

วงจรงกรองแถบความถี่หยุดผ่านแบบปรับตัวได้โดยใช้สวิตช์ประจุสำหรับการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

Adaptive Band Stop Filter using Switched Capacitor for ECG Measurement

กรณิการ์ มุลโพธิ์¹ ศิริพงษ์ วงษ์คาร² ฤชฎา กันทะวงศ์³ และ วีระชัย มลายเวช⁴

สถาบันนวัตกรรมมหานคร สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Email : kornika@mut.ac.th¹, siripong@mut.ac.th², krisada@mut.ac.th³, veerachai@mut.ac.th⁴

Manuscript Received November 18, 2024

Revised December 3, 2024

Accepted December 4, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรงกรองความถี่หยุดผ่านแบบปรับตัวได้โดยใช้สวิตช์ประจุสำหรับการขจัดสัญญาณรบกวนในคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ซึ่งมีแถบความถี่ปรับตัวในช่วงความถี่ 40 - 60 เฮิรตซ์ และมีอัตราการลดทอนสัญญาณสอดแทรกจากการจำลองได้สูงถึง -70dB อีกทั้งมีค่าตัวประกอบคุณภาพวัดค่าได้สูงถึง 9 ในบทความนี้ใช้ความถี่ในการสวิตช์ 100 เท่าของความถี่กลาง โดยใช้วงจรงกรองแถบความถี่ วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน วงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมจากแรงดัน เพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาให้กับวงจรสวิตช์ประจุ ในบทความนี้ทำการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ เปรียบเทียบกับสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจในโดเมนเวลา ผลการทดลองได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจ สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวงจรรวมแบบชิพเดียวได้

คำสำคัญ: วงจรงกรองความถี่แบบปรับตัว สวิตช์ประจุ คลื่นไฟฟ้าหัวใจ วงจรงกรองแถบความถี่หยุดผ่าน

ABSTRACT

This paper presents an adaptive band stop filter using a switched capacitor for eliminating electrocardiogram (ECG) noise which has an adaptive frequency band in the range of 40 - 60 Hz. The simulated interference attenuation rate is of up to -70dB and a quality factor is of up to 9. In this paper, the frequency is used to switch 100 times of the center frequency by using a band filter circuit, a frequency-to-voltage converter and a signal generator circuit controlled from voltage. This leads to create a clock signal for the switched capacitor circuit. In this paper, the frequency response is simulated in comparison with ECG signals in the time domain. The experimental results were satisfactory that can be used as a guideline to design a single-chip integrated circuits.

Keywords: Adaptive filter, Switched Capacitor, Universal Filter, Band Stop Filter, ECG, EKG, FVC, VCO, SC-BSF

1. คำนำ

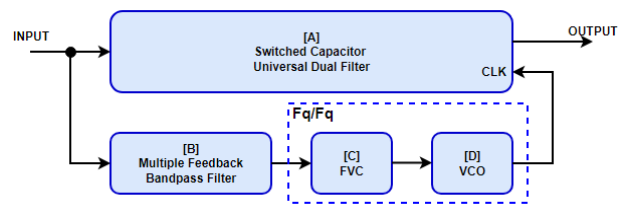
วงจรงกรองแถบความถี่หยุดผ่านแบบปรับตัวได้ชนิดวงจรงปิด [1] ใช้วิธีปรับอัตราการชักตัวอย่างโดยสวิตช์ตัวเก็บประจุ (Switched-Capacitor Adaptive Sample-Rate Filter; SC-

ASRF) ประกอบด้วยวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน(Band-Pass Filter) วงจรบวกสัญญาณ(Summing Amplifier) วงจรคูณสัญญาณ วงจรอินทิเกรเตอร์(Integrator) กับวงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมด้วยแรงดัน(Voltage Controlled Oscillator; VCO) ส่วนอีกวิธีใช้การตรวจจับความต่อเนื่องของความถี่เฟส (Sequential Phase-Frequency Detector; S-PFD) [2] ประกอบด้วยวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน วงจรเปรียบเทียบเฟส(Phase Comparator) วงจรบวกสัญญาณ วงจรคูณสัญญาณ วงจรอินทิเกรเตอร์ กับวงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมด้วยแรงดัน โดยทั้งสองวิธีการมีอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนน้อยมากและมีมุมเฟสตรงข้ามกับสัญญาณอินพุต

วงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่านแบบปรับตัวได้ชนิดวงรอบเปิด [3] ใช้วงจรรวมโคโรซายสวิตช์ตัวเก็บประจุ กับการสังเคราะห์ความถี่โดยใช้เฟสล็อกกลูป (Phase Locked Loop; PLL) มีตัวประกอบคุณภาพ (quality factor; Q) มีค่าเท่ากับ 8 วงจรที่ออกแบบมีขนาดเล็กแต่ขนาดเสถียรภาพ

วงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่านแบบปรับตัวได้ชนิดวงรอบปิด [5] ใช้การสังเคราะห์ความถี่ (Frequency Synthesizer Adaptive Notch Filter; FS-ANF) ใช้เฟสล็อกกลูปเพื่อใช้ในการปรับค่าสัญญาณนาฬิกาที่ใช้กำหนดค่าของความถี่กลาง (Center Frequency; f_o) และมีวงจรเรียงกระแสกับวงจรเปรียบเทียบแรงดัน สำหรับการกำหนดค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่านได้ 4 ระดับ

ในบทความนี้นำเสนอ วงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่านแบบปรับตัวได้โดยใช้วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน(Frequency to Voltage Converter; FVC) กับวงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมจากแรงดัน (Voltage controlled Oscillator; VCO) ในบทความนี้เรียกว่าการแปลงความถี่ต่ำไปความถี่สูง (Frequency to Frequency; F_q/F_q) เพื่อให้ได้ค่าความถี่สัญญาณนาฬิกาไปควบคุมความถี่กลางของวงจรสวิตช์ประจุ ซึ่งวิธีการที่นำเสนอมีความซับซ้อนน้อยกว่าการสังเคราะห์ความถี่ [5] อีกทั้งมีอัตราขจัดที่สูงกว่ากับตัวประกอบคุณภาพที่สูงกว่าบทความ [1] – [5] ในอดีต



รูปที่ 1 แผนผังโดยย่อของวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่านแบบปรับตัวได้

2. รายละเอียดการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบปรับตัว

รูปที่ 1 เป็นแผนผังทั้งหมดของบทความ ประกอบไปด้วยวงจรรวมสวิตช์ประจุหลายหน้าที่ (Switched Capacitor Universal Dual Filter) ทำหน้าที่กรองแถบความถี่หยุดผ่าน สามารถควบคุมแถบความถี่หยุดผ่านจากสัญญาณนาฬิกา (Clock; CLK) โดยมีวงจรกรองแถบความถี่ผ่านป้อนกลับแบบพหุคูณ (Multiple Feedback Band pass filter) ทำหน้าที่กรองเฉพาะสัญญาณรบกวนที่ปะปนมากับสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

ความถี่ของสัญญาณรบกวนที่ปะปนมาคลื่นไฟฟ้าหัวใจทางด้านอินพุต(INPUT) จะทำการปรับเปลี่ยนให้มีค่าสูงจากความถี่มาตรฐาน 100 เท่า เพื่อใช้ในการควบคุมสัญญาณนาฬิกาของวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน เมื่อความถี่ของสัญญาณรบกวนเปลี่ยนแปลงส่งผลให้สัญญาณนาฬิกาเปลี่ยนค่าความถี่เช่นกัน ตามลำดับการออกแบบดังต่อไปนี้

2.1 วงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่านแบบสวิตช์ประจุ

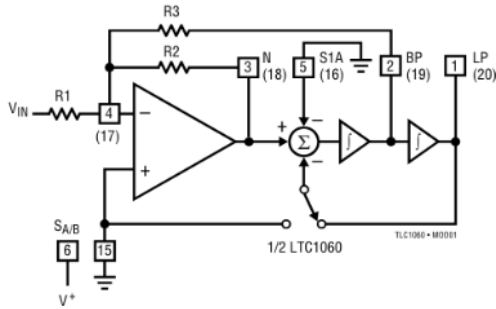
วงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่านแบบสวิตช์ประจุ(SC-BSF) ในบทความนี้ใช้วงจรรวม LTC1060 ที่มีสวิตช์ประจุอันดับสองจำนวน 2 วงจร เมื่ออนุกรมกันจะได้อัตราการลดทอนถึง -80dB การเชื่อมต่อวงจรในบทความนี้เลือกใช้โหมด 1 ซึ่งมีลักษณะวงจรตามรูปที่ 2 (ก) และสมการของการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่ (1) – (3) และบทความนี้กำหนดค่าตัวประกอบเท่ากับ 10 และอัตราขยายในช่วงแถบผ่านเท่ากับ 1 จะได้วงจรที่ใช้ในบทความ ดังรูปภาพที่ 2(ข)

สมการของค่าความถี่กลาง , อัตราขยายในช่วงแถบผ่าน และค่าตัวประกอบคุณภาพ สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (1) ถึง (3) ตามลำดับ

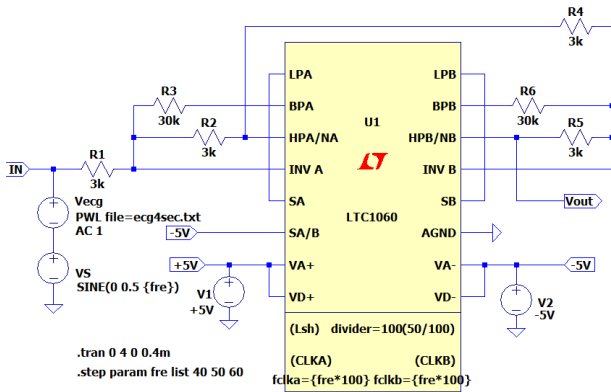
$$f_N = \frac{f_{CLK}}{100}$$

$$H_{ON} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$Q = \frac{R_3}{R_2}$$



รูปที่ 2(ก) โครงข่ายสวิตช์ประจุในโหมด 1



รูปที่ 2(ข) วงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่านในโหมด 1

2.2 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านป้อนกลับแบบพหุคูณ

สัญญาณรบกวนที่ปะปนมากับสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ถูกคัดกรองออกมาเพื่อนำไปสร้างเป็นสัญญาณนาฬิกา ที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของวงจร SC-BSF บทความนี้เลือกใช้วงจรกรองความถี่ผ่านป้อนกลับแบบพหุคูณ (MFB-BPF) เพราะเป็นวงจรกรองความถี่ที่สามารถออกแบบให้มีอัตราขยายสัญญาณได้ โดยบทความนี้กำหนดอัตราขยาย (K) ในช่วงแถบผ่าน -250V/V ที่ความถี่กลาง (f_o) เท่ากับ 50 Hz มีค่าตัวประกอบคุณภาพ(Q) เท่ากับ 2.5 และอัตราแดมป์ (Damping Ratio; ζ) มีค่าเท่ากับ 1 โดยมีสมการของ

(1) ความถี่กลาง, ค่าตัวประกอบคุณภาพ และอัตราขยายในช่วงแถบผ่าน ดังสมการที่ (4) – (6) ตามลำดับ

(2)

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_3 C_1 C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$$

(3)

$$Q = \frac{1}{2\zeta}$$

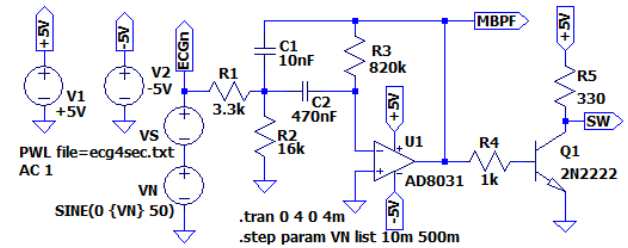
(5)

$$K = \frac{R_3}{R_1} \frac{-C_2}{(C_1 + C_2)}$$

(6)

2.1 วงจรแปลงความถี่ต่ำไปความถี่สูง(F_q/F_q)

จากวงจรกรองความถี่โดยใช้สวิตช์ประจุต้องมีสัญญาณนาฬิกาควบคุมความถี่กลาง ซึ่งบทความนี้กำหนดไว้ 100 เท่าของความถี่กลาง ดังนั้นความถี่ของสนามไฟฟ้าที่สอดคล้องกับความถี่กลาง คลื่นไฟฟ้าหัวใจ ที่ ตรวจวัดได้จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่านป้อนกลับแบบพหุคูณถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณพัลส์โดยเพิ่มวงจรสวิตช์ตามในวงจรรูปที่ 3 แล้วนั้น จะต้องทำให้ทวีความถี่ให้สูงขึ้น 100 เท่าโดยใช้วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันร่วมกับวงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมด้วยแรงดันตามลำดับต่อไปนี้



รูปที่ 3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านป้อนกลับแบบพหุคูณ

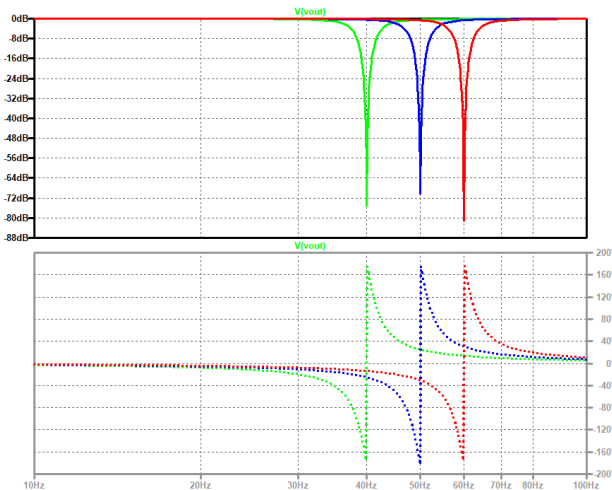
2.3.1 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

โดยทั่วไปแล้วมีหลายวิธี แต่บทความนี้เลือกใช้วงจรที่มีขนาดเล็กเพื่อใช้เป็นแนวทางออกแบบวงจรรวมแบบชิพเดียวได้ง่าย ดังวงจรในรูปที่ 4 และมีสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของความถี่กับแรงดันตามสมการที่ (7)

$$V_X = f_{IN} \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot (V_1 - V_{D1} - V_{BE}) \quad (7)$$

โดยที่ $V_{D1} = 0.6V$, $V_{BE} = 0.6V$

และ f_{IN} คือ ความถี่ของสัญญาณทางอินพุต

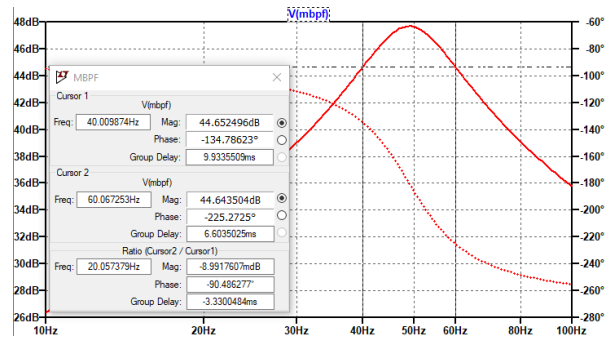


รูปที่ 6 ผลตอบสนองความถี่ทางขนาดและเฟสของ SC-BSF

บทความนี้ใช้วิธีจำลองแบบคำสั่ง(Directive) เพื่อลดการจำลองที่กระทำซ้ำ โดยกำหนดพารามิเตอร์ของสัญญาณนาฬิกา (CLK) ที่ 4kHz, 5kHz และ 6kHz เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่กับเฟสสัญญาณของวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน ได้ผลลัพธ์ดังในรูปที่ 6 ซึ่งจากกราฟที่ได้จากการจำลองพบว่า ความถี่กลางมีความแม่นยำตามที่ได้ออกแบบไว้ จะได้ความถี่กลาง 40Hz, 50Hz และ 60Hz ตามลำดับ และอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนได้ถึง -75dB แต่ค่าคุณภาพที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 9 เท่านั้น จากที่ออกแบบไว้ที่ 10 ตามสมการที่ 3

3.2 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านป้อนกลับแบบพหุคูณ (MFB-BPF)

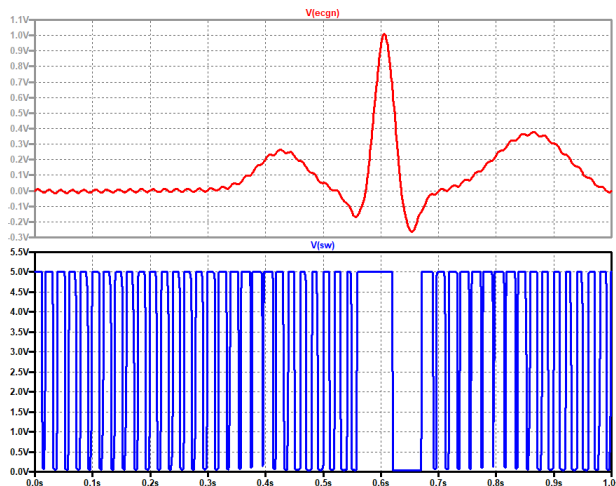
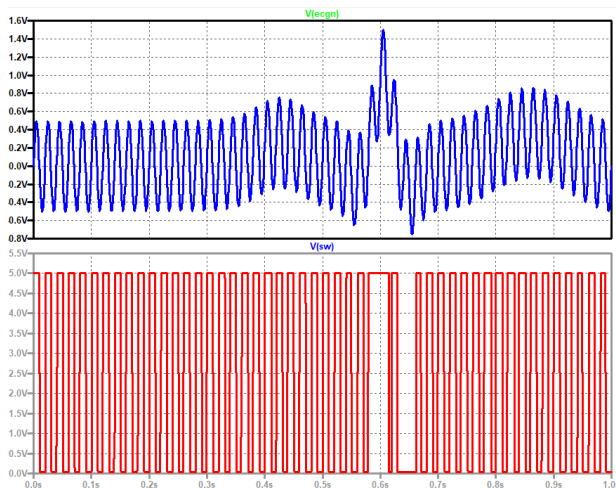
วงจรกรองความถี่ MFB-BPF ตามรูปที่ 3 เมื่อทำการจำลองเพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่และเฟสของวงจรที่ขั้ว MBPF จะได้ผลลัพธ์ดังในรูปที่ 7 เมื่อทำการวัดค่าความถี่กลางพบว่าได้ค่าความถี่ 49.7Hz สาเหตุเกิดจากการกำหนดค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร ซึ่งการวัดค่าอัตราขยายในช่วงความถี่กลางได้ 47.7dB หรือประมาณ $-250V/V$ ตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ และตัวประกอบคุณภาพเท่ากับ 2.5



รูปที่ 7 ผลตอบสนองความถี่ทางขนาดและเฟสของ MFB-BPF

สัญญาณรบกวนที่ปะปนมากับสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ecg4sec.txt ทางด้านอินพุตของวงจร MFB-BPF บทความนี้กำหนดความถี่ที่ 50Hz การจำลองใช้แบบคำสั่งที่ขนาดแรงดัน 10mV_p กับ 500mV_p แล้ววัดสัญญาณของวงจรสวิตช์ที่ขั้ว SW ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 8 จะเห็นว่าที่ VN ตามวงจรในรูปที่ 3 ขนาดแรงดัน 10mV_p มีผลกระทบต่อสัญญาณคลื่นหัวใจน้อยมาก แต่วงจรสวิตช์ที่ขั้วเอาต์พุตก็สามารถสร้างสัญญาณนาฬิกาที่ความถี่ 50Hz ได้ เท่ากับความถี่รบกวนทางอินพุต สำหรับที่ VN ขนาดแรงดัน 500mV_p มีผลกระทบต่อการแปลค่าสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ แต่วงจรสวิตช์นั้นก็ยังคงให้ค่าความถี่เท่ากับ สัญญาณรบกวนทางขั้วอินพุตทุกประการ

สำหรับเฟสของสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตในช่วงแถบความถี่ผ่าน มีมุมเฟสตรงกันข้าม 180 องศา ตามเส้นประในรูปที่ 7

(ก) กำหนดให้ VN มีสัญญาณรบกวน $10mV_p$ ที่ความถี่ 50Hz(ข) กำหนดให้ VN มีสัญญาณรบกวน $500mV_p$ ที่ความถี่ 50Hz

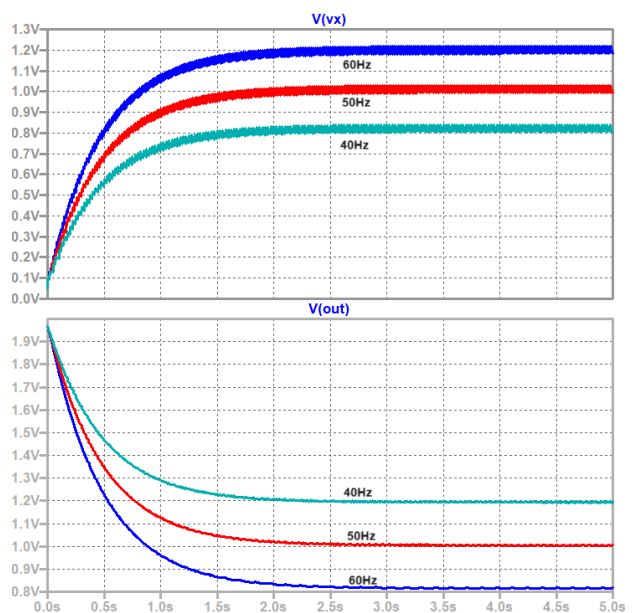
รูปที่ 8 สัญญาณในโดเมนเวลาของวงจร MFB-BPF

3.3 วงจรแปลงความถี่ต่ำไปความถี่สูง(F_q/F_q)

วงจรทวีความถี่สัญญาณนาฬิกาของบทความนี้ ใช้วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันอย่างง่ายร่วมกับ วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมด้วยแรงดันแบบกลับความถี่ เพื่อให้ได้ความถี่สัญญาณนาฬิกาจำนวน 100 เท่าของความถี่สัญญาณรบกวนทางด้านอินพุต เพื่อใช้เป็นสัญญาณควบคุมค่าความถี่ตัดของวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน SC-BSF

3.3.1 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

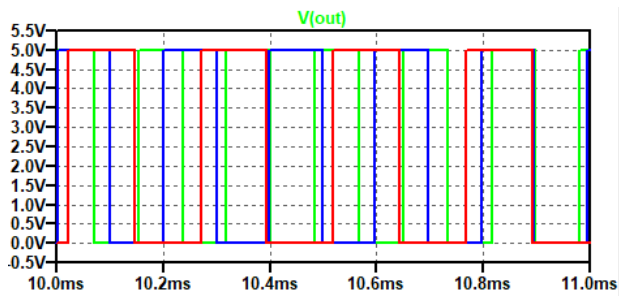
บทความนี้กำหนดสัญญาณอินพุต V_{in} ของวงจรในรูปที่ 4 ให้เป็นสัญญาณพัลส์ ขนาดแรงดัน 5V และพารามิเตอร์ของความถี่แบบปรับค่าที่ 40Hz, 50Hz และ 60Hz ได้ผลลัพธ์ของแรงดันไฟตรงที่ขั้ว V_X ที่แปลค่าได้ 0.8V, 1.0V และ 1.2V ต่อมาทำการผกผันแรงดันโดยใช้วงจรสลับระดับแล้วทำการวัดค่าแรงดันที่ขั้ว V_{OUT} ได้ค่าแรงดันดังแสดงในรูปที่ 9



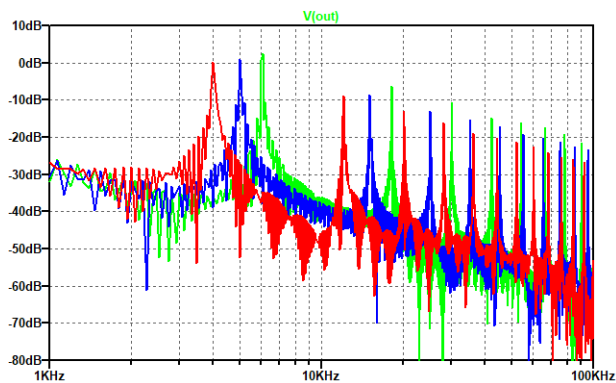
รูปที่ 9 แรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันแบบสลับระดับ

3.3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยแรงดัน

เมื่อกำหนดแรงดันอินพุต V_{CTRL} ของวงจรในรูปที่ 5 ให้ค่าความถี่ 40Hz, 50Hz และ 60Hz มีค่าแรงดันไฟตรงเท่ากับ 1.2V, 1.0V และ 0.8V แล้วจำลองโดยวิธีค่าสั่ง เมื่อทำการวัดสัญญาณทางด้านขั้วออกจะได้ผลลัพธ์ในแกนเวลาของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยแรงดัน ดังในรูปที่ 10(ก) เมื่อวัดคาบเวลาของสัญญาณจะได้ความถี่ 4kHz, 5kHz และ 6kHz ซึ่งแสดงค่าสเปกตรัมของสัญญาณได้ดังรูปที่ 10(ข)



รูปที่ 10(ก) สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณในแกนเวลา

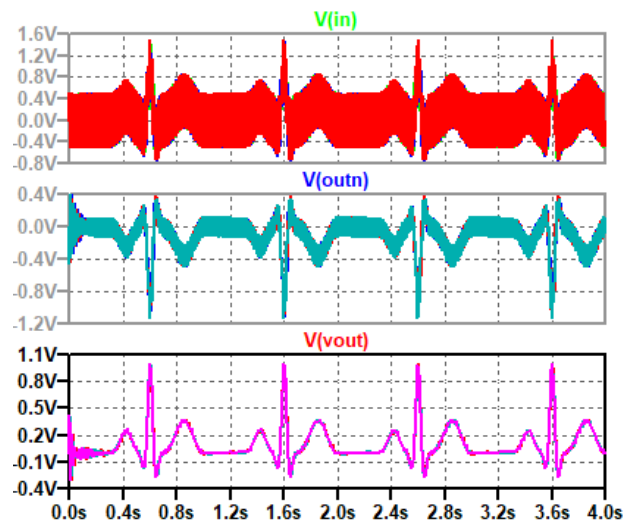


รูปที่ 10(ข) สเปกตรัมของวงจรกำเนิดสัญญาณที่ควบคุมด้วยแรงดัน

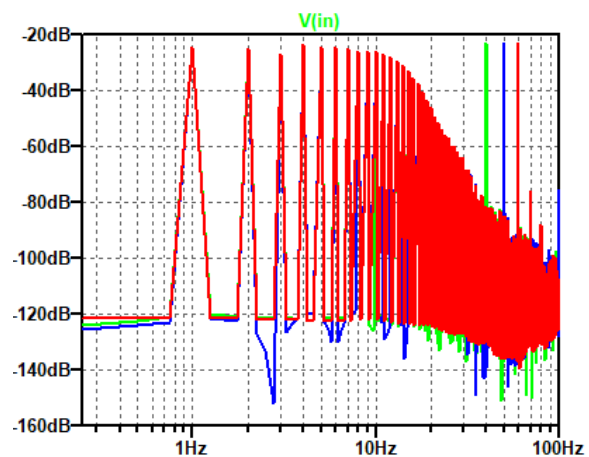
3.4 การจำลองวงจรกรองแถบความถี่หูดผ่านในแกนเวลา

การจำลองในแกนเวลา บทความนี้ใช้สัญญาณไฟฟ้าหัวใจต้นแบบ Vecg ร่วมกับสัญญาณรบกวน VS เป็นคลื่นรูปไซน์ขนาดแรงดัน 0.5V_p ตามในรูปที่ 2(ข) แล้วจำลองโดยวิธีค่าสิ่งที่ความถี่ 40Hz, 50Hz กับ 60Hz ส่วนความถี่สัญญาณนาฬิกาของ LTC1060 มีค่า 100 เท่าของความถี่ VS เมื่อวัดสัญญาณที่ขาของ Vin, V(outn) กับขา V(vout) ได้ลักษณะสัญญาณดังในรูปที่ 11

จากผลลัพธ์ของการจำลองในรูปที่ 11 เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณ V(in) ได้สเปกตรัมของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 12(ก) สังเกตได้ว่าขนาดของสัญญาณรบกวนที่ 40Hz, 50Hz กับ 60Hz มีค่าประมาณ 70dB ส่วนสัญญาณที่ขา V(vout) เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางความถี่จะเห็นว่า ความถี่รบกวนที่ 40Hz, 50Hz กับ 60Hz จะถูกขจัดออกไปดังแสดงในรูปที่ 12(ข)

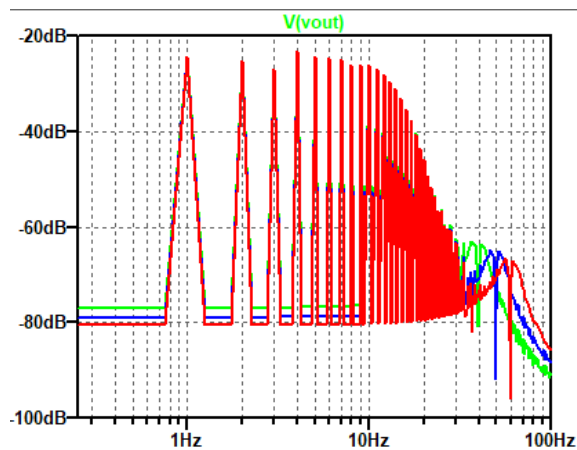


รูปที่ 11 ผลลัพธ์จากการจำลองที่ความถี่อินพุต 40Hz, 50Hz และ 60Hz



(ก) สเปกตรัมของขา Vin

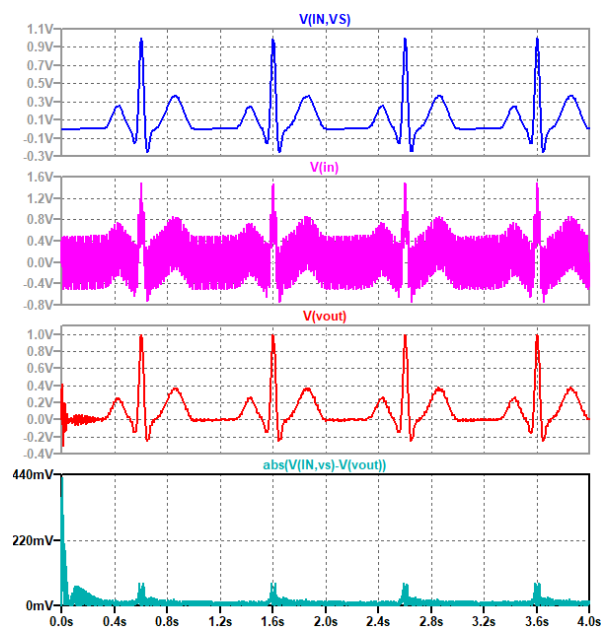
รูปที่ 12 สเปกตรัมทางอินพุตกับเอาต์พุตของวงจร SC-BSF (Cont.)



(ข) สเปกตรัมของหัว Vout

รูปที่ 12 สเปกตรัมทางอินพุตกับเอาต์พุตของวงจร SC-BSF

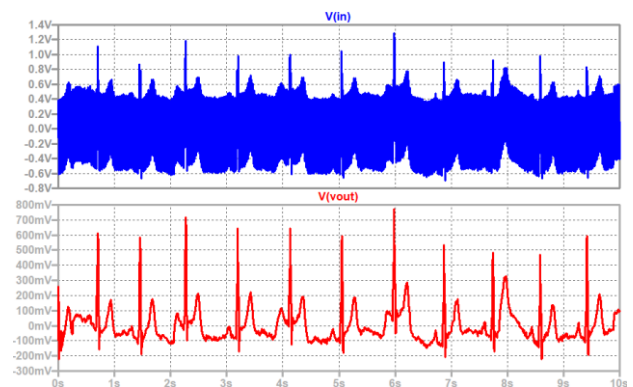
ต่อมากำหนดความถี่ของสัญญาณรบกวนที่ 50Hz แล้วทำการวัดค่าของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจต้นแบบ $V(IN,VS)$ กับวัดสัญญาณอินพุต $V(in)$ ของวงจร SC-BSF และวัดสัญญาณเอาต์พุต $V(vout)$ ตามตัวอย่างในรูปที่ 13 แล้วทำการนำสัญญาณ $V(IN,VS)$ เปรียบเทียบกับสัญญาณ $V(vout)$ ได้ค่าความแตกต่าง $abs(V(IN,vs) - V(vout))$ เมื่อวัดผลต่างในสภาวะคงตัวเพียง 30mV/1V เท่านั้น



รูปที่ 13 เปรียบเทียบสัญญาณต้นแบบกับผลลัพธ์ของวงจร SC-BSF

เมื่อทำการวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจโดยใช้วงจรขยาย AD8232 วัดสัญญาณในมาตรฐาน Limb Lead ของ Lead I แล้วใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น MDO3014 แล้วบันทึกสัญญาณในรูปค่าที่คั่นด้วยเครื่องหมายจุลภาค (Comma Separated Value ; CSV) แล้วนำเข้าไปยังจำลองในวงจรกรองแถบความถี่หูดผ่านที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นทำการวัดสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตของวงจร ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 14

ต่อมาทำการวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อหาค่าความถี่กับขนาด ทั้งอินพุตกับเอาต์พุต ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 15 จะเห็นว่าวงจรกรองแถบความถี่หูดผ่านสามารถขจัดสัญญาณรบกวนออกจากคลื่นไฟฟ้าหัวใจได้ถึง 60dB



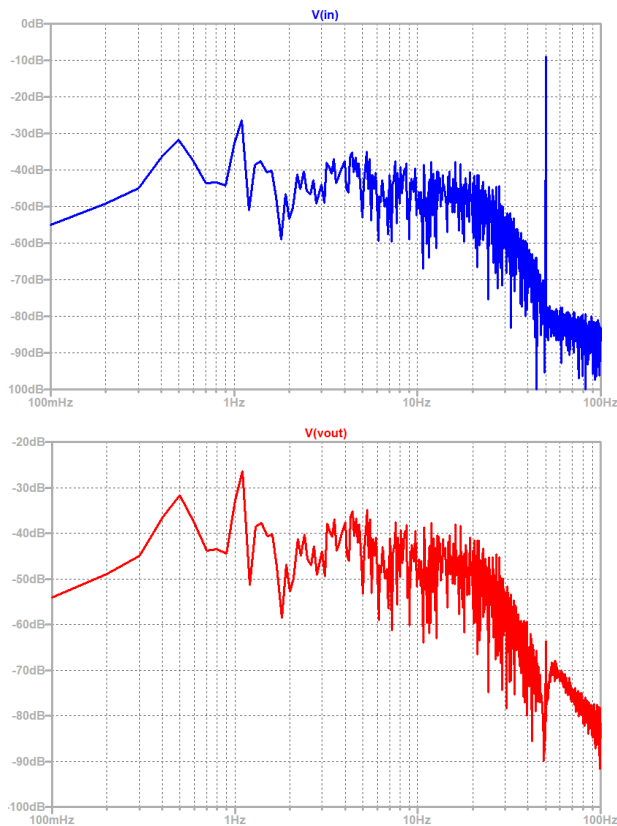
รูปที่ 14 คลื่นไฟฟ้าหัวใจจากร่างกายที่จำลองในโปรแกรม LTSPICE

4. สรุปผลการดำเนินงานของบทความ

จากการออกแบบวงจรทั้งหมดของบทความนี้ ทำให้เห็นว่าการกรองแถบความถี่หูดผ่านแบบปรับตัวได้ของบทความนี้ มีโครงสร้างวงจรเล็ก สามารถใช้เป็นแนวทางออกแบบวงจรรวมแบบชิพเดียวได้ สามารถปรับตัวตามความถี่สล็อตแทรก ที่ปะปนมากับสัญญาณหัวใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อพิจารณาในด้านความแม่นยำของความถี่จัด จากรูปที่ 6 จะเห็นว่ามีความแม่นยำสูงเทียบเท่าวงจรกรองแบบดิจิตอล (Digital filter) ที่มีวงจรขนาดใหญ่และมีราคาแพง ในเรื่องอัตราการลดทอนสัญญาณของบทความนี้มีอัตราจัดถึง 75dB และตัวประกอบคุณภาพสูงทำให้มีแถบขจัดที่แคบมาก เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวงจรกรองความถี่ปรับตัวได้โดยใช้วิธีสังเคราะห์ความถี่ (FS-ANF)[5]

ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าดังตารางที่ 2



รูปที่ 15 สเปกตรัมคลื่นไฟฟ้าหัวใจจากวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบวงจรกรอง FS-ANF กับ SC-BSF

รายละเอียด	FS-ANF	SC-BSF
อัตราการลดทอน	-40	-75
ตัวประกอบคุณภาพ	8	9
ขนาดวงจรรวม	ใหญ่	เล็ก

ในการจำลองเพื่อหาค่าผิดพลาดของสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจต้นแบบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวงจรกรอง SC-BSF ตามรูปที่ 13 จะเห็นว่าช่วงเวลาของ QRS-Complex มีความผิดพลาดประมาณ 75mV/V ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณนาฬิกาในรูปที่ 8 ทำให้ไม่มีสัญญาณนาฬิกาไปกำหนดแถบความถี่ให้กับวงจรกรอง SC-BSF ส่วนช่วงคลื่นอื่น ๆ ของสัญญาณมีค่าผิดพลาดน้อยกว่า 25mV/V

ข้อด้อยของบทความนี้คือวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน ที่มีช่วง

พลวัตแคบซึ่งมีช่วงของแรงดัน 0.8V - 1.2V เท่านั้น แต่ก็เพียงพอต่อการปรับตัวของวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่านของบทความนี้

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับคำปรึกษาจากคุณสุริยา วิทยาประดิษฐ์ วิศวกรประจำศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ ของบริษัทวิจัยและพัฒนา จำกัด สังกัดมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และขอขอบคุณ รศ.ดร.สุชาติา สิทธิจึงสถาพร ที่ได้ส่งเสริมและสนับสนุนงานวิจัยในบทความนี้จนลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] L.G. Bustamante, R.H. Strandberg and M.A. Soderstrand, "Switched-Capacitor Adaptive Sampling Rate Notch Filter for Enhancement and Elimination of Bandpass Signals", Proceeding of the 40th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Volume 2, 3 - 6 August 1997, pp. 1354 - 1357.
- [2] L.G.Bustamante, M.A.Soderstrand, "High-Range Switched-Capacitor Tracking Filter" Circuits and Systems (ISCAS '99). Proceeding of the 1999 IEEE International Symposium on Volume: 2, IEEE 1999, pp. 65 - 68.
- [3] S.Witthayapradit, S.Chitwong, S.Tumthong, "Tracking Notch Filter for Electrocardiograph Measurement", IEEE Trans. On CCECE/CCGEI, Ottawa May 2006, pp.187 - 190.
- [4] Patrick E.McSharry, Gari D.Clifford, Lionel Tarassenko and Leonard A.Smith, "A Dynamical Model for Generating Synthetic Electrocardiogram Signals", IEEE Transaction on Biomedical Engineering, p.289 - 294, Vol.50, No.3, March 2003.
- [5] ทองประเสริฐ ฤคำไพโร, ชัยวัฒน์ พิพัฒน์กุล, สุริยา วิทยาประดิษฐ์, "วงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่านแบบปรับตัวสำหรับการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ", P.1327-1330, EECON-32, Vol.2, 28 - 30 October 2009, Prachinburi, 2552.
- [6] Tanji, A.K., Jr.; de Brito, M.A.G.; Alves, M.G.; Garcia, R.C.; Chen, G.-L.; Ama, N.R.N. "Improved Noise Cancelling Algorithm for Electrocardiogram Based on Moving Average Adaptive Filter", Electronics 2021, 10, 2366.[On-line] <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/19/2366>



กรณิการ์ มุลโพธิ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีและปริญญาเอก วิศวกรรมไฟฟ้า สาขาอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปี พ.ศ.2544 และ พ.ศ.2549 ตามลำดับ เริ่มทำงานที่ภาควิชาวิศวกรรมระบบวัดคุมและเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปี พ.ศ.2549 ถึงปัจจุบัน มีความสนใจในงานด้านออกแบบวงจรรวมที่ใช้พลังงานและแรงดันต่ำ งานด้านระบบควบคุมอัตโนมัติ และนวัตกรรมหุ่นยนต์