

วงจรเลื่อนเฟสสัญญาณรูปคลื่นซายน์ โหมดแรงดันชนิดมีมุมมองตามแบบสมมูล และปรับค่าความถี่ได้กว้างโดยการปรับค่ากระแส

บุญฤทธิ์ วาจนสุนทร, วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล และอภิรักษ์ อูร์โสภณ
คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, ถนนกัณฑ์วิชัย,
จังหวัดมหาสารคาม 44150, e-mail: wor_nui@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอหลักการออกแบบวงจรเลื่อนเฟสสัญญาณแรงดันรูปคลื่นซายน์แบบล้ำหลัง โดยเป็นสถาปัตยกรรมของวงจรไม่สลับซับซ้อนแบบสมมูล และสมมาตรด้วยสัญญาณความแตกต่างขนาดเล็ก จุดเด่นของวงจรคือ สามารถปรับค่ามุมต่างเฟสที่ต้องการเลื่อนด้วยการปรับค่ากระแส ไบแอสโดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์เพียงหกตัว ต่อร่วมกับวงจรเลือกสัญญาณ และตัวเก็บประจุอีกหนึ่งตัว โดยปราศจากตัวต้านทานภายนอกและเงื่อนไขในการสมพจน์กันของอุปกรณ์ ทำให้เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวม โดยสมรรถนะการทำงานของวงจรที่นำเสนอนี้สามารถยืนยันผลได้ด้วยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE สามารถทำการเลื่อนเฟสสัญญาณซายน์ได้ความถี่สูงถึงระดับ 220 MHz โดยที่ยังรักษาระดับของสัญญาณใกล้เคียงอุดมคติคือเท่ากับสัญญาณอินพุต

คำสำคัญ : วงจรเลื่อนเฟส, แบบสมมูล, ปรับมุมต่างเฟสด้วยกระแส

1. บทนำ

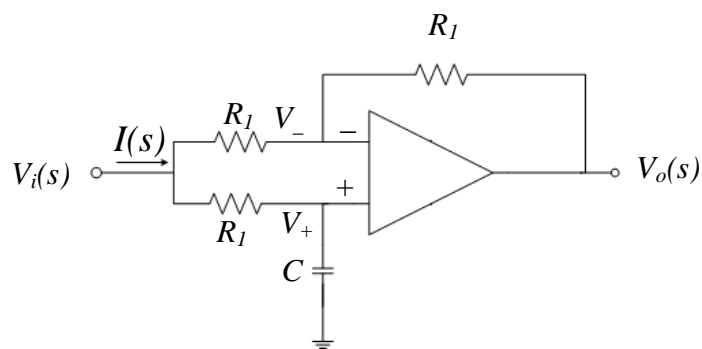
ในปัจจุบันการวิจัยและพัฒนาวงจรที่มีการประมวลสัญญาณทางด้านแอนะล็อกจะมีความสำคัญน้อยลง และมุ่งเน้นไปทำวิจัยที่เกี่ยวกับวงจรที่มีการประมวลผลสัญญาณทางด้านดิจิทัล แต่ในทางเป็นจริงแล้ว สัญญาณทางด้านแอนะล็อกมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เช่น วงจรกรองความถี่ วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล โดยการวิจัยและพัฒนาทุกสาขาจะมีแนวโน้มให้วงจรมีขนาดเล็กลง ประสิทธิภาพสูงขึ้น และสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากกับการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ชนิดพกพา วงจรเลื่อนเฟส (Phase Shifting Circuit) หรือวงจรกรองผ่านทุกความถี่ (All Pass filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่ยอมให้ทุกความถี่ผ่าน โดยขนาดของสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตจะมีขนาดเท่ากัน แต่สามารถที่จะเลื่อนเฟสให้สัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตต่างกัน วงจรเลื่อนเฟสเป็นวงจรที่นำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรอื่นๆ ในระบบไฟฟ้าสื่อสารและอิเล็กทรอนิกส์ ได้มากมายในปัจจุบัน เช่น ใช้ในอุปกรณ์เครื่องมือวัดเฟสมิเตอร์ ออสซิลโลสโคป ในวงจรมอดูเลตแบบต่าง ๆ [1] วงจรหน่วงเวลา [2] และ เครื่องช่วยฟัง เป็นต้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีได้มีการพัฒนางจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดจากการใช้ออมแอมป์ [5] [6] แต่วงจรยังไม่สมดุล ต่อมาผู้วิจัย วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมอดมอด (Leading APF) [3] แบบสมดุลและชนิดลางตาม (Lagging APF) [4] เป็นการออกแบบโดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ใช้หลักการกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดอันดับหนึ่งแบบ RC โดยใช้ความต้านทาน r_c ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ (ความต้านทานของรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ในขณะไบอัสตรง) และ ใช้ V_T คือ แรงดันเทอร์มอล (Thermal Voltage) ของรอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำโดยปกติประมาณ 26 mV ที่อุณหภูมิห้อง พิจารณาออกแบบวงจร วงจรสามารถปรับช่วงความถี่ด้วยกระแส โดยวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมอดมอด มีความถี่เชิงมุมที่ได้จากการออกแบบคือ ความถี่เชิงมุม (ω_0) มีค่าเท่ากับ $1/\tau$ เมื่อ $\tau = 2CV_T/I_f$ [3] กระแส I_f คือ กระแสไบแอสการทำงานของวงจร ส่วนวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมอดมอด มีความถี่เชิงมุม (ω_0) มีค่าเท่ากับ $1/\tau$ มีค่าเมื่อ $\tau = 8CV_T/I_f$ [4] โดยมีความถี่สูงสุด 112 MHz ซึ่งการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมด [3-4] ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จำนวนสิบตัว

บทความนี้จึงนำเสนอวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมอดมอด โดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จำนวนเพียงหกตัว โดยยังคงช่วงความถี่กว้างสามารถปรับความถี่ได้ด้วยกระแสไบแอส โดยมีความถี่เชิงมุม (ω_0) มีค่าเท่ากับ $1/\tau$ เมื่อ $\tau = 4CV_T/I_f$ ซึ่งจากผลการจำลองสามารถปรับความถี่ได้สูง 220 MHz โดยที่เฟสของแรงดันเอาต์พุตแบบล้าหลังเท่ากับ -90 องศา

2. หลักการเบื้องต้น

วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมอดมอด (Phase-Lag All-Pass Filter)



รูปที่ 2.1 วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมอดมอด

จากรูปที่ 2.1 สามารถหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนได้จากสมการ [7] ค่าแรงดัน v_+ หาได้จาก

$$v_+ = \frac{1/Cs}{R_I + 1/Cs} v_i = \frac{v_i}{Cs} \left(\frac{Cs}{R_I Cs + 1} \right) \quad (2.1)$$

หรือ

$$v_+ = \frac{v_i}{1 + s\tau} \quad ; \tau = R_I C \quad (2.2)$$

ค่าแรงดัน v_- หาได้จาก

$$v_- = \frac{R_I}{R_I + R_I} (v_i + v_o) = \frac{v_i + v_o}{2} \quad (2.3)$$

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติจะได้

$$v_+ = v_- \quad (2.4)$$

จากสมการ (2.2) และ (2.3) จะได้

$$\left(\frac{1}{1 + s\tau} \right) v_i = \frac{v_i + v_o}{2} \quad (2.5)$$

$$v_i \left[\frac{1}{1 + s\tau} - \frac{1}{2} \right] = + \frac{v_o}{2} \quad (2.6)$$

ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดนี้มีมุมมองศาตามคือ

$$\frac{v_o}{v_i} = + \left[\frac{1 - s\tau}{1 + s\tau} \right] \quad (2.7)$$

จากสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถนำไปหาค่าขนาดและมุมมองศาได้จาก

$$Magnitude = 20 \log \left| \frac{v_o}{v_i} \right| \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.7 จะได้

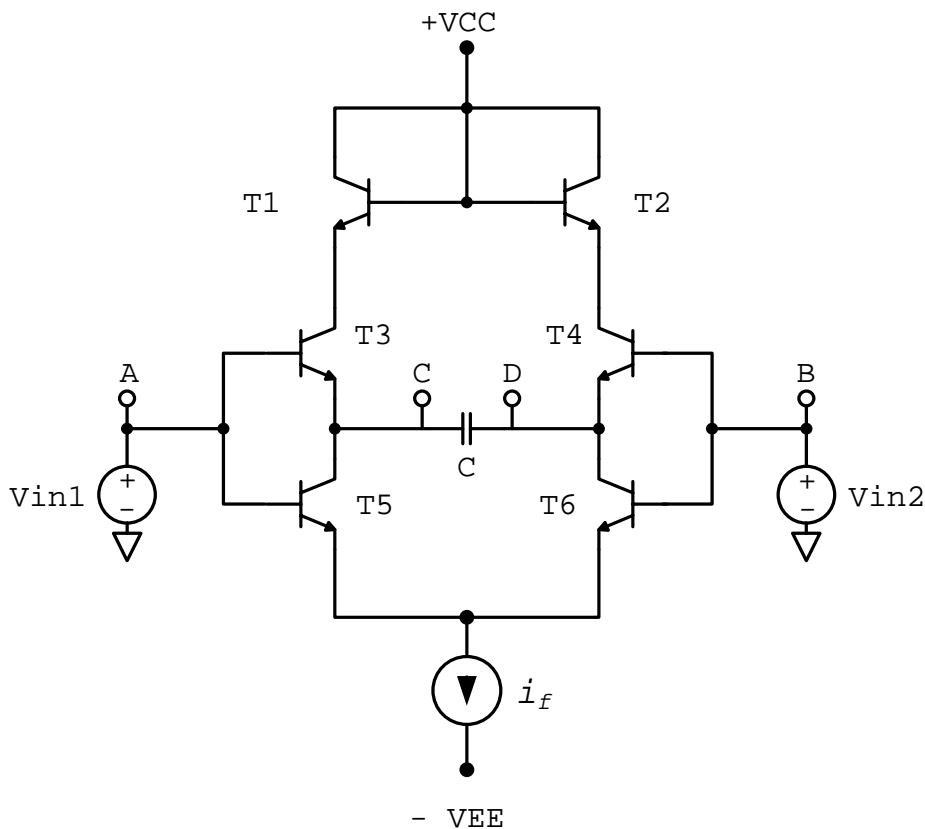
$$Magnitude = 20 \log \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2} - 20 \log \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2} = 0dB \quad (2.9)$$

มุมมองศา (θ) สามารถหาได้จาก

$$\theta = -2 \tan^{-1} \omega t = -90^\circ ; \omega = \frac{1}{\tau} \quad (2.10)$$

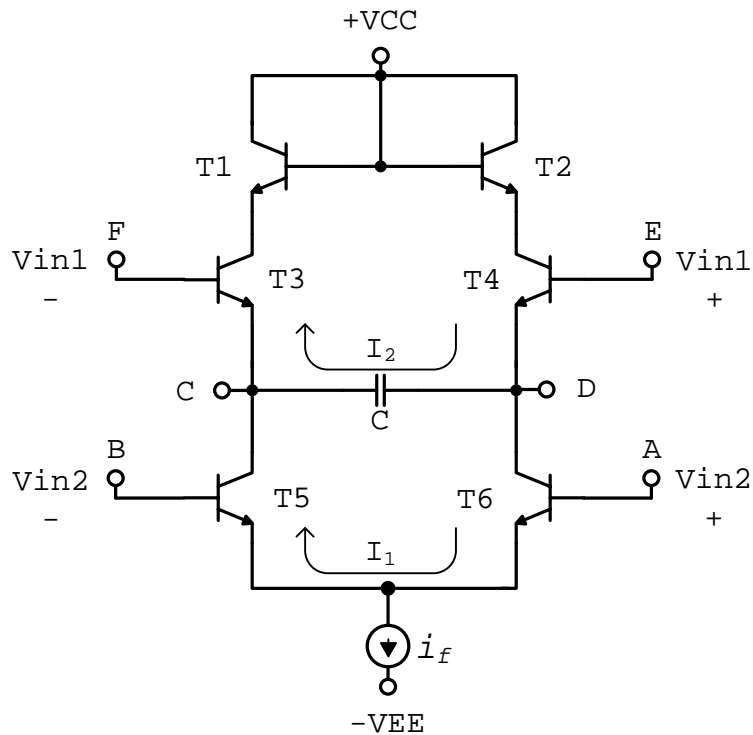
3. วงจรเลื่อนเฟสสัญญาณรูปคลื่นชานซ์ โหมดแรงดันชนิดมีมุมมองตามแบบสมมูลและปรับค่าความถี่ได้ กว้างโดยการปรับค่ากระแสที่นำเสนอ

จากการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดโดยใช้ออปแอมป์ จะยังไม่เป็นแบบสมมูล [5] [6] ผู้วิจัยนำเสนอ วงจรจากรูปที่ 2 เป็นวงจรเลื่อนเฟสสัญญาณรูปคลื่นชานซ์ชนิดมีมุมมองตาม วงจรมีความสมมูลและปรับค่าความถี่ได้กว้างโดยการปรับค่ากระแสที่ได้จากการออกแบบวงจร จากวงจรจะเห็นว่าประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด NPN 6 ตัว (T1-T6) ที่เหมือนกันทุกประการ ตัวเก็บประจุ (C) และวงจรควบคุม I_f ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดสัญญาณความแตกต่างขนาดเล็ก V_{in1} และ V_{in2} ถูกป้อนเข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ T5- T6 และ T3- T4 โดยผ่านวงจรสวิตช์เกทเพื่อจัดระเบียบไบอัสระหว่างโหนด A และ B จะมีแรงดันไฟฟ้าที่จุดสัญญาณออกความแตกต่างขนาดเล็ก V_n ต่กรวมที่ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ T5-T6 และ T3- T4 ตามลำดับ ส่วนกระแส I_f จะไปอัสทรานซิสเตอร์ T1 ,T2 ,T3 ,T4 ,T5 และ T6 จากวงจรจะเห็นว่าสถาปัตยกรรมที่เป็นแบบสมมูล



รูปที่ 2 ไคอะแกรมรวมของระบบที่ใช้ในการวิจัย

3.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรเลื่อนเฟสสัญญาณรูปคลื่นไซน์ โหมดแรงดันชนิดมีมุมมองตามแบบสมมูลและปรับค่าความถี่ได้กว้างโดยการปรับค่ากระแส



รูปที่ 3 วงจรเลื่อนเฟสสัญญาณรูปคลื่นไซน์ โหมดแรงดันชนิดมีมุมมองตามแบบสมมูล และปรับค่าความถี่ได้กว้างโดยการปรับค่ากระแส

จากรูปที่ 3 เมื่อป้อนสัญญาณแรงดันความแตกต่างขนาดเล็ก (V_{in2+} , V_{in2-}) จะทำให้เกิดกระแสความแตกต่างขนาดเล็กไหลจากจุด A ไป B เรียกกระแสนี้ว่า i_1 และจะพิจารณาทรานซิสเตอร์ที่ i_1 ไหลผ่านให้เป็น r_e ทำให้ได้ค่าดังสมการ

$$i_1 = i_{o1} = \frac{V_{in1}}{2r_e} \quad (3.1)$$

ในที่นี้เรากำหนดให้

$$V_{in1} = V_{in2} = V_{out1} \quad (3.2)$$

ดังนั้นจะได้ V_{in1} จาก (1)

$$V_{in1} = 2r_e i_o \quad (3.3)$$

เมื่อป้อนแรงดัน $V_{in1} +, V_{in1} -$ สัญญาณความแตกต่างขนาดเล็กเข้าที่จุด E และ F จะทำให้เกิดกระแสขนาดเล็ก i_2 ไหลและมีค่าดังสมการ

$$i_2 = i_{o2} = \left(\frac{V_{in2}}{4r_e + \frac{1}{sC}} \right) \quad (3.4)$$

จาก (3.2) จะทำให้ได้ V_{o2} ที่จุด C และ D เป็น

$$V_{o2} = i_{o2} \left[\frac{4r_e}{(1 + s\tau)} \right] \quad (3.5)$$

โดย

$$\tau = 4r_e C = \frac{4V_T C}{I_f} \quad (3.6)$$

V_T คือ แรงดันเทอร์มอล (Thermal Voltage) ของรอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำโดยปกติประมาณ 26 mV ที่อุณหภูมิห้อง (300 K หรือ 27 °C) เมื่อพิจารณา V_{o2}/V_{in} ที่จุด C และ D เป็น จะทำให้เราได้ฟังก์ชันถ่ายโอนกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่งตาม (3.7)

$$\frac{V_{o2}}{V_{in}} = \frac{2r_e}{1 + s\tau} \quad (3.7)$$

กระแส i_1 ยังก่อให้เกิดฟังก์ชันถ่ายโอน V_{o1}/V_{in} ในรูปของบัพเฟอ์ ตาม (3.2)

$$\frac{V_{o1}}{V_{in}} = 1 \quad (3.8)$$

ที่จุด C และ D ของรูปที่ 3 จะมีสัญญาณแรงดันความแตกต่างขนาดเล็ก V_o ตกคร่อม จากการใช้ทฤษฎีการซ้อนทับ คือ $V_o = V_{o2} - V_{o1}$ จะทำให้เราได้ฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณผ่านทั้งหมดอันดับหนึ่งตาม (3.9)

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{(1 - s\tau)}{(1 + s\tau)} \quad (3.9)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมุมองศาตาม โดยที่ความถี่ ω_o ของวงจรมีมุมองศาเท่ากับ -90 องศาและขนาดเท่ากับ 0 เดซิเบล

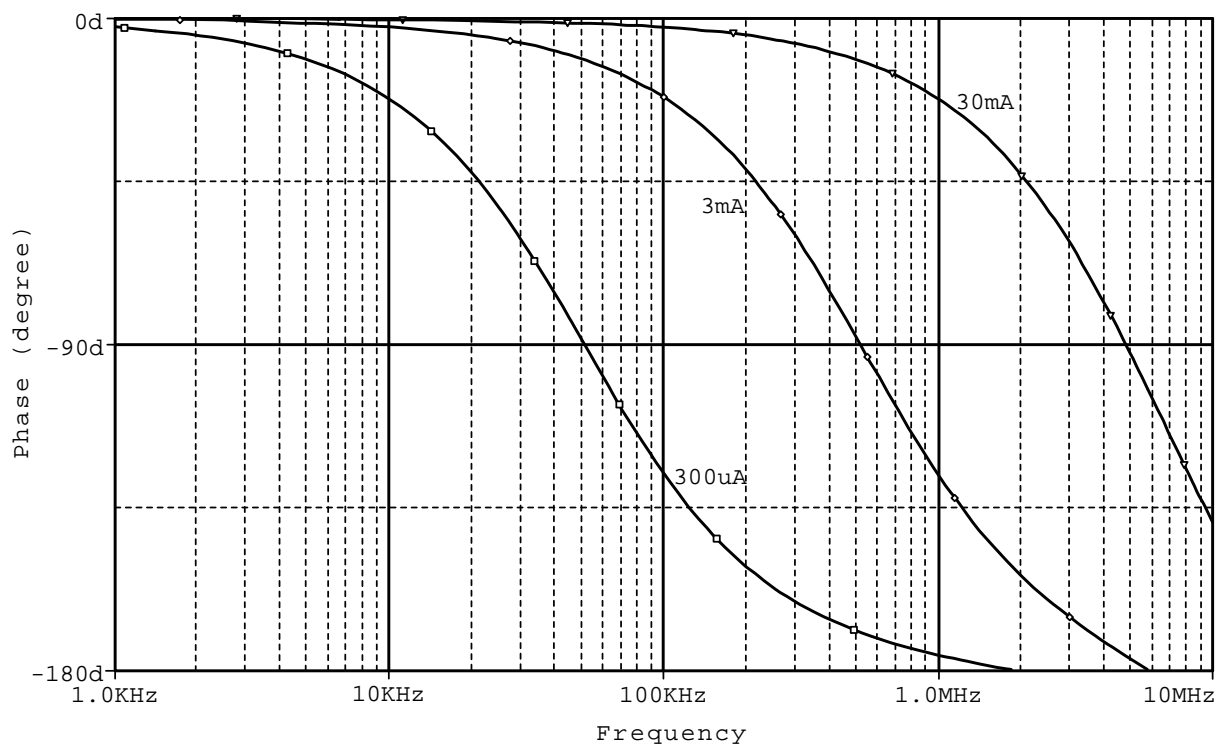
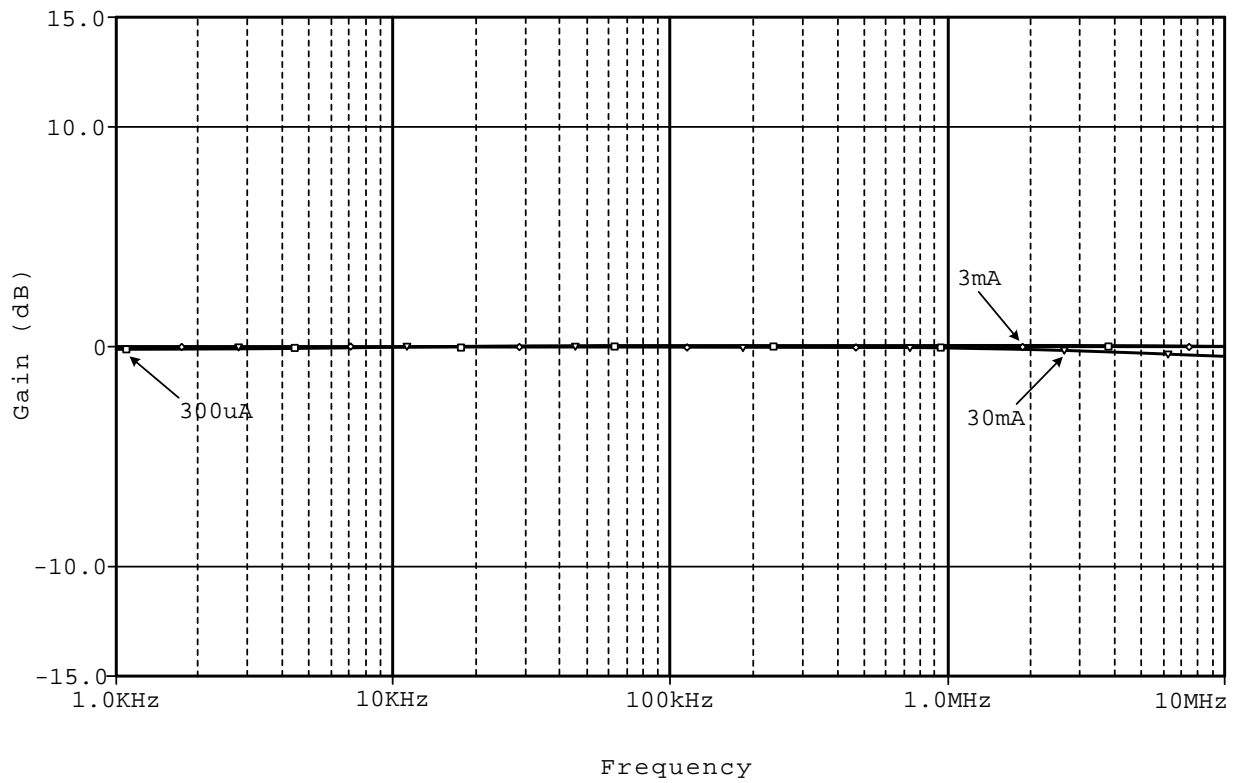
$$\omega_o = \frac{1}{\tau} = \frac{I_f}{4CV_T} \quad (3.10)$$

4. ผลการจำลองการทำงาน

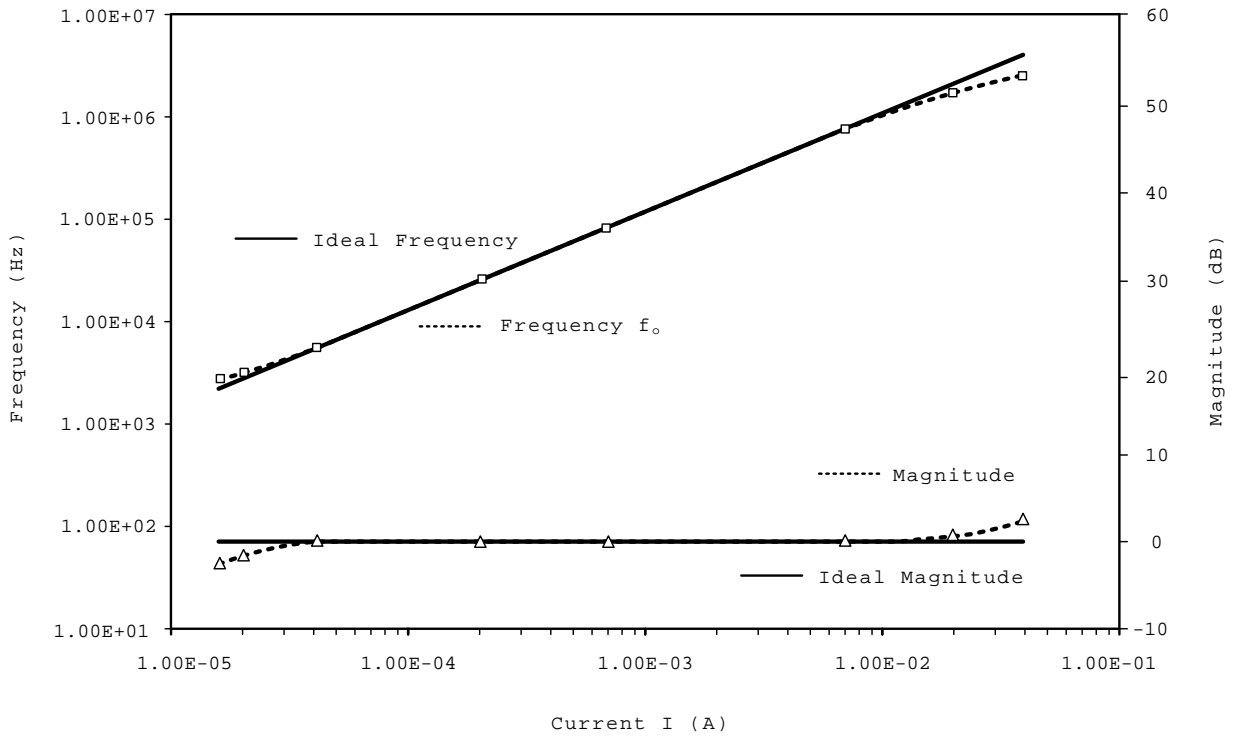
การทดลองการทำงานของวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมุมองศาตาม ดังรูปที่ 3 คือวงจรที่ใช้ในการทดลองและทรานซิสเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในวงจรในการทดลอง นั้นใช้แบบจำลองของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2n3904 ทรานซิสเตอร์มีความถี่ f_T ที่ 300 MHz [6] โดยการทดลองวงจรใช้ โปรแกรม SPICE ในการจำลองวงจรจากรูปที่ 4 เป็นผลการทดลองหาค่า Magnitude (dB) และ Phase Shift (degree) โดยพิจารณาจากค่าอัตราการขยายที่ได้จาก ฟังก์ชันถ่ายโอน (V_o/V_i) กับความถี่ที่ได้รับจากการจำลองการทำงาน โดยใช้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 nF ค่ากระแส I_f เท่ากับ 300 μ A, 3 mA, 30 mA ดังแสดงในรูปที่ 4 ได้มุมองศาที่ -90 และมีค่าความถี่สำหรับการปรับค่า ค่ากระแส I_f แต่ละค่า ที่ 42 kHz , 428 KHz, 4 MHz ตามลำดับ และค่าของ Magnitude ประมาณ 0 dB

จากรูปที่ 5 ผลการทดลอง หาค่าความถี่และขนาดของวงจร มีอัตราการขยายที่ได้จาก ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร คือ V_o/V_i และค่ามุมองศา -90 องศา หาค่าของวงจร โดยการปรับค่ากระแส I_f กำหนด ค่าตัวเก็บประจุ $C = 10$ nF จะเห็นว่าจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงมุมที่เป็นฟังก์ชันของเส้นตรงกับการปรับค่าของกระแส I_f มีผลลัพธ์เป็นช่วงของแถบความถี่ กว้างประมาณเท่ากับ 4 ออกเตป (Octave)

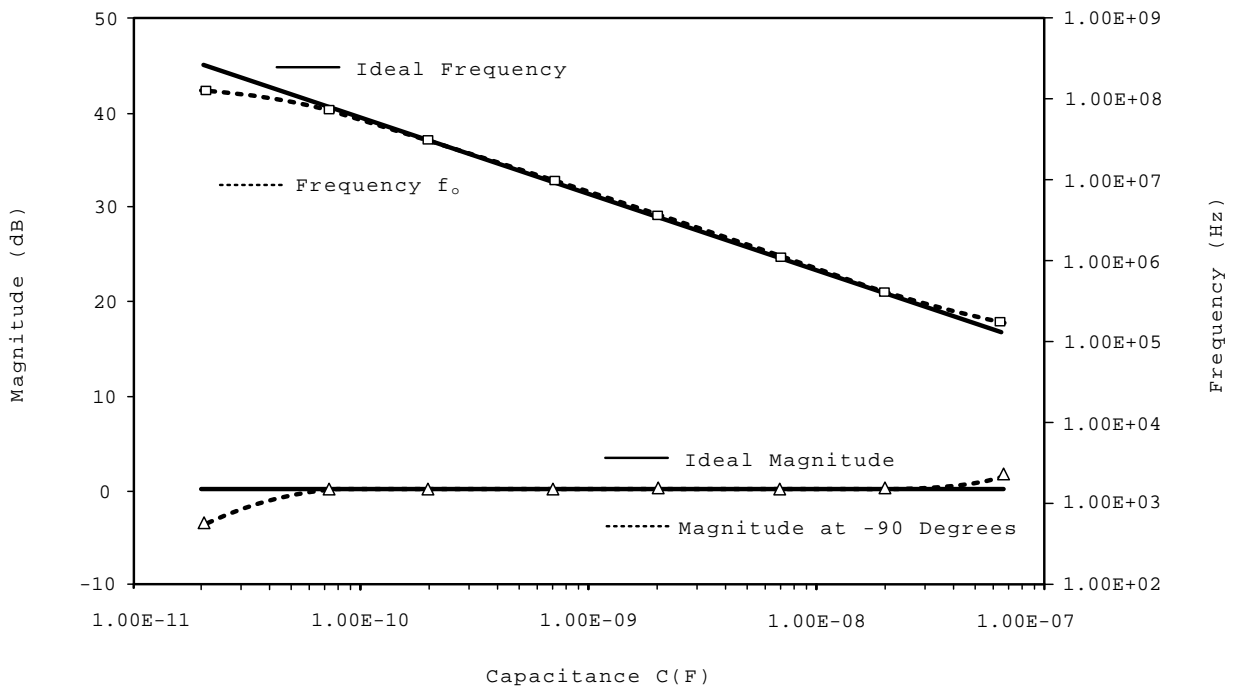
จากรูปที่ 6 ผลการทดลอง หาค่าความถี่และขนาดของวงจร มีอัตราการขยายที่ได้จาก ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร คือ V_o/V_i ค่ามุมองศา -90 องศา โดยการปรับค่าตัวเก็บประจุ กำหนด ค่า $I_f = 5$ mA ซึ่งเห็นว่าจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ที่เป็นฟังก์ชันของเส้นตรงกับการปรับค่าของตัวเก็บประจุ จากการทดลองค่าน้อยที่สุดของตัวเก็บประจุได้ค่าประมาณ 20 pF ได้ค่าความถี่สูงสุดที่ถึงประมาณ 220 MHz



รูปที่ 4 ค่า Magnitude (dB) และ Phase Shift (degree) โดยพิจารณาจากอัตรการขยายที่ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอน
กับค่าความถี่ที่ใช้ค่า $C = 10 \text{ nF}$ และค่า $I_f = 300 \text{ }\mu\text{A}, 3 \text{ mA}, 30 \text{ mA}$



รูปที่ 5 แสดงกราฟผลการทดลองการปรับค่ากระแส I_f
โดยกำหนด ค่าตัวเก็บประจุ $C = 10 \text{ nF}$



รูปที่ 6 แสดงกราฟผลการทดลองการปรับค่าตัวเก็บประจุ C
โดยกำหนด กระแส $I_f = 5 \text{ mA}$

5. สรุป

วงจรเลื่อนเฟสสัญญาณรูปคลื่นซายน์ โหมดแรงดันชนิดมีมุมมองสาตาม ที่นำเสนอจะเห็นได้ว่าวงจรใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ จำนวนเพียงหกตัว โดยยังคง ช่วงความถี่กว้างสามารถปรับความถี่ได้ด้วยกระแสไบแอส I_f ซึ่งจะให้ความถี่ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับวงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดของสาตาม [4] ที่กล่าวมาซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ จำนวนถึงสิบตัว และให้ค่าความถี่สูงกล่าวดัง กราฟรูปที่ 6 เป็นผลลัพธ์ที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถการตอบสนองของวงจร ช่วงกวาดของช่วงความถี่กว้าง ถึงประมาณ 4 ออกเตป (Octave) มีความถี่ห้กมม f_o ขนาดและมุมมองสามมีค่าประมาณเท่ากับ 0 เดซิเบล และ -90 องศา ตามผลการจำลองซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยค่าสูงสุดของความถี่ประมาณ 220 MHz ข้อเสนอแนะควรใช้ทรานซิสเตอร์ที่มีค่า f_T สูง และค่าตัวเก็บประจุ C ต่ำ เพื่อที่จะให้ค่าความถี่เชิงมุมที่สูงขึ้นและนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

References

- [1] L. W. Couch II.1997, "Digital and analog communication system," 5th ed., New York. Prentice hall, Chapter 5.
- [2] K. Bult and H. Wallinga, "A CMOS analog continuous-time delay line with adaptive delay-time control," *IEEE Journal of solid-state circuits*, vol. 23, no. 3, June 1988.
- [3] อิศราวุธ สีดาदान, วัลลภ สุระกำพลธร และบันลือ ศรีสุชินวงศ์ "วงจรกรองสัญญาณผ่านทั้งหมดชนิดมีมุมมองสาตาม วงจรมีความสมมาตรและสามารถปรับความถี่ได้กว้างโดยการปรับค่ากระแส" วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ฉบับที่ 1: 31-41, 2001
- [4] Srisuchinwong Banlue, "A Fully-Balanced Wide-Frequency Current-Tunable All-Pass Filter" ICICS, 1732-1736, 1997
- [5] Tay,E.W. and Murti, V.G.K. "Unity-gain frequency-independent quadature phase shifter" *Electron.Lett*, 20.1984
- [6] Comer,D.T., Comer,D.J. and Gonzalez, J.R. "A Hight-Frequency Integrable Bandpass Filter Configuration," *IEEE Trans. On Circuit a Systems-II: Analog and Digitial Signal Processing*, Vol.44, No.10.1999.pp.856-861.
- [7] Donald A. Bell. *Operational Amplifiers Application, Troubleshooting and Design*. Second Edition. NewYoke: McGraw-Hill Higher Education.2001
- [8] Viewspice User's Manual, Workview PLUS on Windows, Viewlogic qsystems, 1993.

บทความนี้ส่งเข้ามาเมื่อ 4 มกราคม 2555 และได้รับพิจารณาให้ตีพิมพ์เมื่อ 31 มกราคม 2555