้งในระบบไฟฟ้าสื่อสารและอิเล็กทรอนิกส์ ยกตัวอย่างเช่น วงจรมอดูเลต (ประกาศิต และคณะ, 2554) และวงจรเฟสล็อกลูป (Phase Lock Loop) (อิศราวุธ และคณะ, 2544) เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดนิยมพัฒนาโดยใช้ออปแอมป์ [xx-xx] และทรานซิสเตอร์ [xx-xx] ซึ่งวงจรกรองความถี่ผ่านทั้งหมดที่ถูกพัฒนาโดยออปแอมป์จะใช้อุปกรณ์จำนวนมากและใช้กำลังไฟฟ้าสูง ขณะที่วงจรกรองความถี่ผ่านทั้งหมดที่ถูกพัฒนาโดยทรานซิสเตอร์เป็นการพัฒนาเพื่อแก้ไขการใช้พลังงานจำนวนมากและการใช้กำลังไฟฟ้าสูงของออปแอมป์ อย่างไรก็ตามการใช้ทรานซิสเตอร์แบบไม่สมดุลส่งผลต่อการเกิดสัญญาณรบกวนสูง ต่อมาได้มีการพัฒนาโดยการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านทั้งหมดที่โดยทรานซิสเตอร์แบบสมดุลเพื่อลดสัญญาณรบกวนดังกล่าว และสามารถปรับความถี่ด้วยกระแส แต่ยังคงใช้กำลังไฟฟ้าสูงเนื่องจากมีจำนวนทรานซิสเตอร์ที่มาก

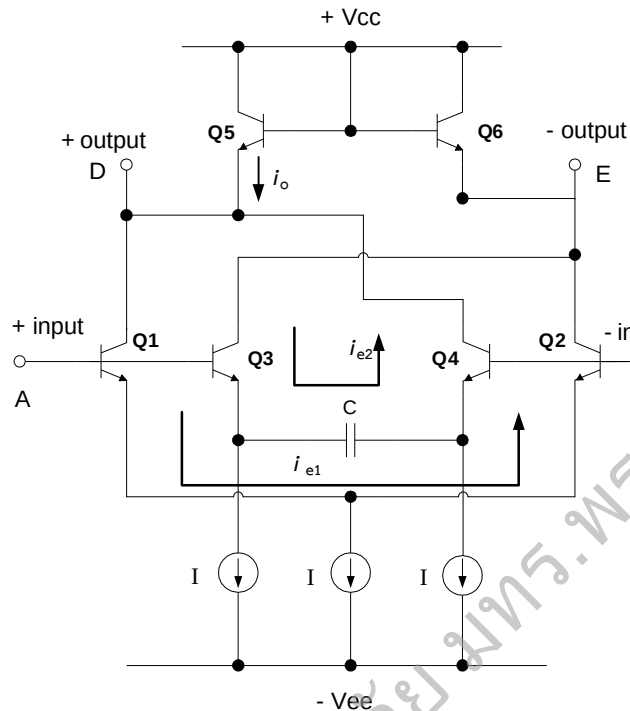
บทความนี้จึงนำเสนอวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมุมมองด้านแบบสมดุลและปรับค่าความถี่ด้วยกระแส โดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบโพลาร์ NPN มีจำนวนทรานซิสเตอร์น้อยเพื่อลดการใช้กำลังไฟฟ้า และวงจรต่อแบบสมดุลเพื่อลดสัญญาณรบกวน

2. วิธีการทดลอง

2.1 วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด

วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมุมมองด้านแบบสมดุลและปรับค่าความถี่ด้วยกระแสโดยใช้ทรานซิสเตอร์จำนวน 6 ตัว แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย วงจรทรานคอนดักแตนซ์ชุดที่ 1 (Q1 และ Q2) วงจรทรานคอนดักแตนซ์ชุดที่ 2 (Q3 และ Q4) และภาระโหลด (Q5 และ Q6) จากรูปที่ 1 วงจรทรานคอนดักแตนซ์ชุดที่ 1 รับสัญญาณแรงดัน v_{in} ที่โหนด A และ B ส่งผลให้เกิดกระแสอิมิตเตอร์ i_{e1} ไหลจากขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1 ไปยังขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q2 และส่งผลให้กระแสคอลเลคเตอร์ i_{c1} ไหลจากโหนด E ไปยังโหนด D ขณะที่สัญญาณแรงดัน v_{in} ที่โหนด A และ B ส่งผลให้เกิดกระแสอิมิตเตอร์ i_{e2} ไหลจากขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q3 ไปยังขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q4 เช่นกัน และส่งผลให้กระแสคอลเลคเตอร์ i_{c2} ไหลจากโหนด D ไปยังโหนด E สัญญาณเอาพุต v_o เกิดจากการหักล้างกันของกระแสคอลเลคเตอร์ i_{c1} และ i_{c2} แล้วไหลผ่านโหลดจากโหนด D ไปยังโหนด E

กำหนดให้ ค่าความต้านทานอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ของ Q1 ถึง Q2 มีค่าเท่ากับ $r_e = r_{e1} = r_{e2} = 2V_T / I$ เมื่อ r_{e1} และ r_{e2} คือ ค่าความต้านทานอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1 ถึง Q2 และ $V_T = 0.025V$ คือ แรงดันเนื่องจากความร้อน (thermal voltage) ที่อุณหภูมิห้อง และ $r_e' = r_{e3} = r_{e4} = V_T / I = r_e / 2$ เมื่อ r_{e3} และ r_{e4} คือ ค่าความต้านทานอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1 ถึง Q2 ขณะที่ $r_e'' = r_{e5} = r_{e6} = V_T / (3I / 2) = 2r_e / 3$ คือ ค่าความต้านทานอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q5 และ Q6 จากรูปที่ 1 กระแสอิมิตเตอร์ i_{e1} มีค่าเท่ากับ $i_{e1} = v_{in} / 2r_e$ และกระแสอิมิตเตอร์ i_{e2} มีค่าเท่ากับ $i_{e2} = v_{in} / (2r_e' + 1/sC) = v_{in} / (r_e + 1/sC)$ เมื่อ $i_{c1} \approx i_{e1}$, $i_{c1} \approx i_{e1}$ ที่โหนด D กระแสเอาพุต $i_o = i_{e1} - i_{e2} \approx i_{c1} - i_{c2}$ ดังนั้น



รูปที่ 1 วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด

$$i_o = \frac{1}{2r_e} \frac{(1-st)}{(1+st)} v_{in} \quad (1)$$

เมื่อ $t = r_e C$ และกระแส i_o ไหลผ่านภาระโหลด $z = 2r_e'' = 4r_e / 3$ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุต v_o ที่โหนด D และ E มีค่าเท่ากับ

$$v_o = i_o \frac{4r_e}{3} \quad (2)$$

แทนค่า i_o ในสมการที่ (1) ลงในสมการที่ (2) จะได้

$$\frac{v_o}{v_{in}} = \frac{2(1-st)}{3(1+st)} \quad (3)$$

จากสมการที่ 3 จะเห็นว่าเมื่อแทนค่า $s = j\omega$ และ $\omega = 1/t$

$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| = \frac{2}{3} \quad \text{และ} \quad \phi = 90^\circ \quad (4)$$

เมื่อ $\omega = 1/t$ ดังนั้น

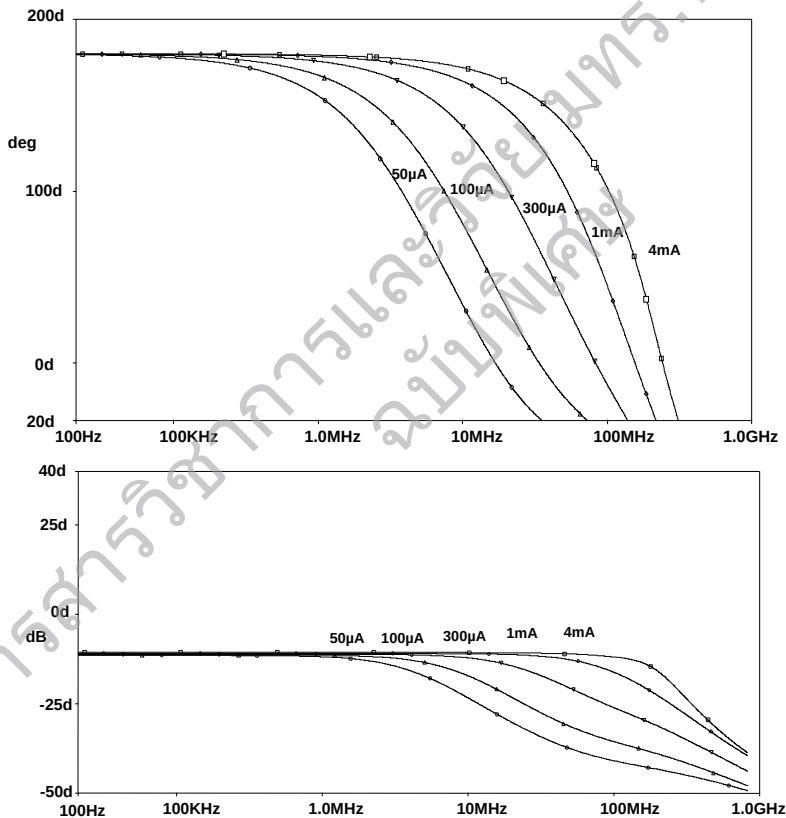
$$\omega = \frac{I}{V_T C} \quad (5)$$

จากสมการที่ 5 จะเห็นว่าความถี่สามารถปรับได้ด้วยกระแส I

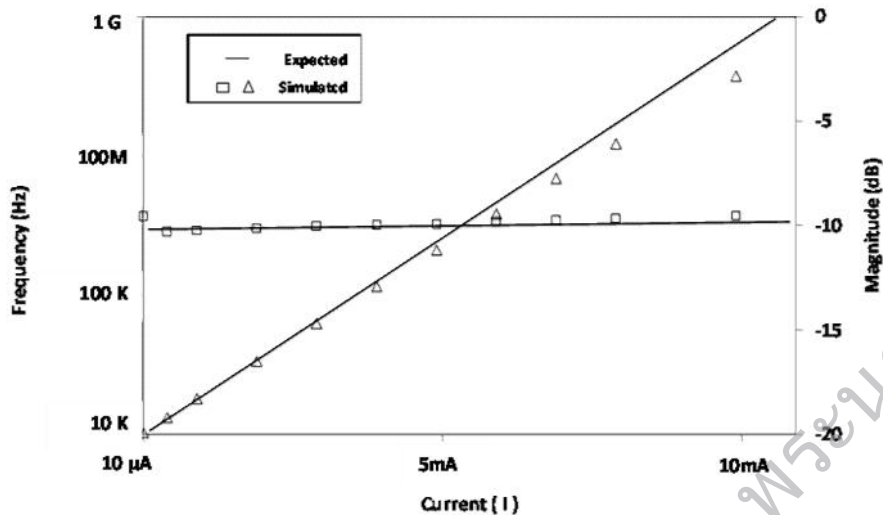
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการจำลอง

การจำลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมอดูลานาดังรูปที่ 1 ใช้แบบจำลองของทรานซิสเตอร์ NPN Q2N2222A ที่มีความถี่ f_T ที่ 300 MHz (Couch II, 1997) และ ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ $0.01\mu\text{F}$ โดยการจำลองด้วยโปรแกรม SPICE ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการป้อนข้อมูลของวงจรและโนด เช่น พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง รวมถึงคำสั่งการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจร ในแฟ้มข้อมูล ขั้นตอนการวิเคราะห์ห้วงจรโดยการเรียกแฟ้มข้อมูลในขั้นตอนแรก และขั้นตอนสุดท้ายการแสดงผลด้วยโพรบ ซึ่งผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรโดยการจำลองวงจร แสดงดังรูปที่ 2 เมื่อกระแส (I) มีค่าเท่ากับ $50\mu\text{A}$, $100\mu\text{A}$, $300\mu\text{A}$, 1mA และ 4mA พบว่า ที่มุม 90 องศา และขนาดของอัตราขยายจะมีค่าคงที่ จะมีค่าความถี่ในการใช้งาน 3 MHz, 6 MHz, 18 MHz, 60 MHz และ 240 MHz ตามลำดับ

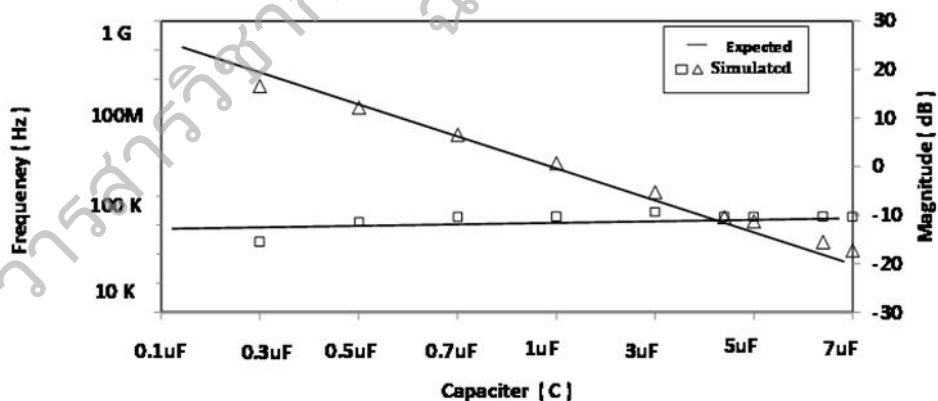


รูปที่ 2 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด โดย $C=0.01\text{ uF}$



รูปที่ 3 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด เมื่อกำหนดให้ $C = 10$ pF

จากรูปที่ 3 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสที่ส่งผลต่อมุมและความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด ซึ่งพบว่า ผลการจำลองที่ได้จากการจำลองวงจร (Simulated) ได้มุมและความถี่ที่มุม 90 องศา มีค่าใกล้เคียงกับการแทนค่าในสมการที่ 4 (Expected) เมื่อค่ากระแสเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ $10 \mu\text{A}$ ถึง 10 mA และกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุมีค่าคงที่ $C = 10$ pF พบว่า มีอัตราการขยายมีค่าคงที่และที่มุม 90 องศา ความถี่จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่ากระแสเมื่อกระแสมีค่ามากขึ้นจะส่งผลต่อความถี่มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน และความสัมพันธ์เชิงเส้นจะเปลี่ยนไปเมื่อกระแสมีค่ามากกว่า 10 mA หรือความถี่สูงสุด 240 MHz



รูปที่ 4 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด กำหนดให้ $I = 200 \mu\text{A}$

จากรูปที่ 4 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ส่งผลต่ออัตราการขยายและความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด ซึ่งพบว่า ผลการจำลองที่ได้จากการจำลองวงจร (Simulated) ได้อัตราการขยาย (Magnitude) และความถี่ที่มุม 90 องศา มีค่าใกล้เคียงกับการแทนค่าในสมการที่ 4 (Expected) เมื่อค่าความจุของตัว

เก็บประจุมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ $0.1 \mu\text{F}$ ถึง $7 \mu\text{F}$ และกำหนดให้กระแส (I) ค่าคงที่ $I = 200 \mu\text{A}$ พบว่า ที่อัตราการขยายมีค่าคงที่ และที่มุม 90 องศา ความถี่จะมีความสัมพันธ์กับค่าความจุของตัวเก็บประจุ เมื่อค่าความจุของตัวเก็บประจุมีค่าลดลงจะส่งผลต่อความถี่มีค่าสูงขึ้น และความถี่จะเปลี่ยนไปเมื่อค่าความจุของตัวเก็บประจุน้อยกว่า $0.1 \mu\text{F}$ ที่ความถี่สูงสุด 250 MHz

4. สรุป

วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมอดมอดนำที่นำเสนอเป็นวงจรแบบสมมูล และปรับความถี่ด้วยกระแส วงจรนี้ประกอบด้วย วงจรทรานคอนดักแทนซ์จำนวน 2 วงจร และภาระโหลดที่มีตัวเก็บประจุเป็นส่วนประกอบ สามารถปรับความถี่ด้วยกระแสของทรานคอนดักแทนซ์ ความถี่จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่ากระแสเมื่อกระแสมีค่ามากขึ้นจะส่งผลต่อความถี่ให้ค่าสูงขึ้นเช่นกัน ความถี่จะมีความสัมพันธ์กับค่าความจุของตัวเก็บประจุ และใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ ที่อัตราการขยายคงที่และที่มุม 90 องศา ที่ความถี่สูงสุด 250 MHz

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การส่งเสริมและสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วง

6. เอกสารอ้างอิง

- ประกาศิต ปราบพาล, วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล และอนันต์ ฮอร์โสณ. 2555. วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมอดมอดตามแบบสมมูล และปรับค่าความถี่ได้กว้างโดยการปรับค่ากระแส.วารสารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า. ปีที่ 3 (ฉบับที่ 2).
- อิศราวุธ สีดาตาน, วัลลภ สุระกำพลธร และบันลือ ศรีสุขนวงศ์. 2544. วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมอดมอดนำ วงจรมีความสมมาตรและสามารถปรับความถี่ได้กว้างโดยการปรับค่ากระแส. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. (ฉบับที่ 1): 31-41.
- Comer, D.T., Comer, D.J and Gonzalez, J.R. 1999. A Hight-Frequency Integrable Bandpass Filter Configuration. IEEE Trans. On Circuit a Systems-II: Analog and Digital Signal Processing, Volume 44, No.10, 1999: 856-861.
- Donald A. Bell. 2001. Operational Amplifiers Application: Troubleshooting and Design, 2nd edition., McGraw-Hill Higher: New Yoke.
- K. Bult and H. Wallinga. 1988. A CMOS analog continuous-time delay line with adaptive delay- time control. IEEE Journal of solid-state circuits, volume 23, No. 3, June 1988.
- L. W. Couch II. 1997. Digital and analog communication system: Chapter 5, 5th edition., Prentice hall: New York.
- Srisuchinwong Banlue. 1997. A Fully-Balanced Wide-Frequency Current-Tunable All-Pass Filter. ICICS, 1997: 1732-1736.
- Tay,E.W. and Murti, V.G.K. Unity-gain frequency-independent quadature phase shifter. Electron.Lett, 20.1984.
- Viewspice User's Manual, Workview PLUS on Windows, Viewlogic qystems, 1993.