

2012-447 Electronics Engineering Laboratory

Module: วจรอข่ายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ และการประมวลผลสัญญาณเบื้องต้น

Part C: การลดสัญญาณรบกวนด้วยการประมวลผลดิจิทัล

เอกสารนี้ ปริมังคลาร์คเมีย (rev.1 สิงหาคม 2564, rev.2 สิงหาคม 2565)

สุพัฒนา เอื้อทวีเกียรติ (ตุลาคม 2562)

สรุปทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. สัญญาณรบกวนที่เกิดจากสัญญาณไซน์ความถี่คงที่

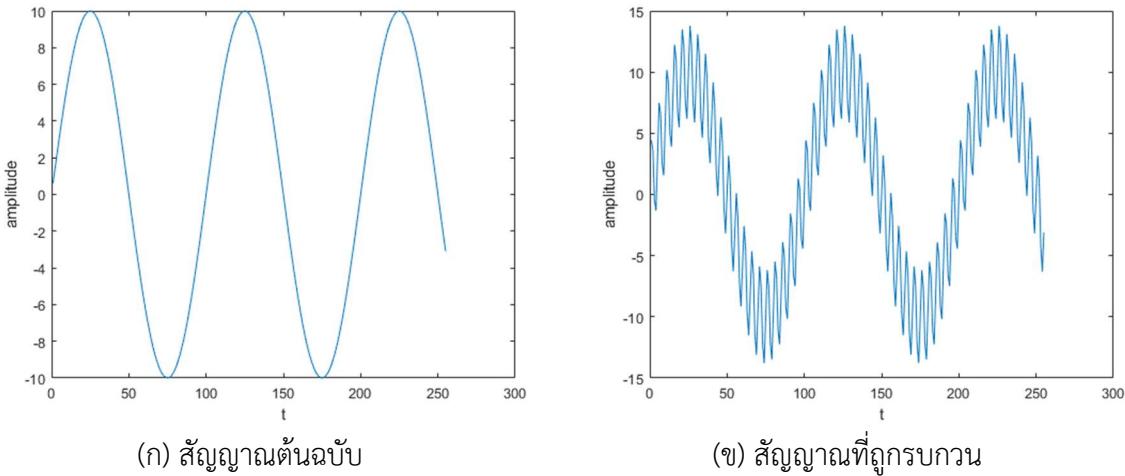
ในการรับส่งสัญญาณนั้นอาจมีรบกวนจากแหล่งกำเนิดสัญญาณใดๆที่มีความถี่คงที่ ส่งผลให้สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปตามจังหวะของสัญญาณไซน์ความถี่นั้นๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ (1) เมื่อรูป (ก) และ (ข) แสดงสัญญาณไซน์ความถี่ 0.01 Hz และสัญญาณในรูป (ก) ที่มีรบกวนด้วยสัญญาณไซน์ความถี่ 0.2 Hz ตามลำดับจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์เป็นการรวมสัญญาณไซน์สองสัญญาณ และสามารถเขียนสมการแสดงสัญญาณที่ถูกรบกวน ($y(t)$) ได้ดังสมการที่ (1)

$$y(t) = x(t) + n(t) = x(t) + a \cos(2\pi f_n t) \quad (1)$$

เมื่อ $x(t)$ และ $n(t) = a \cos(2\pi f_n t)$ คือ สัญญาณตั้งต้น และสัญญาณรบกวนตามลำดับ

เมื่อแปลงสัญญาณ $y(t)$ ในสมการที่ (1) ด้วยการแปลงแบบฟูเรียร์แล้วจะได่องค์ประกอบความถี่ f_n เพิ่มขึ้นจากสัญญาณเดิม ดังนั้นการแก้ปัญหาการกรองแบบนี้ทำได้ง่ายด้วยการใช้วงจรกรอง (Filter) แบบ Band Stop หรือ Band Reject ที่ตัดสัญญาณในช่วงความถี่ f_n ออกไป ทั้งนี้เราสามารถวิเคราะห์ความถี่ f_n ได้ด้วยการแปลงสัญญาณที่ได้รับด้วยการแปลงแบบฟูเรียร์ แล้วตรวจสอบหาองค์ประกอบความถี่ที่ไม่ตรงกับองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณตั้งต้น

การรบกวนในรูปแบบนี้พบได้บ่อย โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้เซนเซอร์วัดค่าแบบไม่มีการป้องกันสัญญาณรบกวน (Shield) ซึ่งส่งผลให้มีสัญญาณรบกวนความถี่ 50 Hz จากสายไฟเข้ามาในระบบ



รูปที่ (1) ตัวอย่างสัญญาณไซน์ความถี่ 0.01 Hz ที่ถูกกรองด้วยสัญญาณไซน์ความถี่ 0.2 Hz

2. การแปลงสัญญาณฟูเรียร์แบบวิชุต (Discrete Fourier transform)

การแปลงฟูเรียร์แบบวิชุตเป็นกรรมวิธีที่นิยมใช้เพื่อห้องค์ประกอบความถี่ของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา โดยมีลักษณะที่แตกต่างจากการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาที่เรียนในวิชา 2102201 EE Maths I ดังนี้

(1) **ไม่ใช้ข้อมูลเวลาในการคำนวณ** กล่าวคือพิจารณาสัญญาณที่ได้รับเป็นสัญญาณตัวที่ 0 1 2 3 ... ทั้งนี้

ข้อมูลเวลาสามารถอ้างอิงได้จากความถี่ของการสุ่มสัญญาณ (Sampling frequency) กล่าวคือ หากกำหนดให้ความถี่ของการสุ่มเท่ากับ f_s Hz และสัญญาณตัวที่ 0 เกิดที่เวลา $t = 0$ s แล้ว สัญญาณตัวที่ n เกิดที่เวลา $t = nf_s^{-1}$ s

(2) **สัญญาณที่ใช้ในการประมวลผลทางปฏิบัติมีความยาวจำกัด** สมการการแปลงฟูเรียร์แบบวิชุตจึงมีลักษณะเป็นการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่มีคาบ (Periodic signal) ดังนั้นหากสัญญาณที่ได้มีความยาว N ตัวแล้วจะพิจารณาเป็นการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่มีคาบท่อกับ N

จากสมบัติที่แตกต่างกันนี้จึงส่งผลให้การแปลงฟูเรียร์แบบวิชุตมีลักษณะเหมือนกับการทำอนุกรมฟูเรียร์ และได้การแปลงไป (Forward transform) และแปลง回去 (Inverse transform) ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$X(k) = \mathcal{F}x(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (2)$$

$$x(n) = \mathcal{F}^{-1}X(k) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (3)$$

เมื่อ $x(n)$ และ $X(k)$ คือสัญญาณที่แสดงในโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ตามลำดับ และ ความถี่แสดงในรูป k รอบต่อ N สัญญาณ และ $k = 0, 1, \dots, N - 1$

อนึ่งพจน์ $\frac{1}{N}$ ในสมการที่ (2) สามารถย้ายไปอยู่ในสมการที่ (3) ได้ เนื่องจากสารบัญพิจารณาพจน์ $\frac{1}{N}$ เป็นพจน์ที่ใช้เพื่อปรับขนาดของ $\mathcal{F}^{-1}\mathcal{F}x(n)$ ให้เท่ากับสัญญาณตั้งต้น ($x(n)$) ซึ่งการปรับขนาดจะอยู่ที่การแปลงไปหรือการแปลงผกผันก็ได้

เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง k กับความถี่สัญญาณจริง (f) ได้โดยการเทียบกำลังของ e^{j} ในสมการที่ (2) ($e^{-\frac{j2\pi kn}{N}}$) กับกำลังในการแปลงฟูเรียร์ ($e^{-j\omega t} = e^{-j2\pi f}$) ได้เป็น

$$\frac{kn}{N} = ft$$

สัญญาณตัวที่ n เกิดที่เวลา $t = nf_s^{-1}$ s ดังนั้น

$$\frac{kn}{N} = f(nf_s^{-1})$$

ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง k ในสมการที่ (2) และ (3) กับความถี่ของสัญญาณเป็นดังสมการที่ (4)

$$f_k = \frac{k}{N}f_s \quad (4)$$

จากข้อกำหนดที่ $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ เราสามารถสรุปได้ว่าการแปลงฟูเรียร์แบบวิทยุสามารถแยกองค์ประกอบความถี่สูงสุดไม่เกินความถี่ของการสุ่ม (f_s) และความถี่แยกระยะเดียวได้แล้วโดยเดียว แต่ความถี่สูงสุดที่แสดงได้ยังคงเดิมคือ f_s ดังตัวอย่างในรูปที่ (2)(x) ซึ่งแสดงผลการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณในรูป (2)(g) ที่ใช้ความยาวสัญญาณต่างกัน เส้นประสีแดงซึ่งเป็นผลการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่มีความยาวสัญญาณเป็น 10 เท่าของเส้นทึบสีฟ้าแสดงความถี่องค์ประกอบความถี่สัญญาณไซน์เป็นสองความถี่เดียวกัน แต่ความถี่สูงสุดเท่ากันคือ f_s

จากรูปที่ (2)(x) ยังแสดงให้เห็นว่าการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณค่าจริงให้ผลลัพธ์ที่มีขนาดสมมาตรกัน ด้านซ้ายและขวา โดยสารบัญพิสูจน์ได้ว่าผลการแปลงฟูเรียร์คู่ซ้าย และคู่ขวาเป็นค่าสัมบูค (Conjugate) ซึ่งกันและกันดังนี้

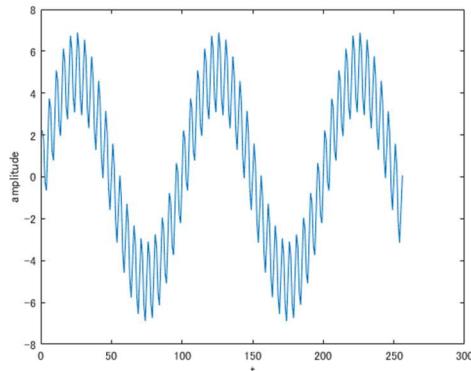
พิจารณาผลการแปลงฟูเรียร์เมื่อ $k = N - \kappa$, $\kappa = 0, 1, 2, \dots, 0.5N - 1$

$$X(N - \kappa) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi(N-\kappa)n/N} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi} e^{j2\pi\kappa n/N} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left(e^{-j2\pi\kappa n/N} \right)^*$$

เนื่องจาก $x(n)$ เป็นฟังก์ชันค่าจริง จึงสามารถนำเข้าไปคูณกับพจน์ที่ถูกสังยุคได้

$$X(N - \kappa) = \sum_{n=0}^{N-1} \left(x(n)e^{-j2\pi\kappa n/N} \right)^* = \left(\sum_{n=0}^{N-1} \left(x(n)e^{-j2\pi\kappa n/N} \right) \right)^* = (X(\kappa))^*$$

กล่าวคือ $X(N - \kappa)$ คือค่าสังยุคของ $X(\kappa)$ ดังนั้นในการแปลงฟูเรียร์แบบวิทยุของฟังก์ชันค่าจริงจึงนิยมแสดงค่าเฉพาะช่วง $k = 0, 1, 2, \dots, 0.5N - 1$ เท่านั้น และหากจำเป็นต้องพิจารณาขนาดของสัญญาณแล้วให้แสดงเป็นขนาด 2 เท่าของค่าตั้งต้น

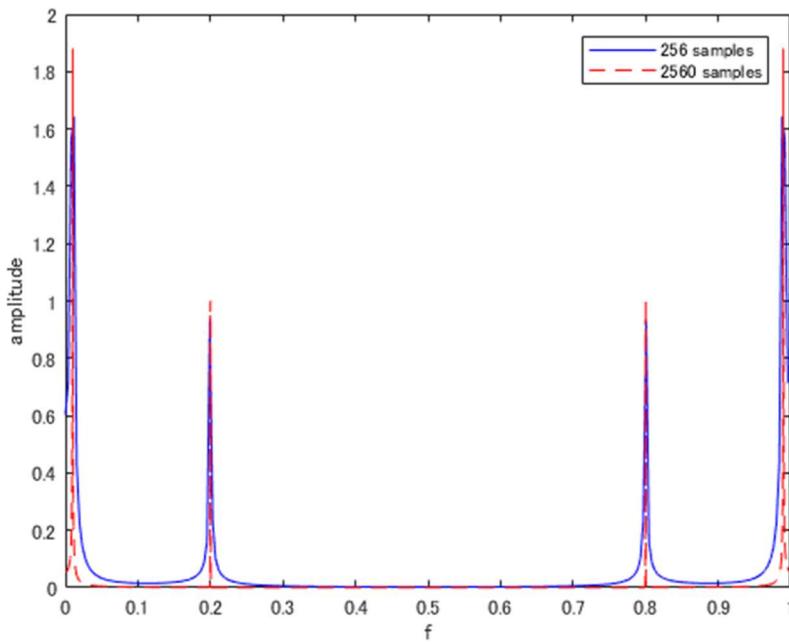


(ก) สัญญาณไซน์ความถี่ 0.01 Hz ที่ถูกกรนด้วยสัญญาณไซน์ความถี่ 0.2 Hz

จากสมบัติของความสมมาตรของสัญญาณ ทำให้ความสามารถของการแยกองค์ประกอบความถี่สัญญาณสูงสุดเหลือเพียง $0.5f_s$ Hz เท่านั้น ดังนั้นหากเราต้องการวิเคราะห์สัญญาณความถี่สูงสุดเป็น f Hz แล้วจำเป็นต้องสุ่มสัญญาณด้วยความถี่อย่างต่ำ $2f$ Hz (ทฤษฎีของ Nyquist)

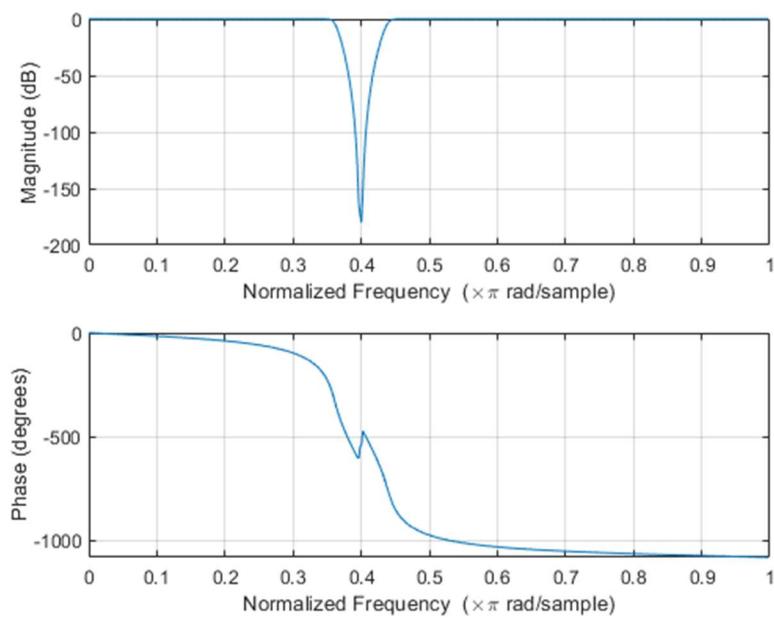
3. วงจรกรอง Notch (Notch filter)

เราสามารถใช้วงจรกรองทั่วไปทำเป็นวงจรแบบ Band Stop ได้ดังตัวอย่างในรูปที่ (3) ซึ่งแสดงผลตอบของวงจรกรองแบบ Butterworth อันดับที่ 7 เมื่อใช้ตัดสัญญาณที่ f/f_s เท่ากับ 0.4 ได้ แต่หากต้องการให้ช่วงที่ตัดสัญญาณแคบมากแล้วต้องอาศัยวงจรฟิลเตอร์อันดับสูง ยุ่งยากต่อการคำนวณ



(ก) ขนาดของผลการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณในรูป (ก)

รูปที่ (2) ตัวอย่างการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณในรูป (ก) ที่สุดตัวยความยาวข้อมูลต่างกัน เส้นทึบสีน้ำเงิน และเส้นประสีแดงแสดงผลการแปลงสัญญาณความยาว 256 และ 2560 ข้อมูลตามลำดับ



รูปที่ (3) ผลตอบสนองของวงจรกรอง Butterworth อันดับที่ 7 แบบ Band Stop ที่ตัดความถี่ $2\pi f/f_s$
บริเวณ 0.36π ถึง 0.44π

เพื่อความสะดวกจึงมีการออกแบบแบบวงจรกรองโดยเฉพาะที่ใช้ตัดสัญญาณที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งที่เรียกว่า วงจรกรอง Notch ขึ้น โดย Transfer function ของวงจรกรอง Notch อันดับที่ 2 เที่ยวนี้ได้ดังนี้

$$H(z) = \alpha \frac{1 - 2 \cos \omega_n z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2r \cos \omega_n z^{-1} + r^2 z^{-2}} \quad (5)$$

เมื่อ r ใช้ควบคุมขนาดของ Band stop โดย r ยิ่งมากบริเวณช่วง Band stop จะยิ่งแคบดังแสดงในรูปที่ (4)

α คือค่าที่ใช้ Normalize ให้ผลลัพธ์ของ $H(z)$ มีขนาดเป็น 1 และ ω_n คือความถี่ของสัญญาณที่ต้องการตัดออก โดยมีนิยามดังสมการที่ (6)

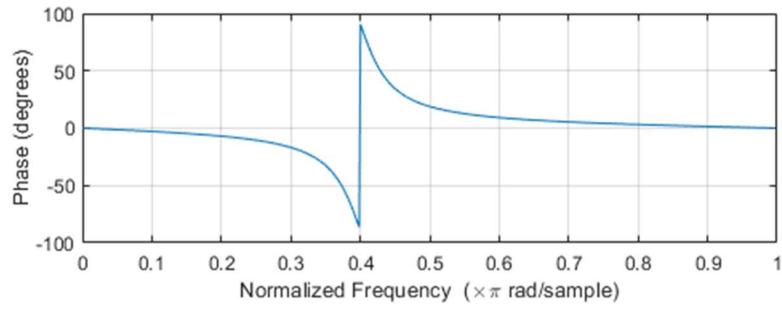
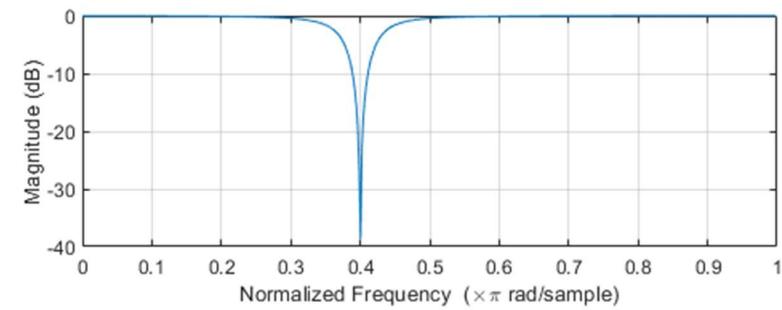
$$\omega_n = 2\pi \frac{f_0}{f_s} \quad (6)$$

เมื่อ f_0 คือความถี่ที่ต้องการให้วงจรกรอง Notch ตัดออก

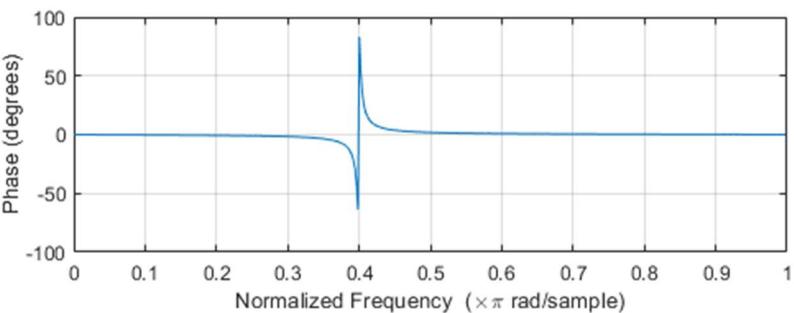
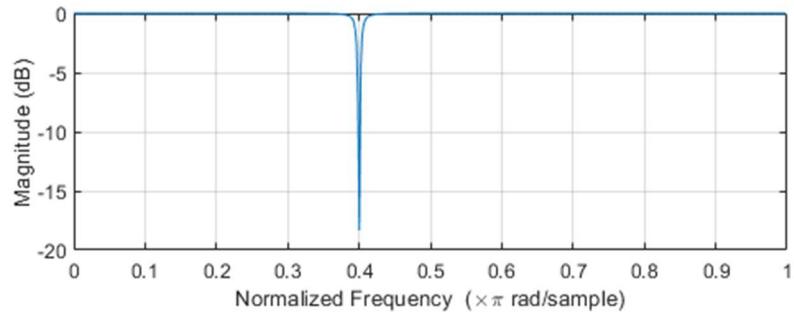
วงจรกรอง Notch ตามสมการที่ (5) สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาสัญญาณรบกวนได้ง่าย ดังเช่นหากต้องการลดสัญญาณรบกวนในรูปที่ (1)(x) และ เริ่มจากคำนวณ ω_n ตามสมการที่ (6) เมื่อ $f_0 = 0.2$ Hz และ $f_s = 1$ Hz ได้ $\omega_n = 0.4\pi$ แทนในสมการที่ (5) ได้วงจรกรองที่มี Transfer function เป็น

$$H(z) = \alpha \frac{1 - 2 \cos(0.4\pi) z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2r \cos(0.4\pi) z^{-1} + r^2 z^{-2}}$$

เมื่อนำวงจรกรองนี้ไปกรองสัญญาณในรูปที่ (1)(x) และได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ (5) ซึ่งแสดงผลลัพธ์ของการกรองสัญญาณเมื่อ r เท่ากับ 0.9 สังเกตผลลัพธ์ของการกรองในช่วงแรกจะยังผิดเพี้ยนอยู่เนื่องจากวงจรกรองประเภทนี้ต้องอาศัยข้อมูลจำนวนหนึ่งก่อนถึงจะกรองได้อย่างสมบูรณ์ และหากเพิ่มค่า r ไปเป็น 0.99 และพบว่างจรกรองต้องอาศัยข้อมูลจำนวนมากขึ้นถึงจะกรองได้อย่างมีประสิทธิภาพดังแสดงในรูปที่ (6) แต่หากพิจารณาในเรื่องสเปกตรัมของสัญญาณแล้วเห็นได้ว่ามีลักษณะคล้ายกัน

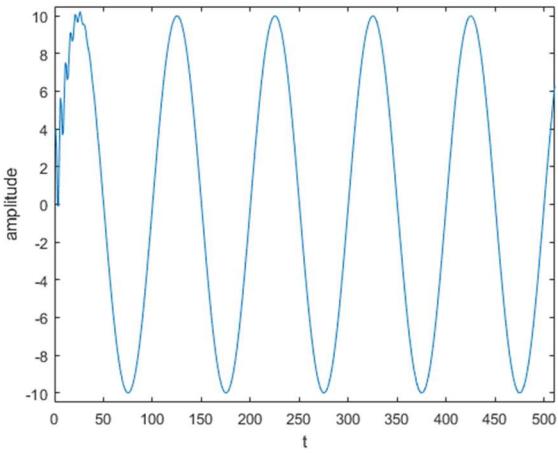


(n) $r = 0.9$

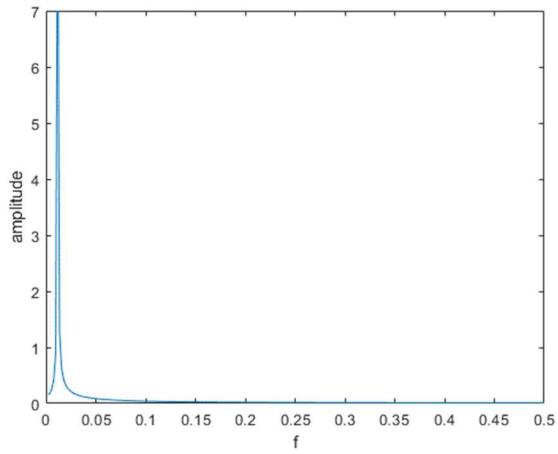


(ŋ) $r = 0.99$

รูปที่ (4) ผลตอบสนองของวงจรกรองแบบ Notch อันดับที่ 2 ที่ตัดความถี่ $2\pi f/f_s$ บริเวณ 0.4π

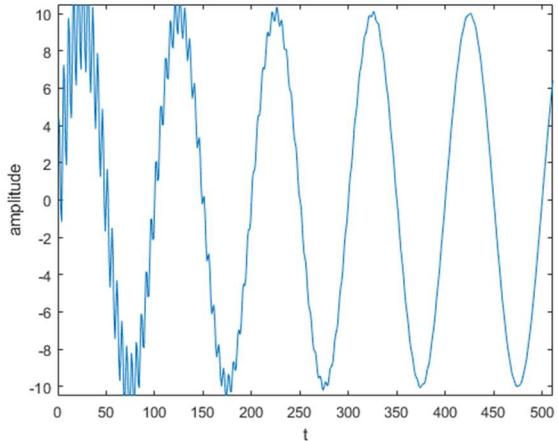


(ก) ผลตอบเชิงเวลา

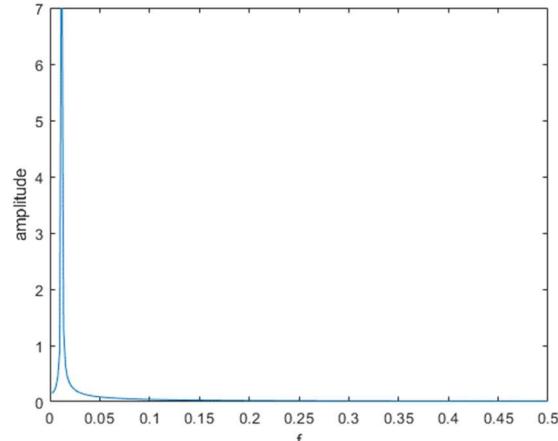


(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ

รูปที่ (5) ผลการกรองสัญญาณในรูปที่ (1)(ข) ด้วยวงจรกรอง Notch เมื่อ $\omega_n = 0.4\pi$ และ $r = 0.9$



(ก) ผลตอบเชิงเวลา



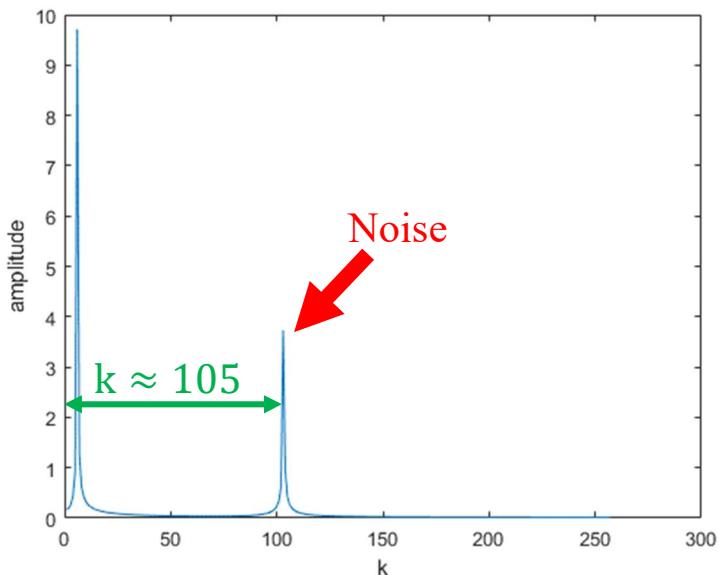
(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ

รูปที่ (6) ผลการกรองสัญญาณในรูปที่ (1)(ข) ด้วยวงจรกรอง Notch เมื่อ $\omega_n = 0.4\pi$ และ $r = 0.99$

ในทางปฏิบัติ เรายาไม่ทราบความถี่ของสัญญาณรบกวนที่แน่นอน และรวมไปถึงความถี่ของการสุ่มสัญญาณ ในกรณีนี้ให้ใช้ผลการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณมาช่วยวิเคราะห์ได้ ดังเช่นหากเราไม่ทราบค่าความถี่ของสัญญาณรบกวน และสัญญาณสุ่มในรูปที่ (1)(ข) และให้ใช้การแปลงฟูเรียร์เพื่อหาสเปกตรัมของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ (7) เมื่อแกน x แสดงค่า k เราสามารถคำนวณอัตราส่วนระหว่าง f_0/f_s โดยอาศัยสมการที่ (4) ได้เป็น

$$\frac{f_0}{f_s} = \frac{k}{N} \quad (7)$$

จากรูปสามารถประมาณ f_0/f_s ได้เท่ากับ $\frac{105}{512} = 0.205$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ใช้จริง



รูปที่ (7) สเปกตรัมของสัญญาณในรูปที่ (1)(ข) เมื่อมีสัญญาณจำนวน 512 ข้อมูล

สังเกตว่าในการวิเคราะห์ครั้งนี้เรามีได้สัมใจขนาดของสัญญาณเลย
เป็นการวิเคราะห์ในเชิงรูปร่าง²
มากกว่า ดังนั้นเราสามารถลดเลี้ยงจน $1/N$ และการคูณ 2 เวลาที่แสดงสเปกตรัมเพียงครึ่งเดียวได้

การทดลอง

4. การทดลอง

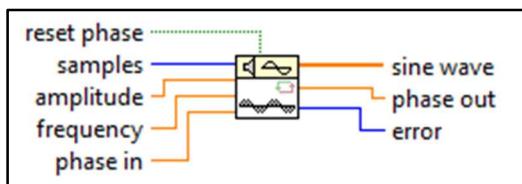
จุดประสงค์

- (1) สามารถใช้โปรแกรม LabVIEW ทำการแปลงแบบฟูเรียร์ของสัญญาณได้
- (2) สามารถใช้โปรแกรม LabVIEW สร้างวงจรกรองแบบ IIR ได้
- (3) สามารถใช้โปรแกรม LabVIEW กรองสัญญาณรบกวนในสัญญาณ ECG ได้

4.1. การหาความถี่ของสัญญาณรบกวนแบบไหน์ความถี่คงที่ด้วยการแปลงแบบฟูเรียร์

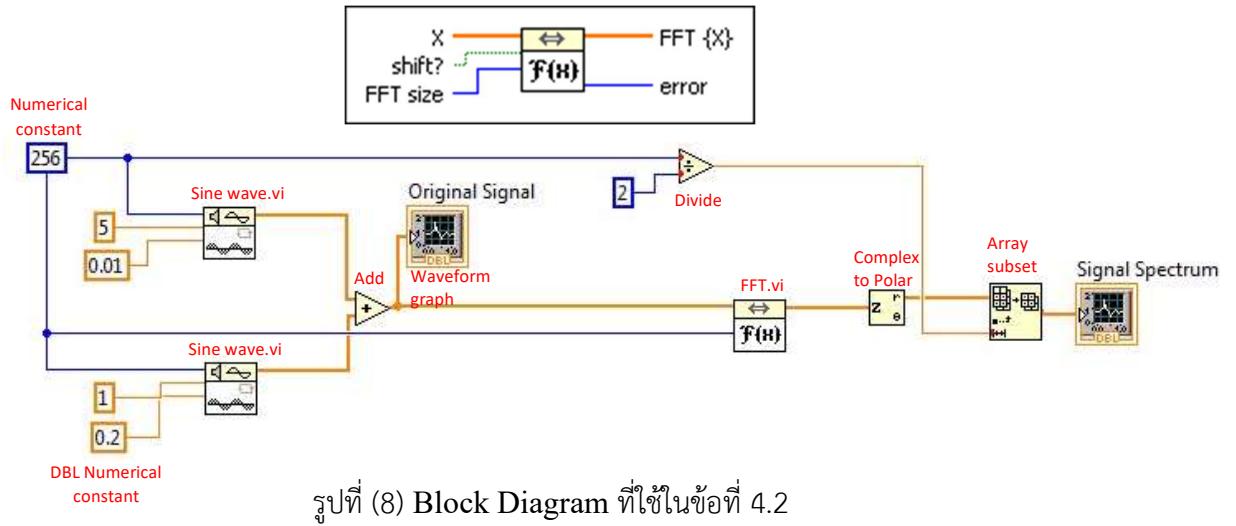
- (1) สัญญาณที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นผลรวมของสัญญาณไซน์สองความถี่ โดยมีรายละเอียดดังนี้
 - i. ความยาวของสัญญาณทั้งสองเท่ากับ 256 Samples
 - ii. สัญญาณไซน์ตัวที่ 1 แสดงสัญญาณตั้งต้นมี Amplitude เท่ากับ 5 และมีความถี่ เท่ากับ 0.01 Hz (สัญญาณ 100 ตัวแสดงค่าสัญญาณไซน์ 1 คาบ)
 - iii. สัญญาณไซน์ตัวที่ 2 แสดงสัญญาณรบกวนมี Amplitude เท่ากับ 1 และมีความถี่ เท่ากับ 0.2 Hz (สัญญาณ 5 ตัวแสดงค่าสัญญาณไซน์ 1 คาบ)
 - iv. นำสัญญาณทั้งสองมารวมกัน

- (2) สัญญาณที่ใช้ในการทดลองนี้สร้างจาก Block ภายใน Signal Processing Toolbox โดยมีรายละเอียดดังนี้



- (3) ใช้บล็อก FFT¹ ภายใน Transform vi ใน Signal Processing Toolbox เพื่อหาองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณในข้อ (1) เมื่อ X คือสัญญาณที่เราต้องการทำการแปลงฟูเรียร์ และ FFT Size คือความยาวของสัญญาณ และ FFT {X} คือผลลัพธ์ที่ได้

¹ การแปลงฟูเรียร์แบบวิยุตในโปรแกรม LabVIEW ใช้กรวยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) (นิสิตที่สนใจสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Internet เช่น Wikipedia หรือจากบทความ Bergland, G. D. "A Guided Tour of the Fast Fourier Transform." *IEEE Spectrum* **6**, 41-52, July 1969 ได้) ประสิทธิภาพของการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ดีที่สุดถ้าความยาวของสัญญาณเป็นกำลังของ 2 โดยทั่วไปจะเริ่มจากการสร้างสัญญาณต้นให้มีขนาดเป็น 2^m เมื่อ m คือเลขจำนวนเต็มบวกใดๆ



รูปที่ (8) Block Diagram ที่ใช้ในข้อที่ 4.2

หมายเหตุ การแปลง FFT ในโปรแกรม LabVIEW เป็นสมการที่ (2) ที่ไม่มีพจน์ $1/N$ แต่เนื่องจากในการวิเคราะห์เพื่อหาความถี่ของสัญญาณรบกวน สนใจเฉพาะรูปร่างของขนาดเท่านั้นดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องคูณ $1/N$ เข้าไป

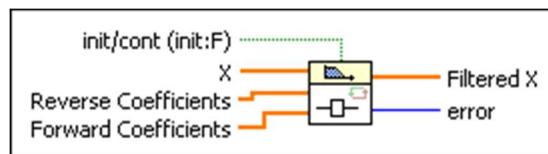
- (4) ผลการแปลงฟูเรียร์แบบบิวต์ให้ขนาดที่สมมาตรกันในช่วง $\frac{f}{f_s}$ เท่ากับ 0 ถึง 0.5 และ 0.5 ถึง 1 จึงตัดแสดงขนาดของผลการแปลงเฉพาะช่วง 1 ถึง 128 เท่านั้นโดยอาศัยบล็อก Array Subset ภายใน Programming → Array และเลือกความยาว (Length) ของ Subset เป็น $\frac{256}{2}$
- (5) บันทึกรูป Signal Spectrum ของสัญญาณ และประมาณค่า f/f_s จากสมการที่ (7) เมื่อแกน x แสดงค่า k และ N คือความยาวของสัญญาณ ($= 256$ ในการทดลองนี้) และพิจารณาว่าค่าที่ได้เพี้ยนจากค่าในอุดมคติ (0.2) ไปมากน้อยเพียงใด เพราะเหตุใด
- (6) ค่าในแกน x ของ FFT ตอนนี้แสดงค่า k ซึ่งก็คือ องค์ประกอบเชิงความถี่ของการแปลง FFT ตัวที่ k ถ้าต้องการให้แสดงค่าความถี่ของสัญญาณจะต้องมีการคูณค่า k ด้วยค่าอัตราส่วนของ f_s/N นิสิตสามารถดัดแปลง Block Diagram ด้านบนให้แสดงเป็นค่าความถี่ของสัญญาณได้ไม่ยากมากนัก

4.2. การสร้างวงจรกรองชนิด Infinite Impulse Response (IIR)

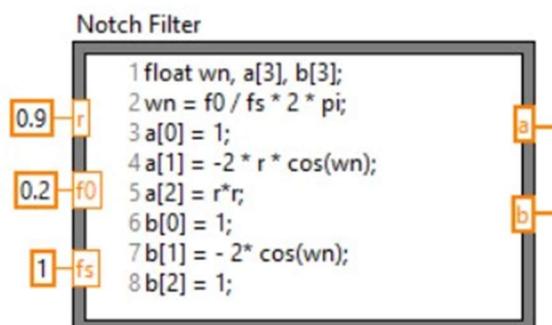
(1) สร้างวงจรกรอง Notch โดยใช้ IIR Filter ตามสมการที่ (5) และมีความถี่ที่ต้องการตัด แสดงในสมการที่ (6) เมื่อสัมประสิทธิ์ที่อยู่หน้า z^{-m} เมื่อ $m = 0, 1, 2, \dots$ ของฟังก์ชันเชิง เป็น Forward coefficients และของฟังก์ชันส่วนเป็น Reverse coefficients เนื่องจากในการกรองสัญญาณนี้เราต้องการให้รูปร่างเหมือนเดิม โดยขนาดอาจเปลี่ยนแปลงไปในสัดส่วนเดียวกัน ดังนั้นเพื่อความง่ายจึงพิจารณาให้ $\alpha = 1$ และสามารถสร้างค่าของ Forward coefficients ($b[\cdot]$) และ Reverse coefficients ($a[\cdot]$) ได้ดังนี้

$$H(z) = \frac{1 - 2 \cos \omega_n z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2r \cos \omega_n z^{-1} + r^2 z^{-2}} = \frac{b[0] + b[1]z^{-1} + b[2]z^{-2}}{a[0] + a[1]z^{-1} + a[2]z^{-2}}$$

วงจรกรอง Notch โดยใช้ IIR Filter.vi ที่อยู่ภายใต้ Signal Processing → Filter → Advanced IIR

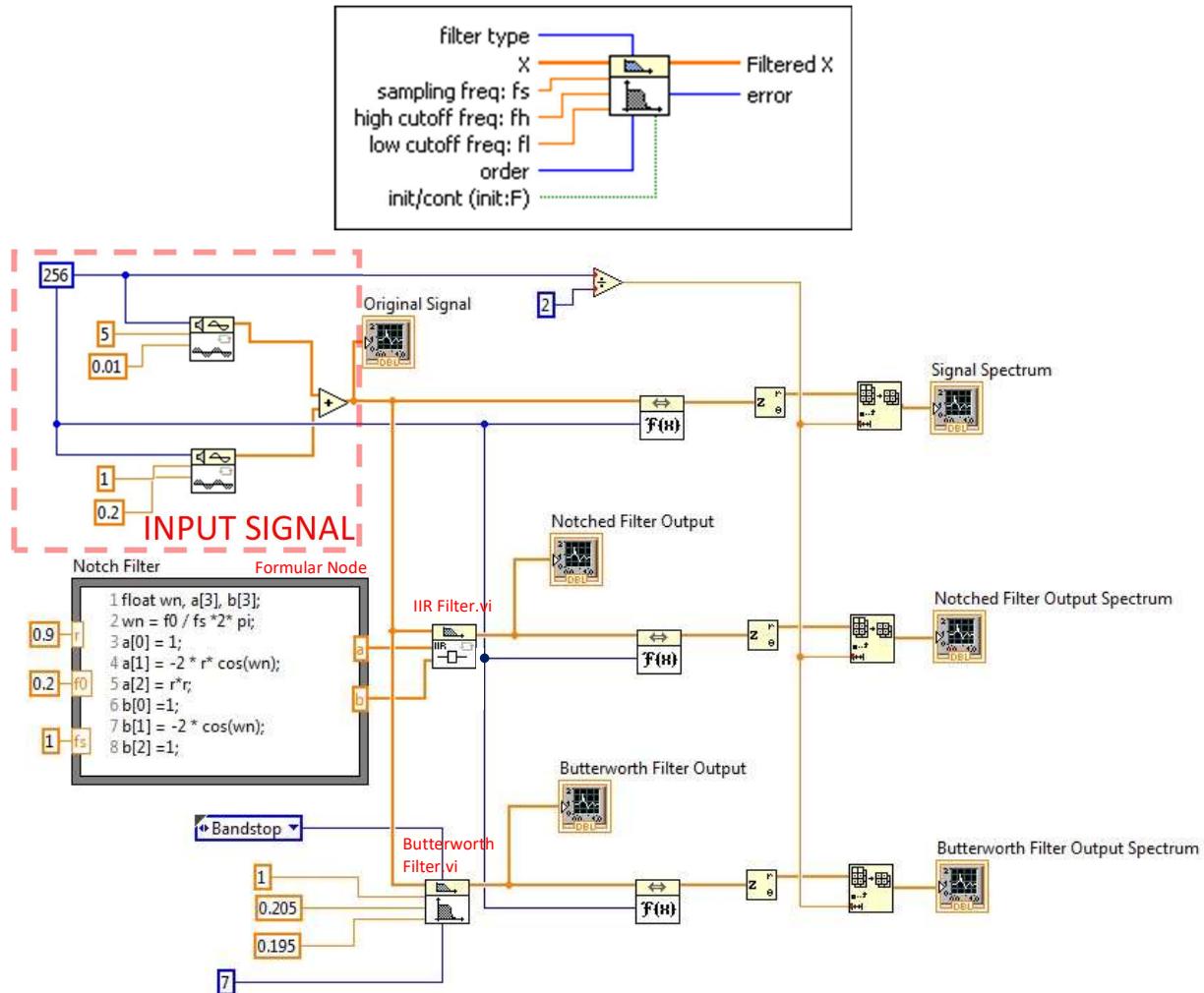


สังเกตว่าค่า $a[\cdot]$ และ $b[\cdot]$ เป็นฟังก์ชันของ ω_n และ r ซึ่งหากต้องแก้ทุกครั้งที่เปลี่ยนค่า ω_n และ/หรือ r และจะเป็นการยุ่งยากจึงอาศัย MathScript Module ใน Programming → Structure เขียน Script สั้นๆ มี Input คือ f_0, f_s และ r และ Output คือ a และ b (เพิ่ม Input และ Output ได้ด้วยการกดปุ่มมาส์ช่วยใน Module) โดยคำสั่งที่ใช้ภายใน MathScript Module แสดงดังรูปที่ (9) นำค่า a และ b เป็น Input ของ IIR Filter.vi



รูปที่ (9) MathScript Module สำหรับสร้างตัวแปรของวงจรกรอง Notch ตามสมการที่ (5) เมื่อ $\alpha = 1$

- (2) สร้างวงจรกรอง Butterworth อันดับ (Order) ที่ 7 โดยอาศัย Butterworth Filter vi ใน Signal processing → Filters สร้างวงจรกรองประเภท (Filter type) Band Stop ซึ่งต้องการความถี่ Cutoff ค่าสูง (f_h) และต่ำ (f_l) ที่ $f_l < f_h < 0.5f_s$ (ในกรณีของวงจรกรองแบบ Low pass และ High pass จะใช้เฉพาะค่า f_l เป็นความถี่ Cutoff)



รูปที่ (10) Block Diagram ที่ใช้ในข้อที่ 4.2

- (3) นำสัญญาณในข้อ 4.2 ผ่านวงจรกรอง Notch และวงจรกรอง Butterworth เมื่อกำหนด

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองทั้งสองดังนี้

- วงจรกรอง Notch $f_s = 1$, $f_0 = \frac{k}{N} f_s$ ที่คำนวณได้ในข้อที่ 4.2 และ $r = 0.9$
- วงจรกรอง Butterworth $f_s = 1$, $f_l = f_0 - 0.5\Delta$, $f_h = f_0 + 0.5\Delta$ เมื่อ $\Delta = 0.01$

หากสัญญาณรบกวนยังปรากฏอยู่ในผลการกรองของวงจรกรอง Notch ให้ลดค่า r และในกรณีของวงจรกรอง Butterworth ให้เพิ่มค่า Δ

(4) บันทึกผลการกรองที่ได้ทั้งในโอดเมนเวลาและโอดเมนความถี่ (スペクト럼) และวิเคราะห์

เปรียบเทียบผลลัพธ์การกรองสัญญาณรบกวนของวงจรกรองแบบ Notch และ แบบ

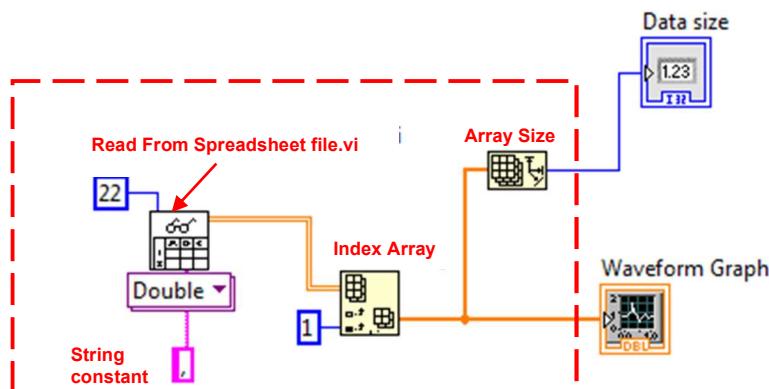
Butterworth ว่าแบบใดดีกว่า และดีกว่าอย่างไร

4.3. การลดสัญญาณรบกวนในสัญญาณ ECG

- (1) เปิดไฟล์สัญญาณ ECG ที่ได้จากการทดลองในการเรียนก่อนหน้านี้ โปรแกรม spreadsheet เช่น Excel ให้ใช้ข้อมูลเวลา เพื่อคำนวณหาค่า f_s และหาจำนวนข้อมูลทั้งหมด N
- (2) เปลี่ยนสัญญาณ Input จากสัญญาณไซน์สองสัญญาณ (บล็อกที่อยู่ภายใต้กล่องเส้นประในรูปที่ (10)) เป็นสัญญาณ ECG ที่ได้จากการทดลองในการเรียนก่อนหน้านี้ ประมาณค่า k/N ของสัญญาณ รบกวนจากสเปกตรัมของสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณรบกวนมาจากแหล่งจ่ายกำลัง 50 Hz ค่า k/N ควรสอดคล้องกับค่า $50/f_s$
- (3) นำค่า $\frac{k}{N}f_s$ แทนใน f_0 ของวงจรกรอง Notch ในรูปที่ (11) แล้วทดลองปรับค่า r ที่ให้ผลลัพธ์ที่มีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด
- (4) ปรับค่า Δ ($f_h = (\frac{k}{N}f_s) + 0.5\Delta$ และ $f_l = (\frac{k}{N}f_s) - 0.5\Delta$) ของวงจรกรอง Butterworth ที่ให้ผลลัพธ์ที่มีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด
- (5) บันทึกสัญญาณสเปกตรัมของสัญญาณ ECG และบันทึกผลลัพธ์ที่ได้จากการกรองของวงจรกรองทั้งสองทั้งในโดยเม้นเวลา และโดยเม่นความถี่ และวิเคราะห์ว่าการลดสัญญาณของวงจรกรองทั้งสองนี้เพียงพอแล้วหรือไม่ อย่างไร รวมถึงปัญหาในการออกแบบวงจรกรอง

จับการทดลอง

หมายเหตุ การอ่านข้อมูลจากไฟล์ที่ได้บันทึกไว้จากการทดลองครั้งที่แล้ว ให้ใช้บล็อกไดอะแกรมดังรูป แทนเข้าไปในส่วนที่เป็นกรอบสีแดง ถ้ามีสิ่ตลองเปิดไฟล์ที่ได้บันทึกไว้ด้วยโปรแกรม spreadsheet เช่น Excel จะพบว่า ส่วนต้นของไฟล์มีส่วน Text ที่อธิบายข้อมูลที่ได้ถูกบันทึกไว้ (ส่วนนี้จะต้องไม่ถูกอ่านเข้ามา ตัวเลข 22 ในบล็อกไดอะแกรม บอกให้ข้ามส่วนต้นของไฟล์ไป 22 อักขระ) ส่วนต่อมาเป็นข้อมูลมี 2 คอลัมน์ คอลัมน์ที่ 1 เป็นข้อมูลเวลา ส่วนคอลัมน์ที่ 2 เป็นข้อมูลของสัญญาณ ECG บล็อกไดอะแกรมข้างล่าง เลือกเฉพาะส่วนคอลัมน์ที่ 2 ซึ่งเป็นส่วนของสัญญาณ ECG ออกมานะ



Read from Spreadsheet File.vi อยู่ใน File I/O เมื่อกด Run จะมี Dialog ให้เลือกไฟล์ปรากฏขึ้นมา

ใบงานประกอบการทดลอง เรื่อง การลดสัญญาณรบกวน
 วันที่ทำการทดลอง 13/09/67

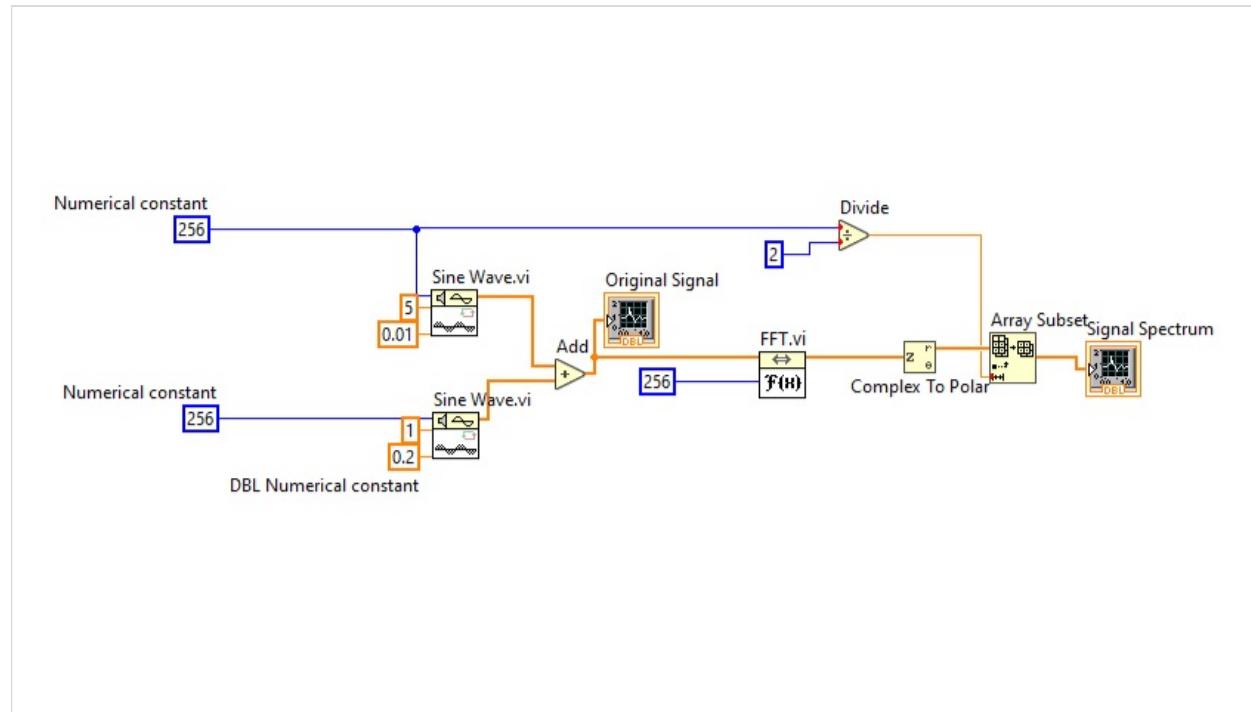
ชื่อ นามสกุล นายธนบดี กรีฟพาร์ด รหัสนิสิต 1430149421 ต่อนเรียนที่ 2 กลุ่มที่ 5
 ชื่อ นามสกุล นายกนกศร อนันต์กุณาวิทย์ รหัสนิสิต 1430032621
 ชื่อ นามสกุล นาฏญาณรักษ์ น่วงน้ำตก รหัสนิสิต 1430084221
 ลายเซ็นต์อาจารย์ผู้ตรวจ ACT

จุดประสงค์

- (1) สามารถใช้โปรแกรม LabVIEW ทำการแปลงแบบฟูเรียร์ของสัญญาณได้
- (2) สามารถใช้โปรแกรม LabVIEW สร้างวงจรกรองแบบ IIR ได้
- (3) สามารถใช้โปรแกรม LabVIEW กรองสัญญาณรบกวนในสัญญาณ ECG ได้

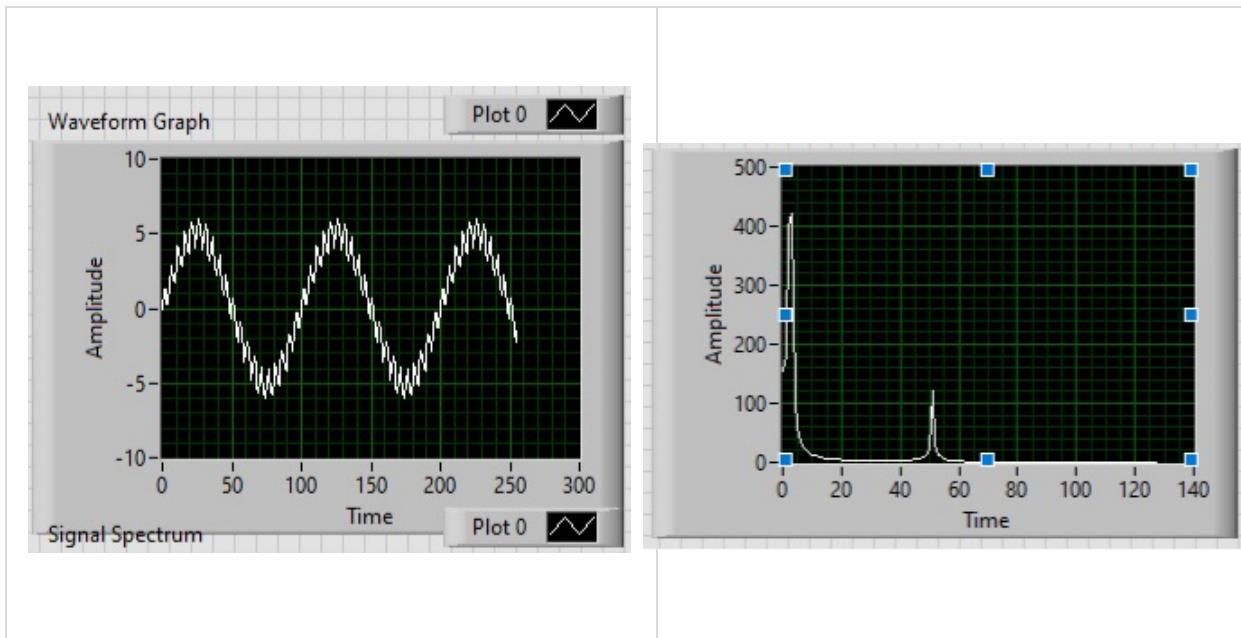
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองข้อ 4.1



รูปที่ (1) Block diagram ที่ใช้ในการทดลองที่ 4.2

ผลการทดลองข้อ 4.1



รูปที่ (2) (ก) สัญญาณเชิงเวลา และ (ข) สเปกตรัมของสัญญาณในการทดลองที่ 4.1

วิเคราะห์ผลการทดลองข้อ 4.1

$$\frac{f_0}{f_s} = \frac{k}{N} \approx \frac{51}{256} = 0.1992$$

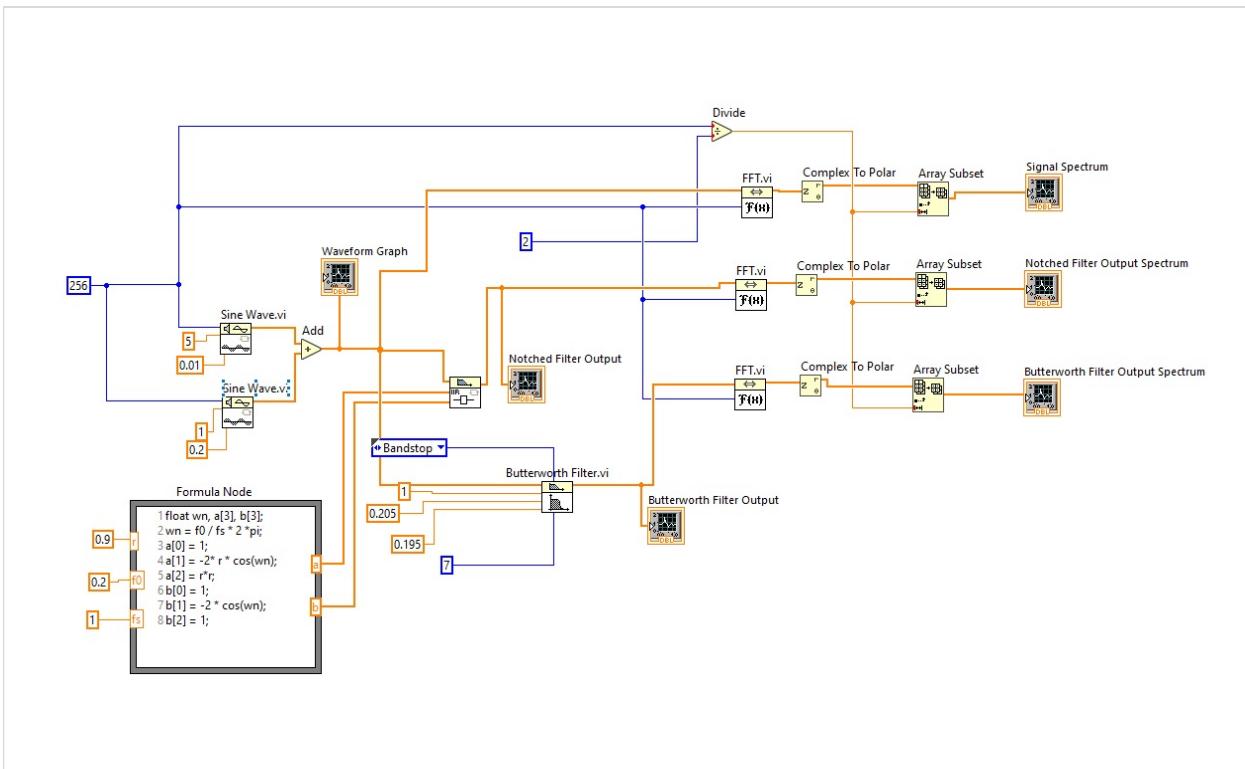
หากรูปจะเทินได้จริง $\frac{f_0}{f_s} \approx 0.1992$ ซึ่งค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้อุตสาหกรรม

ซึ่งค่าประมาณ 0.2

$$\begin{aligned} \% \text{ error} &= \frac{|0.1992 - 0.2|}{0.2} \times 100\% \\ &= 0.4\% \end{aligned}$$

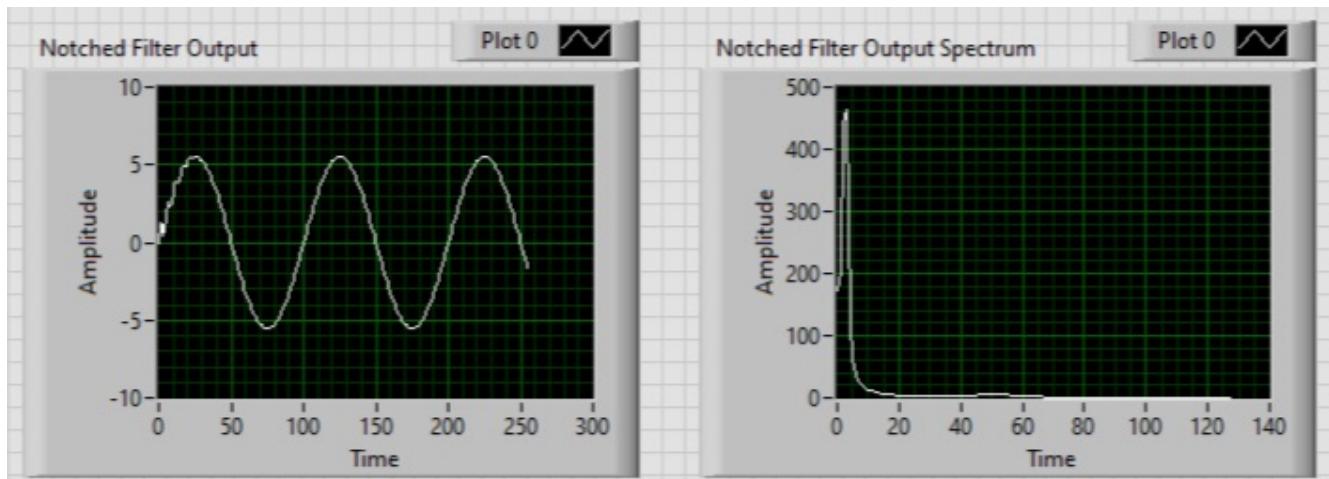
ดังเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนนี้เพียง 2.5% ซึ่งอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อน
ในการปัจจัยภายนอก เช่น การแก้ X ของ spectrum ลักษณะ

การทดลองข้อ 4.2



รูปที่ (3) Block diagram ที่ใช้ในการทดลองที่ 4.2

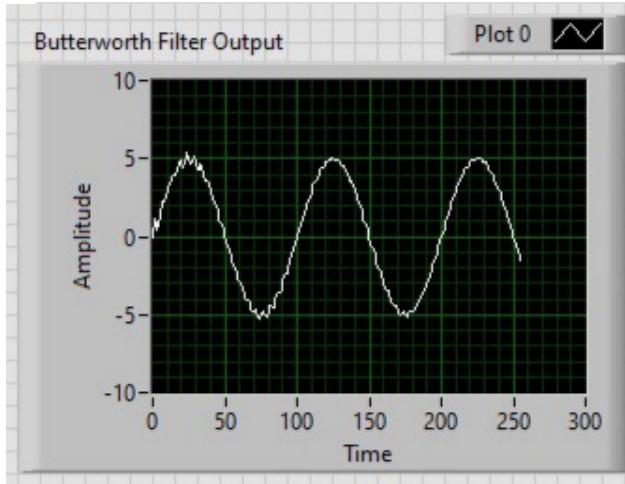
ผลการทดลองข้อ 4.2



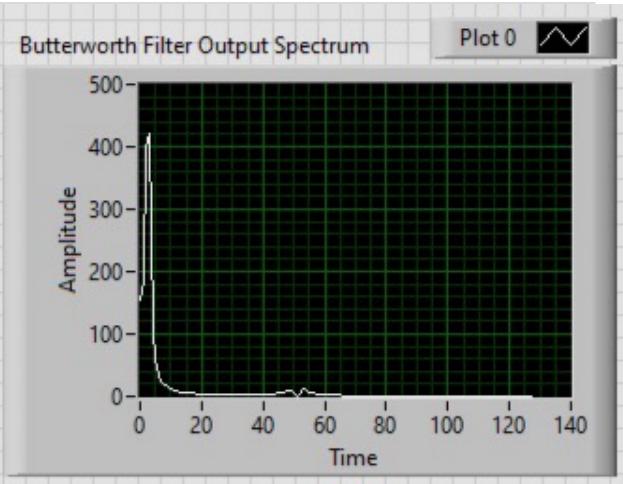
(ก) สัญญาณเชิงเวลา

(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ

รูปที่ (4) ผลลัพธ์ของการกรองสัญญาณด้วยวงจรกรอง Notch เมื่อ $r = 0.9$



(ก) สัญญาณเชิงเวลา



(ก) สเปกตรัมของสัญญาณ

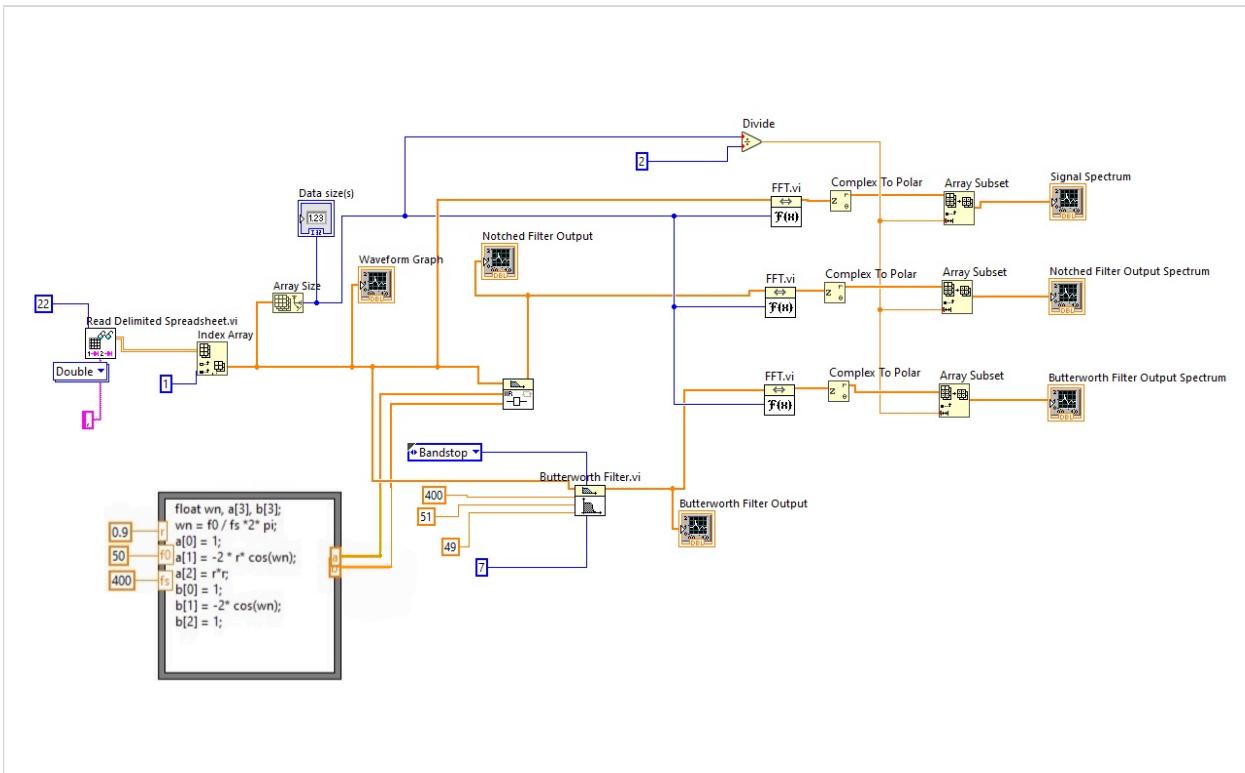
รูปที่ (5) ผลลัพธ์ของการกรองสัญญาณด้วยวงจรกรอง Butterworth อันดับที่ 7 เมื่อ $f_s = 1$,

$$f_0 = \mathbf{0.1992} \quad \Delta = \mathbf{0.1} \quad f_l = \mathbf{0.1492} \quad \text{และ} \quad f_h = \mathbf{0.2492}$$

วิเคราะห์ผลการทดลองข้อ 4.2

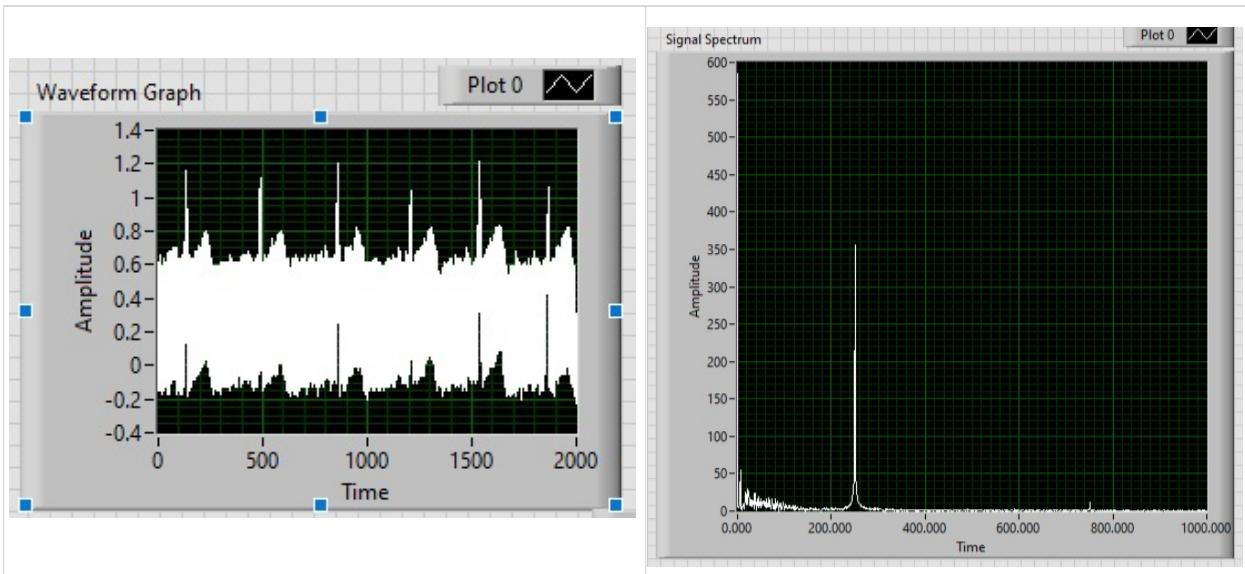
จะเห็นว่าการกรองแบบ Notched จะได้คลื่นที่เพี้ยนกว่า Butterworth เนื่องจากสามารถกรองหัวความถี่ที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ สำหรับการกรองแบบ Butterworth จะได้คลื่นที่มีความไม่เรียบมากกว่า เพราะว่าการกำหนด ช่วงในการกรองไม่แม่นยำเท่ากับการกรองแบบ Notched หากจะเห็นได้ว่าช่อง band stop จะมี Noise ที่มากไปกับสัญญาณมากกว่าแบบ Notched

การทดลองข้อ 4.3



รูปที่ (6) Block diagram ที่ใช้ในการทดลองที่ 4.3

ผลการทดลองข้อ 4.3



(ก) สัญญาณเชิงเวลาของสัญญาณ ECG

และ (ข) สเปกตรัมของสัญญาณ ECG

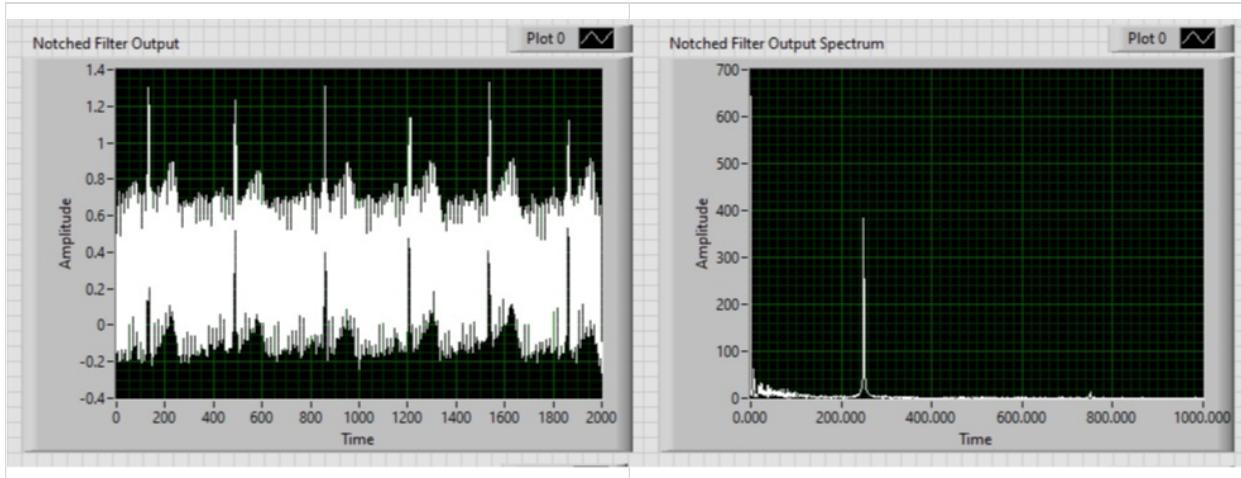
รูปที่ (7) สัญญาณ ECG ที่วัดได้ก่อนการกรอง

จากไฟล์ข้อมูลค่า $f_s = 400$ Hz และจำนวนข้อมูล $N = 2000$

แล้วจากค่าสเปกตรัมของสัญญาณ ECG

$$\frac{f_0}{f_s} = \frac{k}{N} \approx \frac{f_0}{400} = \frac{250}{2000} ; f_0 = 50 \text{ Hz.}$$

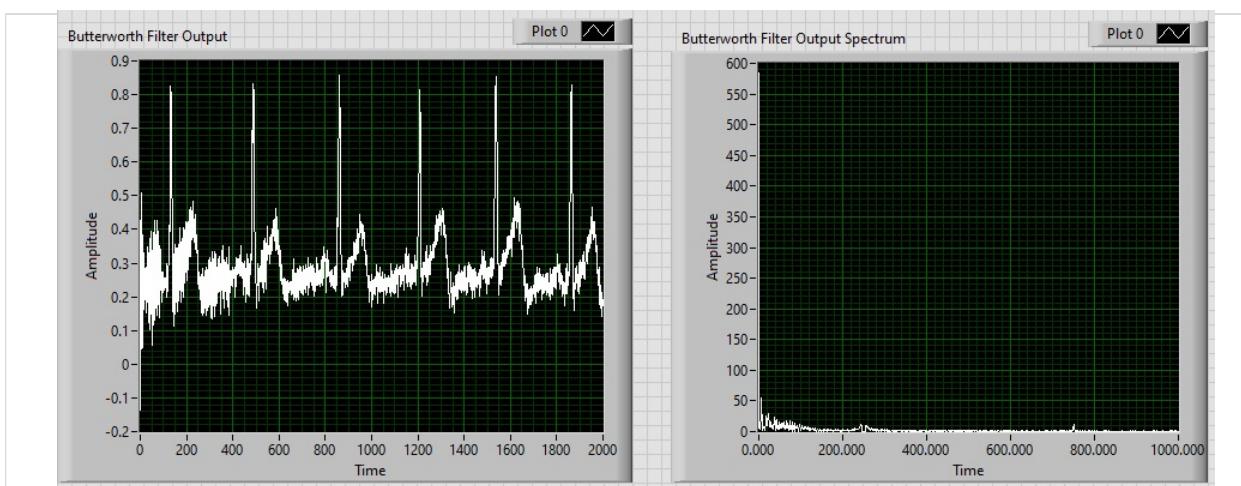
ค่าความถี่ของสัญญาณรบกวน $f_0 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Hz}$



(ก) สัญญาณเชิงเวลา

(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ

รูปที่ (8) ผลลัพธ์ของการกรองสัญญาณ ECG ด้วยวงจรกรอง Notch เมื่อ $r = 0.9$



(ก) สัญญาณเชิงเวลา

(ข) สเปกตรัมของสัญญาณ

รูปที่ (9) ผลลัพธ์ของการกรองสัญญาณด้วยวงจรกรอง Butterworth อันดับที่ 7 เมื่อใช้ $f_s = 400 \text{ Hz.}$

$$f_0 = 50 \text{ Hz.} \quad \Delta = 1 \text{ Hz} \quad f_l = 47.5 \text{ Hz} \quad \text{และ} \quad f_h = 50.5 \text{ Hz.}$$

วิเคราะห์ผลการทดลองข้อ 4.3

จากสัญญาณ ECG ที่ได้พบว่า $k \approx 250$, $N = 2000$, $f_s = 400 \text{ Hz}$. เมื่อนำเข้ามานำมาดำเนิน
มาด้วย $f_0 = f_s \times \frac{k}{N} = 50 \text{ Hz}$ รังความถี่นี้ตรงกับความถี่สัญญาณรบกวนไฟฟ้าใน นำมาร่วมกัน
Notch filter แบบ Butterworth 7 order ทำให้สัญญาณถูกกรองไป = รีบอนนี้ โคลสัญญาณ
ที่ Notch filter 0: กรองไถลกว่าเส้นน้อย

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า ในรูปความถี่ 0 - f_s Hz แนวโน้ม Butterworth
จะมีความสามารถในการกรองไถลกว่า Notch Filter มากกว่า f_s Notch Filter
0: กรองไถลกว่า Butterworth เนื่องจาก Notch Filter กรองความถี่เฉพาะ = 0: อย่างไร
ทางแรก Butterworth ที่กรองความถี่ในรูปนี้ก็คงกว่า