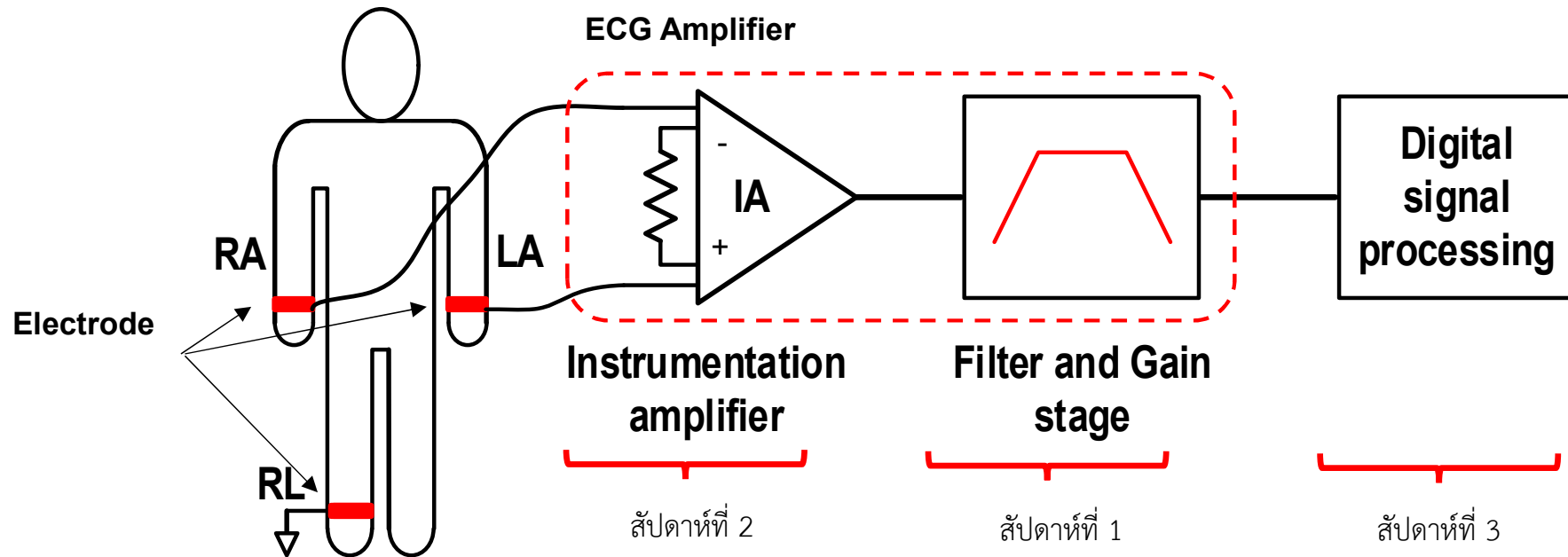


Module: ECG Amplifier



บล็อกไดอะแกรมหลักของระบบวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

Module: ECG Amplifier: Active Filter

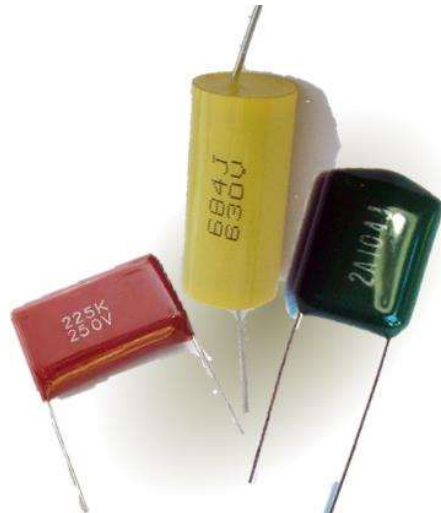
ให้นิสิตออกแบบและสร้างวงจรกรองผ่านแถบ ที่มีอัตราขยาย 50–200 เท่า แบนด์วิดท์ 0.5–100 Hz โดยกำหนดให้วงจรกรองผ่านแถบประกอบด้วย

- 1) วงจรกรองผ่านสูงอันดับหนึ่งแบบไวงาน มีความถี่ตัดผ่าน = 0.5 Hz
- 2) วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสองหรือสูงกว่าแบบไวงาน มีความถี่ตัดผ่าน = 100 Hz
- 3) ให้กลุ่มที่ 1 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 60 เท่า
กลุ่มที่ 2 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 70 เท่า
กลุ่มที่ 3 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 80 เท่า
กลุ่มที่ 4 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 90 เท่า
กลุ่มที่ 5 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 100 เท่า
กลุ่มที่ 6 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 110 เท่า
กลุ่มที่ N สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย $(5+N)*10$ เท่า
- 4) นำวงจรทั้งสองส่วนมาต่ออนุกรมกัน ให้ภาคแรกเป็นวงจรกรองผ่านสูง และภาคที่สองเป็นวงจรกรองผ่านต่ำ

Module: ECG Amplifier

สิ่งที่กำหนดให้

- ไอซีออปแอมป์เบอร์ TL064 จำนวน 1 ตัว (ภายในประกอบด้วยออปแอมป์จำนวน 4 ตัว) ให้ใช้แบบจำลองของ TL064 สามารถดาวน์โหลดได้เองหรือใช้ตัวที่มีอยู่ใน MCV แล้ว
- ค่าความเก็บประจุที่ใช้ในวงจร คือ 10–1000 nF
- ค่าความต้านทานที่ใช้ 1–1000 k Ω
- แหล่งจ่ายไฟตรง ± 9 V ให้ใช้เป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจร
- Breadboard (พยายามใช้เนื้อที่อย่างประหยัด)



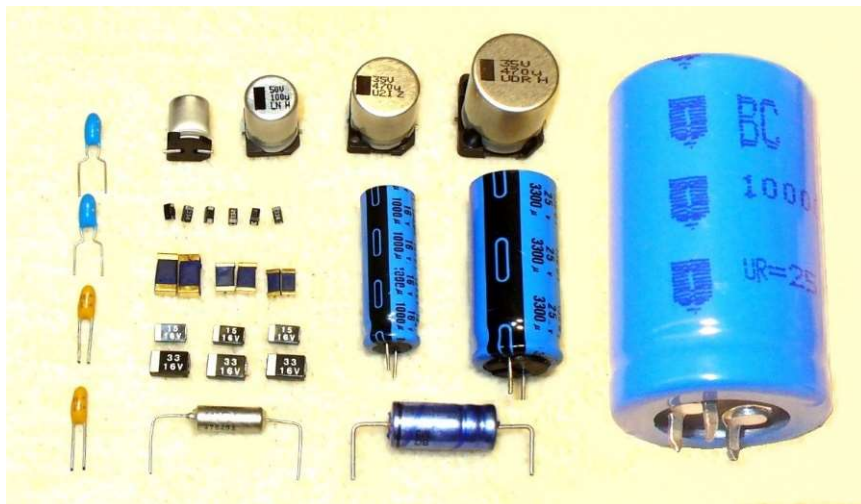
film capacitor

Standard Resistor Values: 5% tolerance

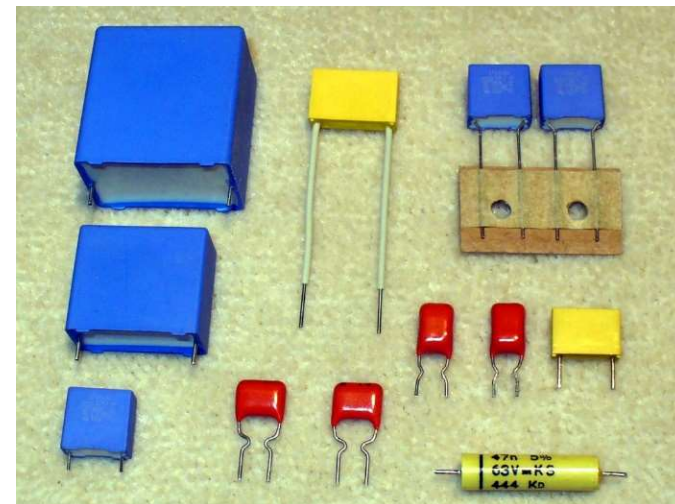
Standard Resistor Values ($\pm 5\%$)						
1.0	10	100	1.0K	10K	100K	1.0M
1.1	11	110	1.1K	11K	110K	1.1M
1.2	12	120	1.2K	12K	120K	1.2M
1.3	13	130	1.3K	13K	130K	1.3M
1.5	15	150	1.5K	15K	150K	1.5M
1.6	16	160	1.6K	16K	160K	1.6M
1.8	18	180	1.8K	18K	180K	1.8M
2.0	20	200	2.0K	20K	200K	2.0M
2.2	22	220	2.2K	22K	220K	2.2M
2.4	24	240	2.4K	24K	240K	2.4M
2.7	27	270	2.7K	27K	270K	2.7M
3.0	30	300	3.0K	30K	300K	3.0M
3.3	33	330	3.3K	33K	330K	3.3M
3.6	36	360	3.6K	36K	360K	3.6M
3.9	39	390	3.9K	39K	390K	3.9M
4.3	43	430	4.3K	43K	430K	4.3M
4.7	47	470	4.7K	47K	470K	4.7M
5.1	51	510	5.1K	51K	510K	5.1M
5.6	56	560	5.6K	56K	560K	5.6M
6.2	62	620	6.2K	62K	620K	6.2M
6.8	68	680	6.8K	68K	680K	6.8M
7.5	75	750	7.5K	75K	750K	7.5M
8.2	82	820	8.2K	82K	820K	8.2M
9.1	91	910	9.1K	91K	910K	9.1M

Standard Capacitor Values: 10% tolerance

Standard Capacitor Values ($\pm 10\%$)						
10pF	100pF	1000pF	.010 μ F	.10 μ F	1.0 μ F	10 μ F
12pF	120pF	1200pF	.012 μ F	.12 μ F	1.2 μ F	
15pF	150pF	1500pF	.015 μ F	.15 μ F	1.5 μ F	
18pF	180pF	1800pF	.018 μ F	.18 μ F	1.8 μ F	
22pF	220pF	2200pF	.022 μ F	.22 μ F	2.2 μ F	22 μ F
27pF	270pF	2700pF	.027 μ F	.27 μ F	2.7 μ F	
33pF	330pF	3300pF	.033 μ F	.33 μ F	3.3 μ F	33 μ F
39pF	390pF	3900pF	.039 μ F	.39 μ F	3.9 μ F	
47pF	470pF	4700pF	.047 μ F	.47 μ F	4.7 μ F	47 μ F
56pF	560pF	5600pF	.056 μ F	.56 μ F	5.6 μ F	
68pF	680pF	6800pF	.068 μ F	.68 μ F	6.8 μ F	
82pF	820pF	8200pF	.082 μ F	.82 μ F	8.2 μ F	



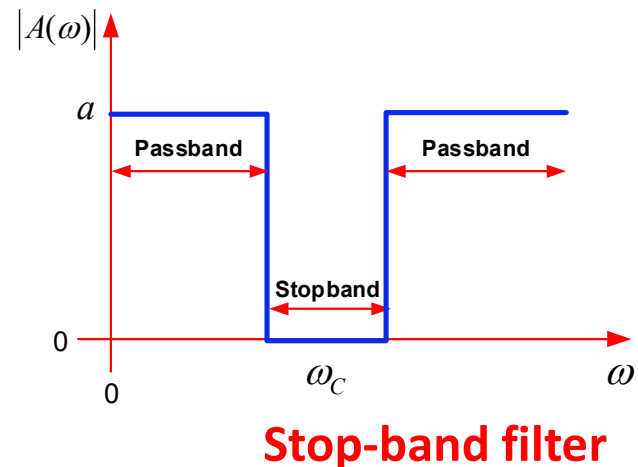
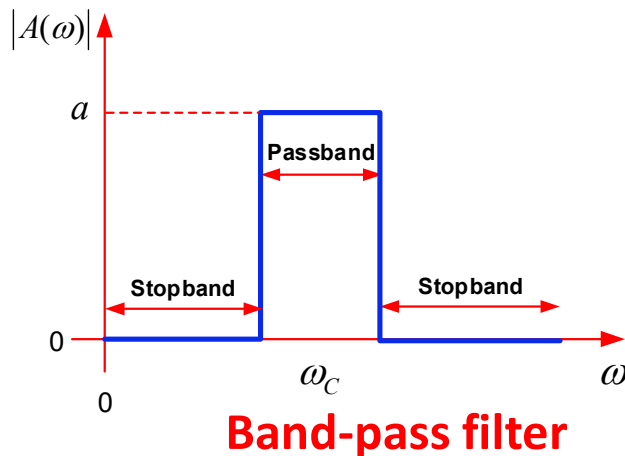
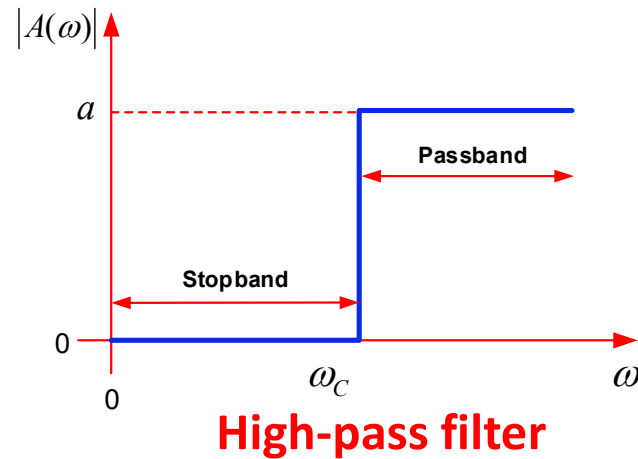
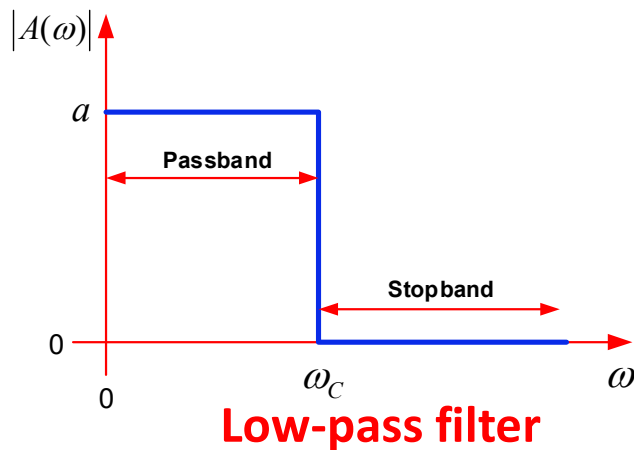
https://en.wikipedia.org/wiki/Electrolytic_capacitor#/media/File:Electrolytic_capacitors-P1090328.JPG



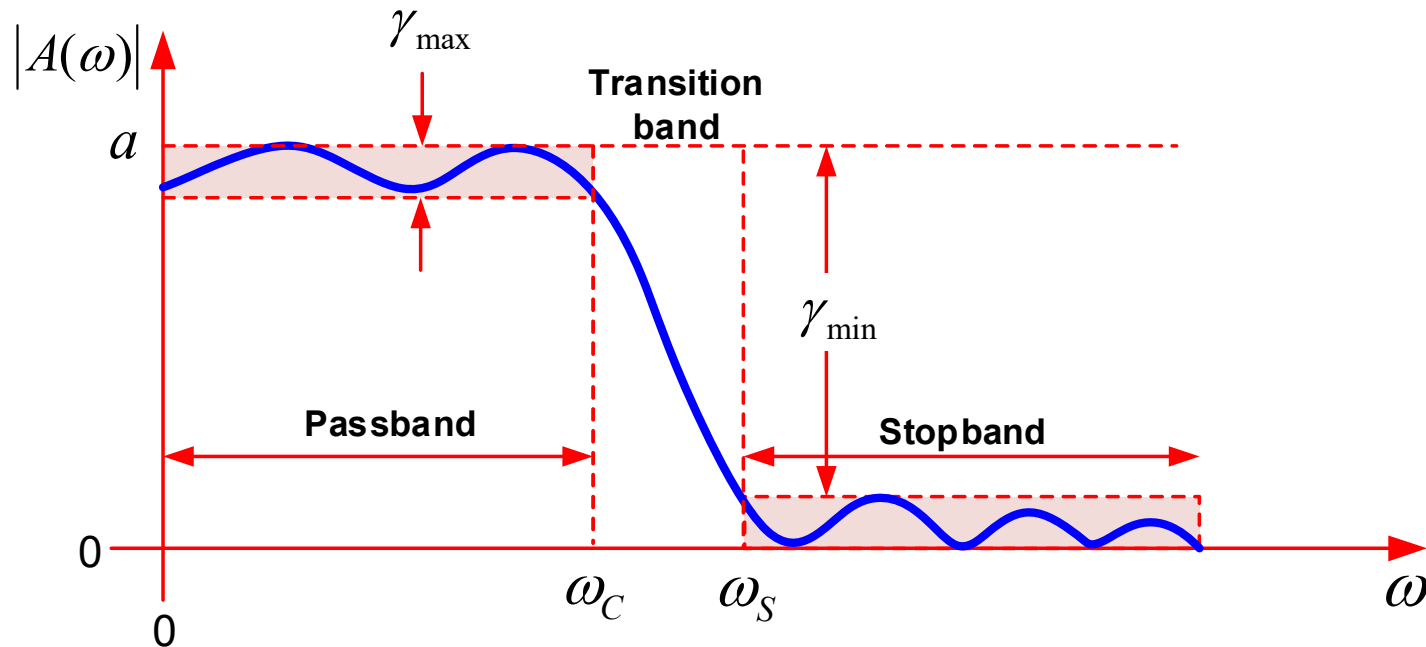
https://en.wikipedia.org/wiki/Film_capacitor#/media/File:Wiki-Folkos-P1090317-1.jpg

Filter

Filter is used to receive an impure electrical signal and pass a desired signal while removing undesired components often referred as noises.



Filter Design

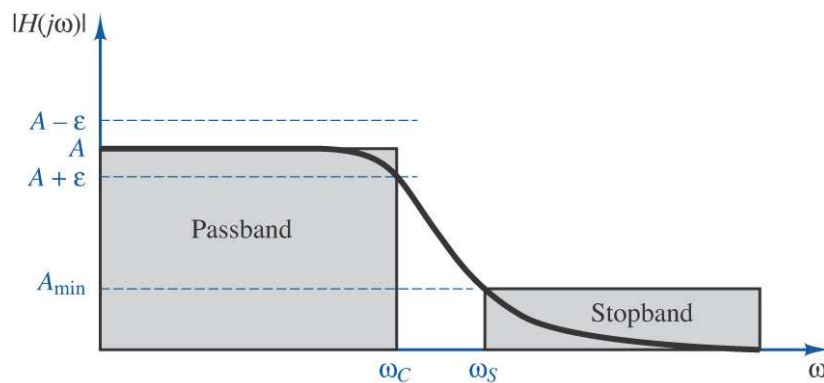


- ☐ Gain $|A(\omega)|$ and cutoff frequency ω_C
- ☐ γ_{\max} is the variation in gain over the passband
- ☐ γ_{\min} is the relative attenuation over the stopband
- ☐ Transition region lying between passband and stopband specified by a passband cutoff frequency ω_C and a stopband edge ω_S

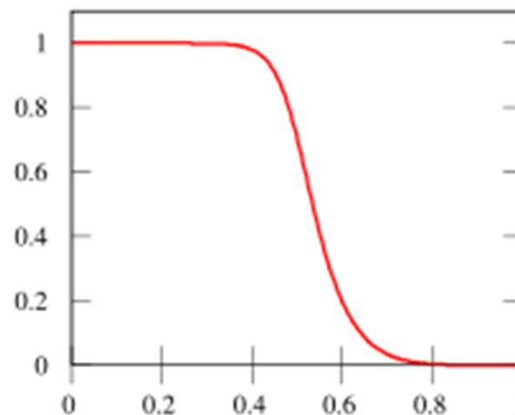
Active Filter

Filter families

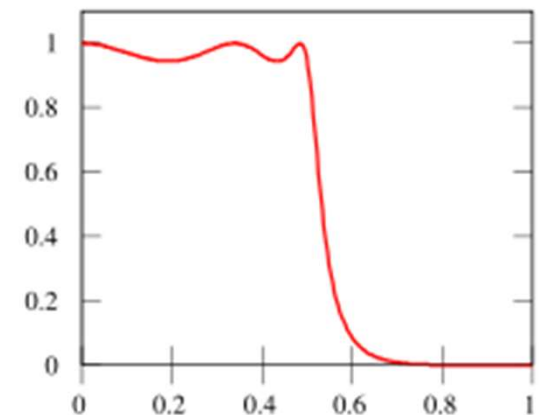
- Butterworth filters: Maximum flat response
- Chebyshev filters: Fast transition
- Elliptic filters: Fast transition
- Bessel filters: Linear phase response



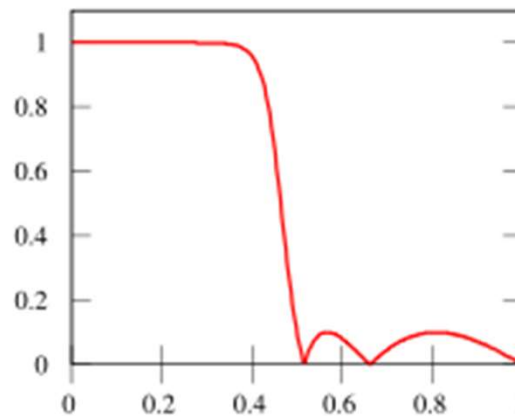
Butterworth



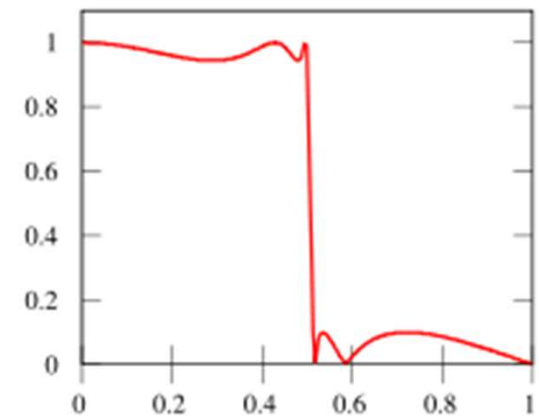
Chebyshev type 1



Chebyshev type 2



Elliptic



Active Filter: Butterworth Filter

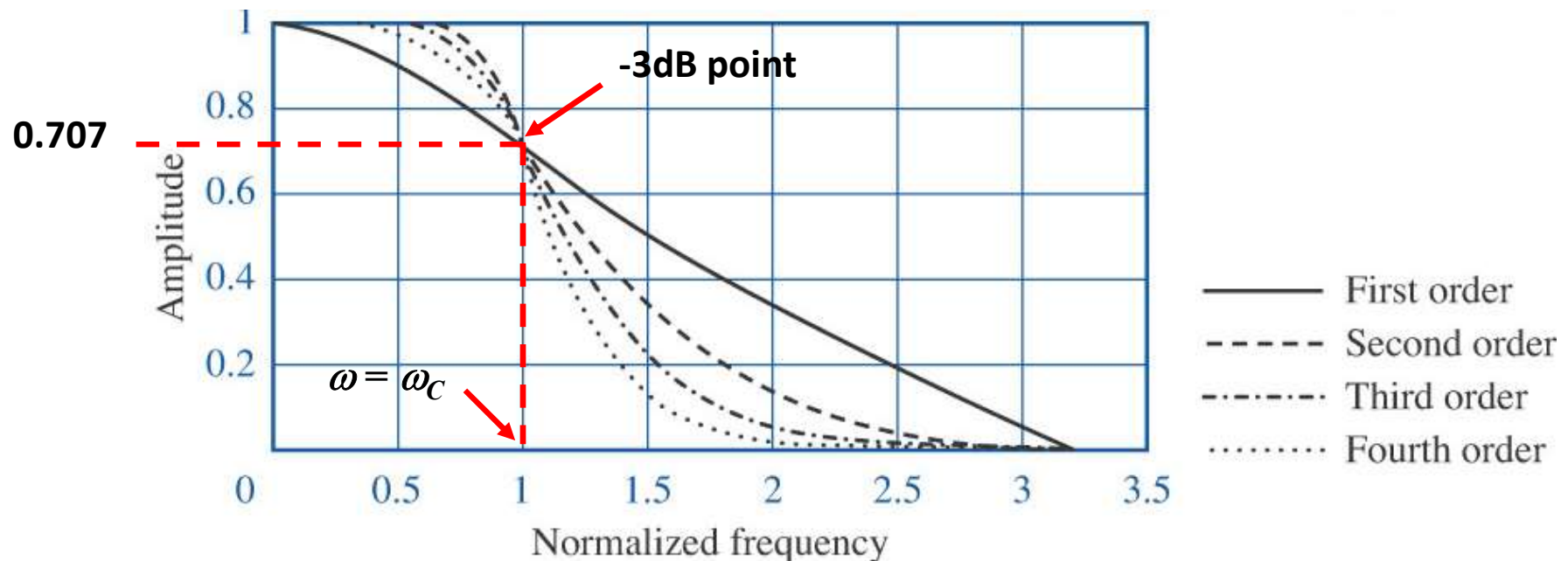
Butterworth filters are characterized by a maximally flat pass-band frequency response.

Butterworth low-pass filter: magnitude ratio

$$|H(j\omega)| = \frac{H_0}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \omega^{2n}}} = \frac{H_0}{\sqrt{1 + \omega^{2n}}}$$

Where $\varepsilon = 1$ for maximally flat response and n is the filter order

$$\frac{|H(j\omega)|}{H_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_c)^{2n}}}$$



Active Filter: Butterworth Filter

Normalized Butterworth polynomials ($\omega_c = 1$ rad/s) or $s \equiv j\omega/\omega_c$

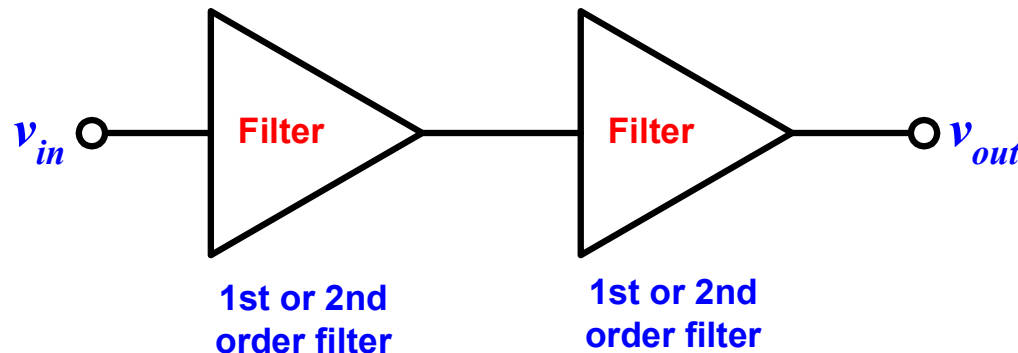
Order n	Characteristic Equations
1	$s + 1$
2	$s^2 + \sqrt{2}s + 1$
3	$(s + 1)(s^2 + s + 1)$
4	$(s^2 + 0.7654s + 1)(s^2 + 1.8478s + 1)$
5	$(s + 1)(s^2 + 0.6180s + 1)(s^2 + 1.6180s + 1)$

The denominator
of $H(j\omega)$

Ex: for 3rd order filter

$$H(j\omega) = \frac{H_0}{(s+1)(s^2+s+1)} = \frac{H_0}{\left(\frac{j\omega}{\omega_c} + 1\right) \left(\left(\frac{j\omega}{\omega_c}\right)^2 + \frac{j\omega}{\omega_c} + 1 \right)}$$

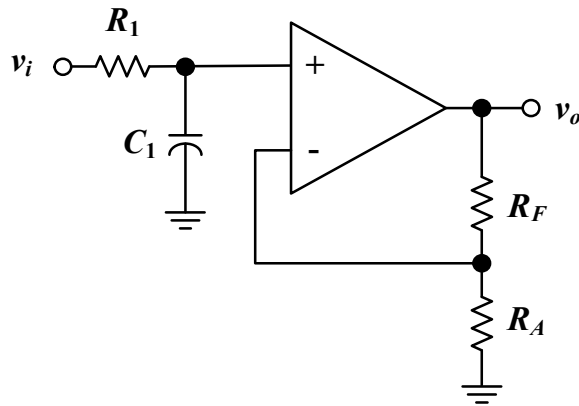
From this table, we can see that the higher order filter can be realized by the combination of first and second order filters.



Active Filter: Realization

1st order active filters

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับหนึ่งที่มีอัตราขยายเท่ากับ $\left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$



ผลตอบสนองเชิงความถี่

อัตราขยายที่ความถี่ต่ำ

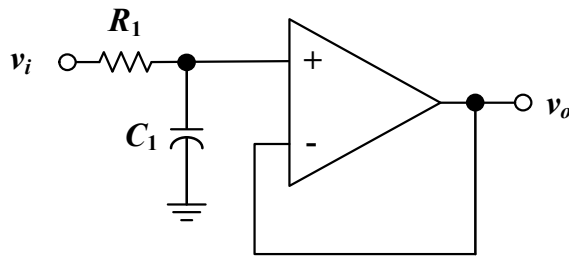
ความถี่ตัดผ่าน

$$A_{LF}(j\omega) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right) \frac{1}{1 + j(\omega / \omega_C)}$$

$$A(0) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$$

$$\omega_C = \frac{1}{R_1 C_1}$$

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับหนึ่งที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1



ผลตอบสนองเชิงความถี่

อัตราขยายที่ความถี่ต่ำ

ความถี่ตัดผ่าน

$$A_{LF}(j\omega) = \frac{1}{1 + j(\omega / \omega_C)}$$

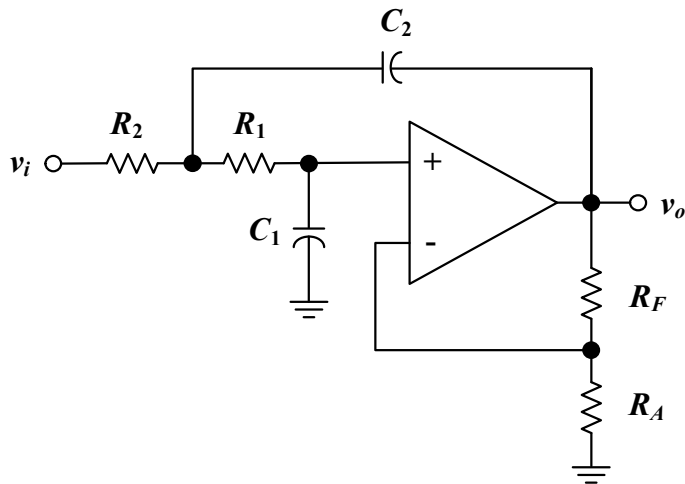
$$A(0) = 1$$

$$\omega_C = \frac{1}{R_1 C_1}$$

Active Filter: Realization

2nd order active filters

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสองที่มีอัตราขยายเท่ากับ $\left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$



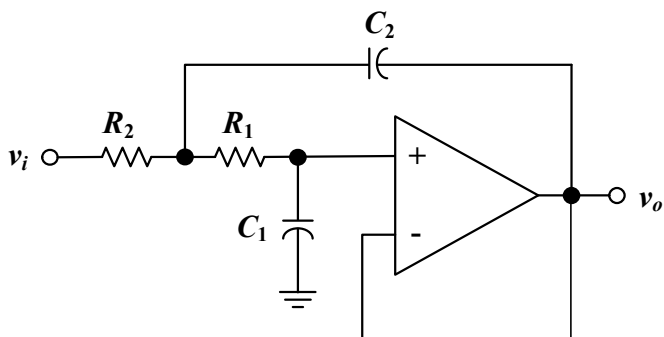
ผลตอบสนองเชิงความถี่ $A_{LF}(j\omega) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right) \frac{1}{1 + j\omega \left((R_1 + R_2)C_1 - \frac{R_F}{R_A} R_2 C_2 \right) + (j\omega)^2 (R_1 C_1 R_2 C_2)}$

อัตราขยายที่ความถี่ต่ำ $A(0) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right)$

ความถี่ตัดผ่าน $\omega_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$

ตัวประกอบคุณภาพ $\frac{1}{Q} = 2\zeta = \omega_c \left[(R_1 + R_2)C_1 - \frac{R_F}{R_A} R_2 C_2 \right]$

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสองที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1



ผลตอบสนองเชิงความถี่ $A_{LF}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega (R_1 + R_2)C_1 + (j\omega)^2 (R_1 C_1 R_2 C_2)}$

อัตราขยายที่ความถี่ต่ำ $A(0) = 1$

ความถี่ตัดผ่าน $\omega_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$

ตัวประกอบคุณภาพ $\frac{1}{Q} = 2\zeta = \omega_c [(R_1 + R_2)C_1]$

Active Filter: Design Examples

Ex: Design a fourth-order low-pass Butterworth filter with the cutoff frequency = 1 kHz = 6.2832 krad/s, and let $R_1=R_2=R$ and $C_1=C_2=C$

จากเงื่อนไขที่กำหนดให้ $R_1 = R_2 = R$ และ $C_1 = C_2 = C$ ทำให้การคำนวณของ ω_C และ ζ ของวงจรกรองผ่านต่ำอันดับสองเป็นอิสระต่อกัน

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} = \frac{1}{RC} \quad 2\zeta = \omega_C \left[(R_1 + R_2)C_1 - \frac{R_F}{R_A} R_2 C_2 \right] = 2 - \frac{R_F}{R_A}$$

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสี่ สามารถสร้างจากวงจรกรองผ่านต่ำอันดับสอง 2 วงจรมาต่ออนุกรมกัน

จากตาราง Normalized Butterworth polynomial อันดับสี่

$$H(j\omega) = \frac{(s^2 + 0.7654s + 1)(s^2 + 1.8478s + 1)}{(j\omega/\omega_C)^2 + 2\zeta_1(j\omega/\omega_C) + 1} \frac{1}{(j\omega/\omega_C)^2 + 2\zeta_2(j\omega/\omega_C) + 1}$$

$$(s^2 + 2\zeta_1 s + 1)(s^2 + 2\zeta_2 s + 1) = (s^2 + 0.7654s + 1)(s^2 + 1.87478s + 1)$$

ดังนั้น วงจรกรองผ่านต่ำมี $\zeta_1 = 0.3827$ และ $\zeta_2 = 0.9239$ สำหรับวงจรกรองตัวที่ 1 และตัวที่ 2

Active Filter: Design Examples

$$\text{จาก } 2\zeta = 2 - \frac{R_F}{R_A}$$

$$\text{สำหรับวงจรกรองตัวที่ 1 } \zeta_1 = 0.3827 \text{ เราจะได้ } \frac{R_F}{R_A} = 1.2346 \text{ เลือก } R_A = 10 \text{ k}\Omega \text{ ได้ } R_F = 12.4 \text{ k}\Omega$$

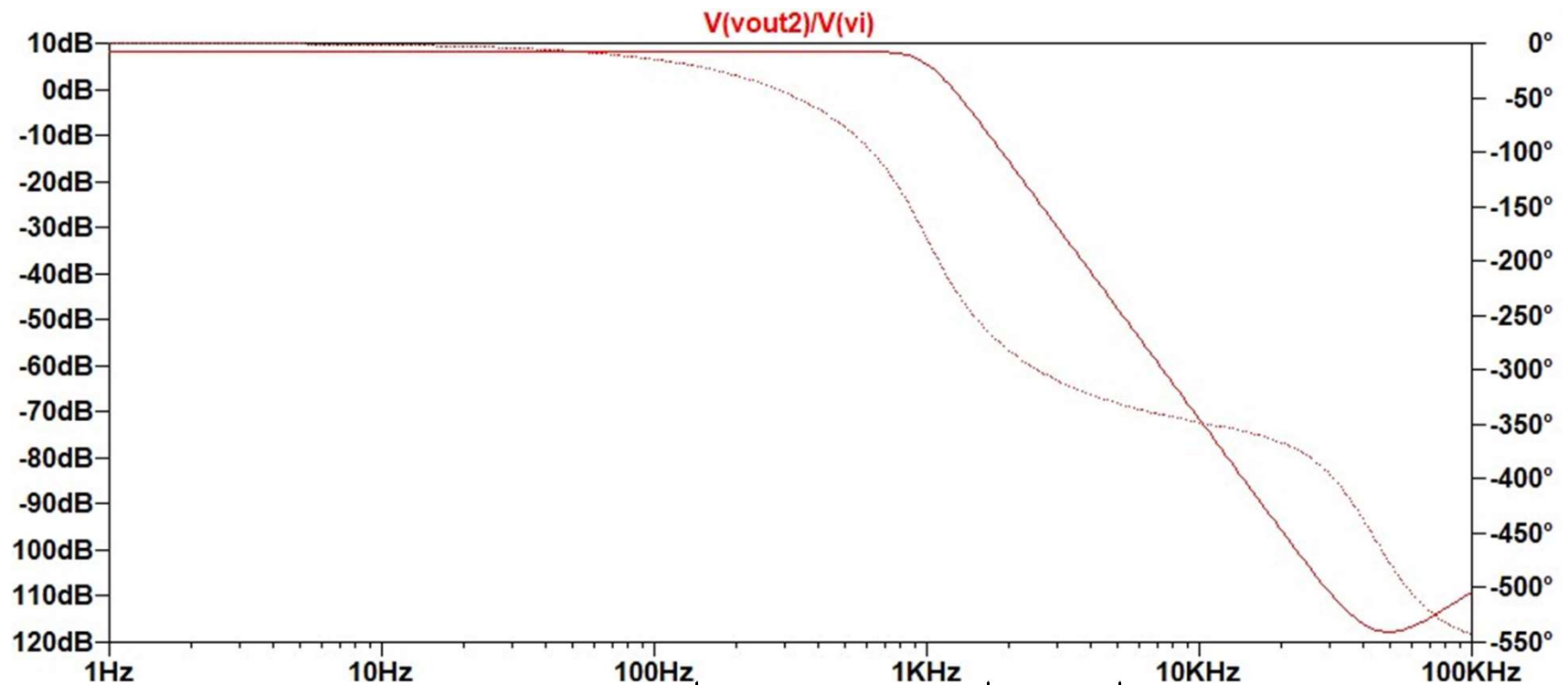
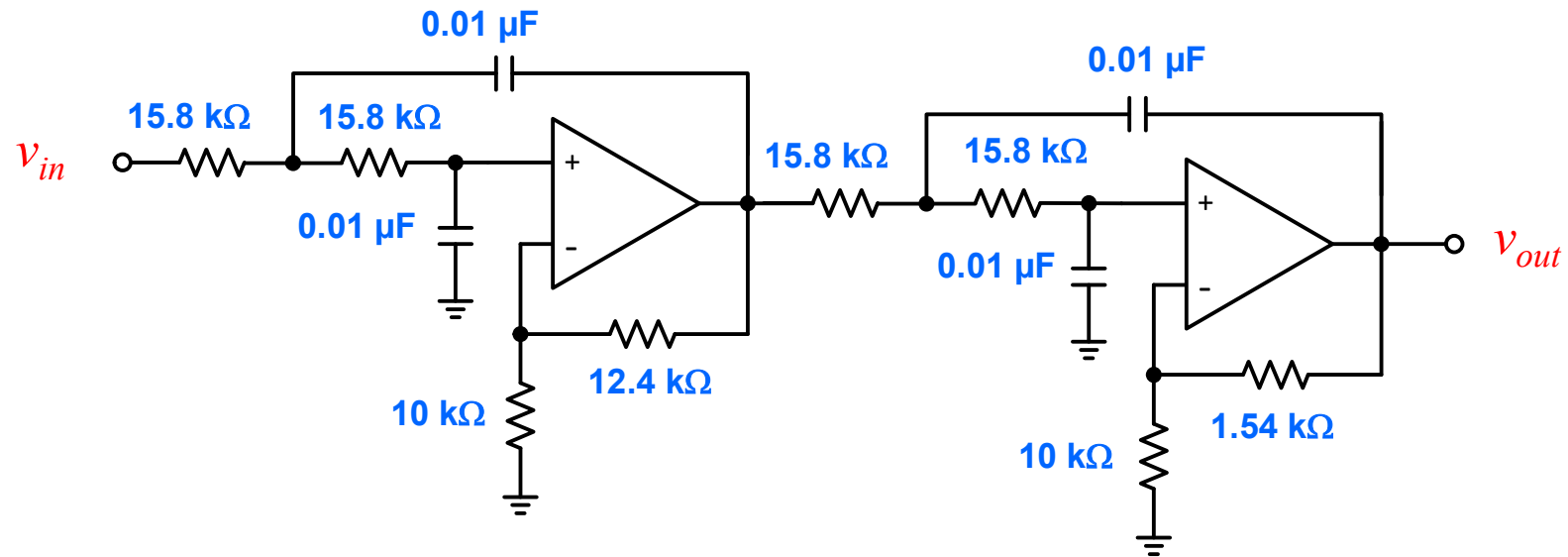
$$\text{สำหรับวงจรกรองตัวที่ 2 } \zeta_2 = 0.9239 \text{ เราจะได้ } \frac{R_F}{R_A} = 0.1522 \text{ เลือก } R_A = 10 \text{ k}\Omega \text{ ได้ } R_F = 1.54 \text{ k}\Omega$$

$$\text{จาก } \omega_c = \frac{1}{RC} = 6.2832 \text{ krad/s}$$

$$\text{ในที่นี้ เลือก } C = 0.01 \text{ }\mu\text{F} \text{ ทำให้เราได้ } R = 15.92 \text{ k}\Omega \approx 15.8 \text{ k}\Omega$$

ดังนั้นวงจรกรองอันดับสี่ที่ได้จะเกิดจากวงจรกรองอันดับสอง 2 วงจรมาต่ออนุกรมกัน ลำดับของการต่อไม่มีความสำคัญสามารถสลับตำแหน่งกันได้

Active Filter: Design Examples



ผลการจำลองผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองผ่านต่ำอันดับสี่ ด้วย LTspice

Active Filter: Design Examples

Ex: Design a fourth-order low-pass Butterworth filter Given: Gain = 1, cutoff frequency = 1 kHz = 6.2832 krad/s

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสี่ สามารถสร้างจากวงจรกรองผ่านต่ำอันดับสอง 2 วงจรมาต่ออนุกรมกัน

จากตาราง Normalized Butterworth polynomial อันดับสี่

$$(s^2 + 0.7654s + 1)(s^2 + 1.8478s + 1)$$

$$H(j\omega) = \frac{1}{(j\omega/\omega_c)^2 + 2\zeta_1(j\omega/\omega_c) + 1} \frac{1}{(j\omega/\omega_c)^2 + 2\zeta_2(j\omega/\omega_c) + 1}$$

$$(s^2 + 2\zeta_1s + 1)(s^2 + 2\zeta_2s + 1) = (s^2 + 0.7654s + 1)(s^2 + 1.87478s + 1)$$

ดังนั้น วงจรกรองผ่านต่ำมี $\zeta_1 = 0.3827$ และ $\zeta_2 = 0.9239$ สำหรับวงจรกรองตัวที่ 1 และตัวที่ 2
ดังนั้นเราจะได้ สำหรับวงจรกรองตัวที่ 1 และตัวที่ 2

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} = 6.2832 \text{ krad/s} \quad \zeta = \frac{1}{2} \omega_c (R_1 + R_2) C_1 = 3.1416 \times 10^3 (R_1 + R_2) C_1$$

Active Filter: Design Examples

สำหรับวงจรกรองอันดับสอง วงจรที่ 1 $\zeta_1 = 0.3827$ เนื่องจากมีสองเงื่อนไขของ

ω_c และ ζ แต่มี 4 ตัวแปรของ R_1, R_2, C_1 , และ C_2 ทำให้เรามีอิสระ 2 ตัวแปร

ในที่นี้ เลือก $C_1 = 0.01 \mu\text{F}$ ทำให้ได้เงื่อนไขดังนี้

$$R_1 + R_2 = 12.82 \text{ k}\Omega \quad \text{และ} \quad R_1 R_2 C_2 = 2.5330$$

ขั้นต่อไป คือ การเลือกค่า C_2 ต้องทำให้ได้ค่า R_1 และ R_2 และมีค่าเป็นจำนวนจริงบวกและเหมาะสมในการต่อวงจร อาจจะต้องมีการลองผิดลองถูกดู

เลือก $C_2 = 0.082 \mu\text{F}$ ทำให้ได้ค่า

$$R_1 + R_2 = 12.82 \text{ k}\Omega \quad R_1 R_2 = 30.89 \times 10^6$$

$$R_1 = 8.582 \approx 8.56 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 3.599 \approx 3.61 \text{ k}\Omega$$

หมายเหตุ การเลือกค่า C_2 ที่เหมาะสม ในกรณีข้างบน จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไข

$$(R_1 + R_2)^2 \geq 4R_1 R_2$$

Active Filter: Design Examples

สำหรับวงจรกรองอันดับสอง วงจรที่ 2 $\zeta_1 = 0.9239$ เนื่องจากมีสองเงื่อนไขของ ω_c และ ζ แต่มี 4 ตัวแปรของ R_1, R_2, C_1 , และ C_2 ทำให้เรามีอิสระ 2 ตัวแปร ในที่นี้ เลือก $C_1 = 0.01 \mu\text{F}$ ทำให้ได้เงื่อนไขดังนี้

$$R_1 + R_2 = 29.409 \text{ k}\Omega \quad \text{และ} \quad R_1 R_2 C_2 = 2.5330$$

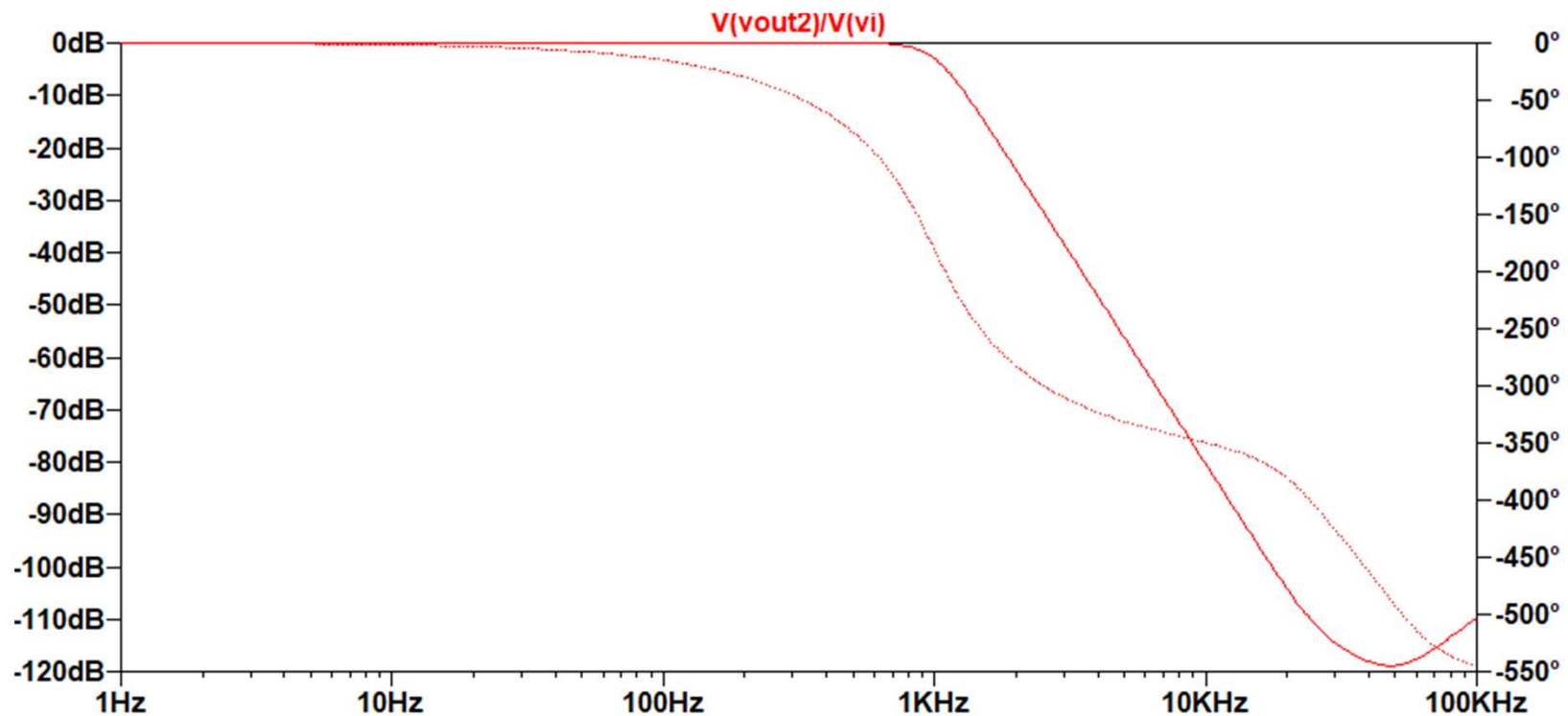
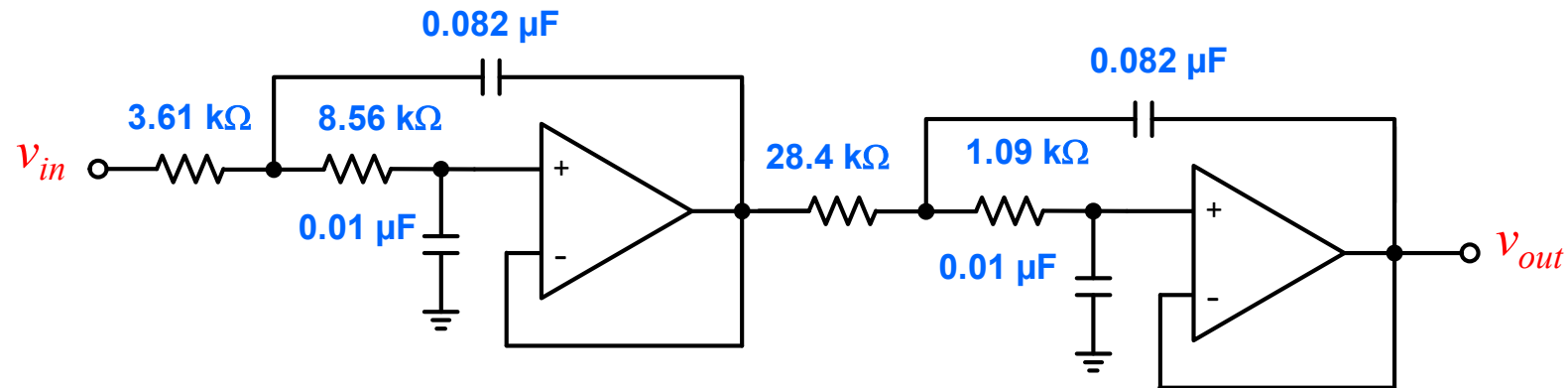
ขั้นต่อไป คือ การเลือกค่า C_2 ต้องทำให้ได้ค่า R_1 และ R_2 และมีค่าเป็นจำนวนจริงบวกและเหมาะสมในการต่อวงจร อาจจะต้องมีการลองผิดลองถูกดู
เลือก $C_2 = 0.082 \mu\text{F}$ ทำให้ได้ค่า

$$R_1 + R_2 = 29.409 \text{ k}\Omega \qquad R_1 R_2 = 30.89 \times 10^6$$

$$R_1 = 1.091 \approx 1.09 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 28.318 \approx 28.4 \text{ k}\Omega$$

Active Filter: Design Examples

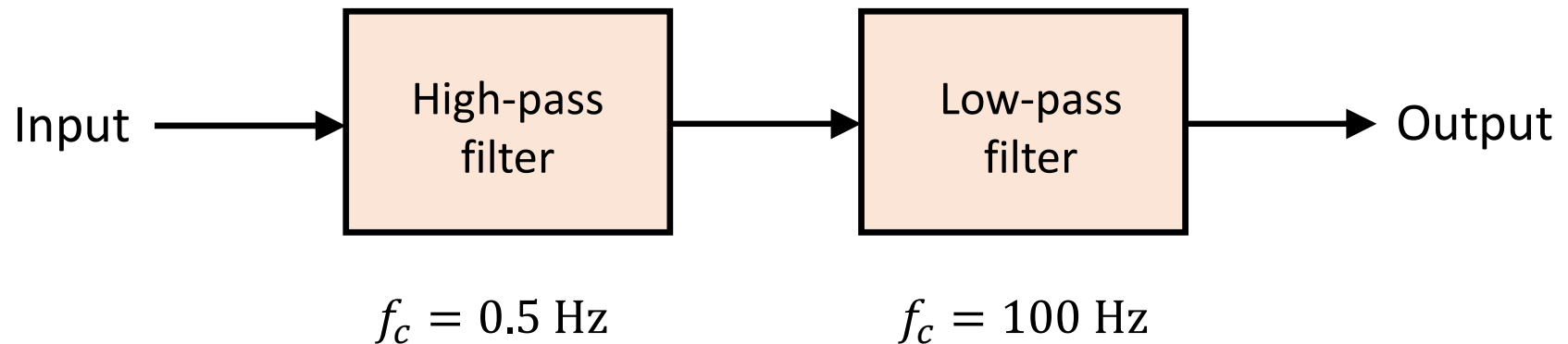


ผลการจำลองผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองผ่านต่ำอันดับสี่ ด้วย LTspice

Design Guideline

Design specifications: Gain = 50; Bandwidth = 0.5-100 Hz

:Select the 2nd order lowpass filter



Case 1:

$$\text{Gain}_{\text{Hi}} = 50$$

$$\text{Gain}_{\text{Lo}} = 1;$$

See Ex 1

Case 2:

$$\text{Gain}_{\text{Hi}} = \frac{50}{(3 - 2\zeta)}$$

$$\text{Gain}_{\text{Lo}} = (3 - 2\zeta) \quad \textbf{See Ex 2}$$

In which $R_1 = R_2 = R$ and $C_1 = C_2 = C$

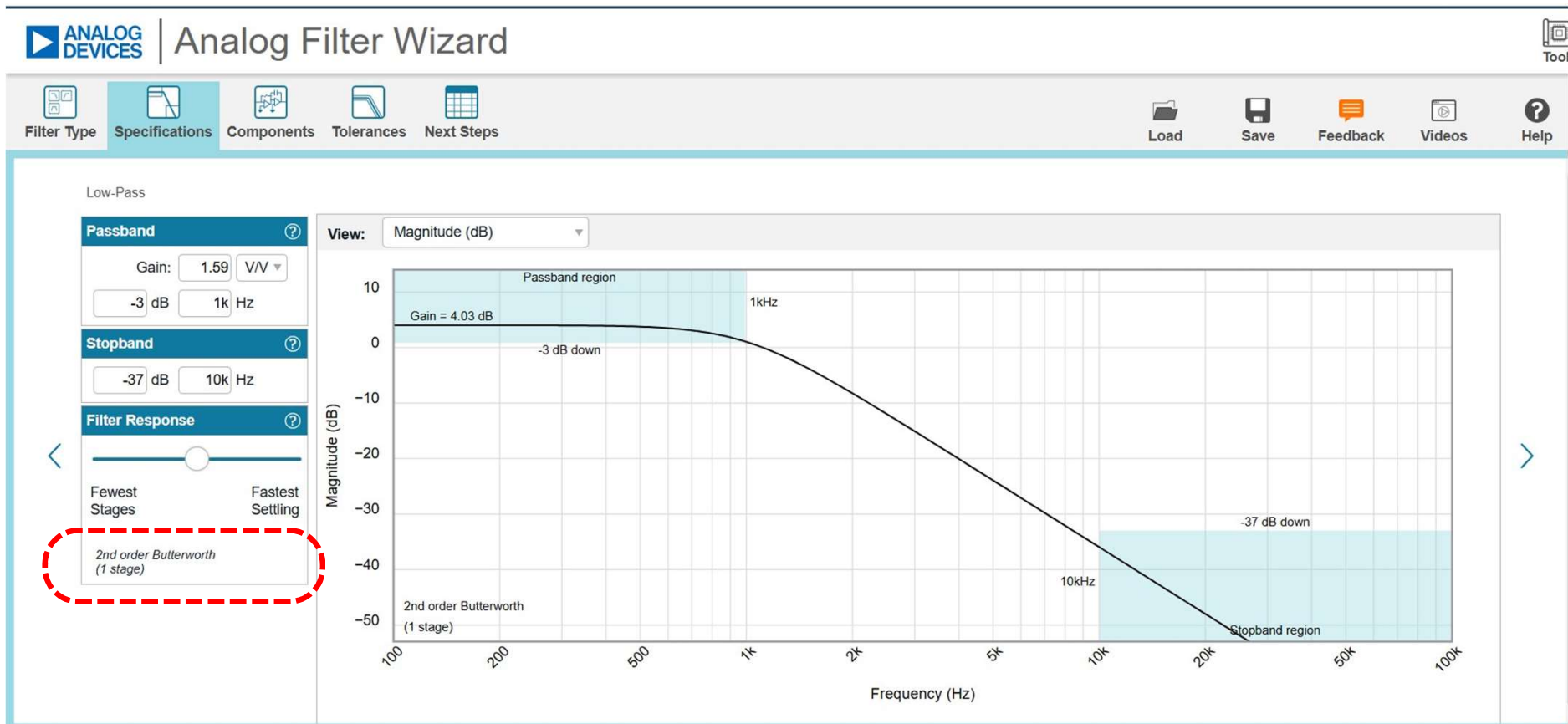
Other cases: 1) Add another gain stage

2) Play with the conditions of f_c and ζ


Filter Design Tool

Case 2: $\text{Gain}_{\text{LO}} = (3 - 2\zeta)$ In which $R_1 = R_2 = R$ and $C_1 = C_2 = C$

For the 2nd order Butterworth filter $\zeta = 1/\sqrt{2}$ Therefore $\text{Gain}_{\text{LO}} = 1.59$



Filter Design Tool

 **Analog Filter Wizard**

Filter Type

Specifications

Components

Tolerances

Next Steps

Low-Pass; 2nd order Butterworth; 1kHz passband

Voltage Supplies ?

+Vs : V

-Vs : V

Components ?

☒ Pick for me

☐ I want to choose

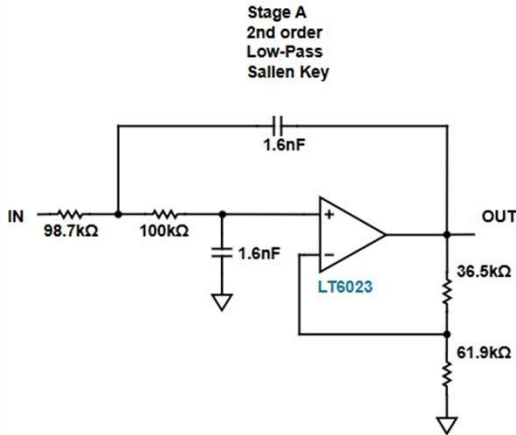
☐ Compensate for GBW ?

Optimization

Low Power ▾

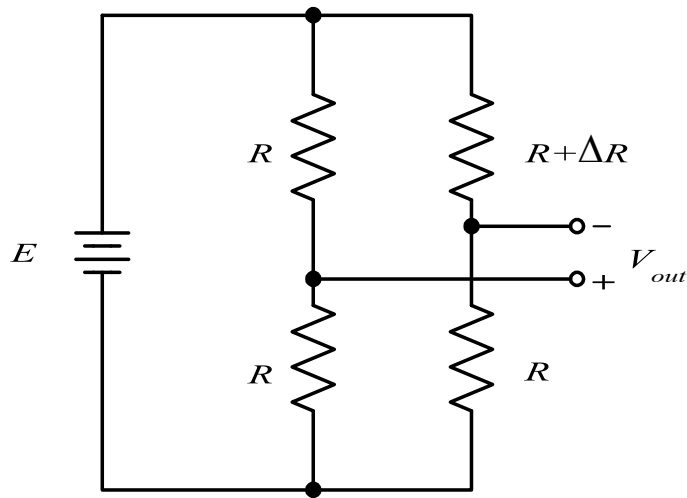
View: Circuit ▾

Stage A
2nd order
Low-Pass
Sallen Key

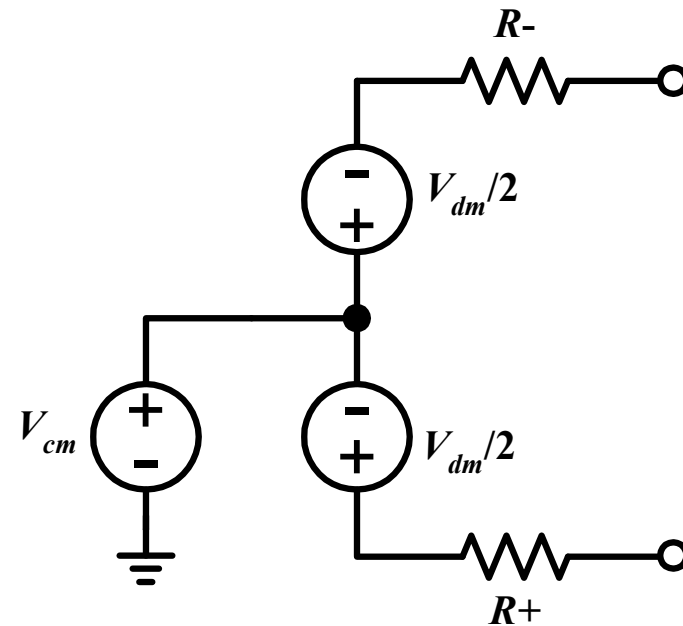


Instrumentation Amplifier (IA)

Instrumentation amplifiers is a **dedicate differential amplifier with extremely high input impedance**. Its gain can be precisely set by a single internal or external resistor. The high common-mode rejection makes IA very useful in recovering small signals buried in large common-mode offsets or noise.

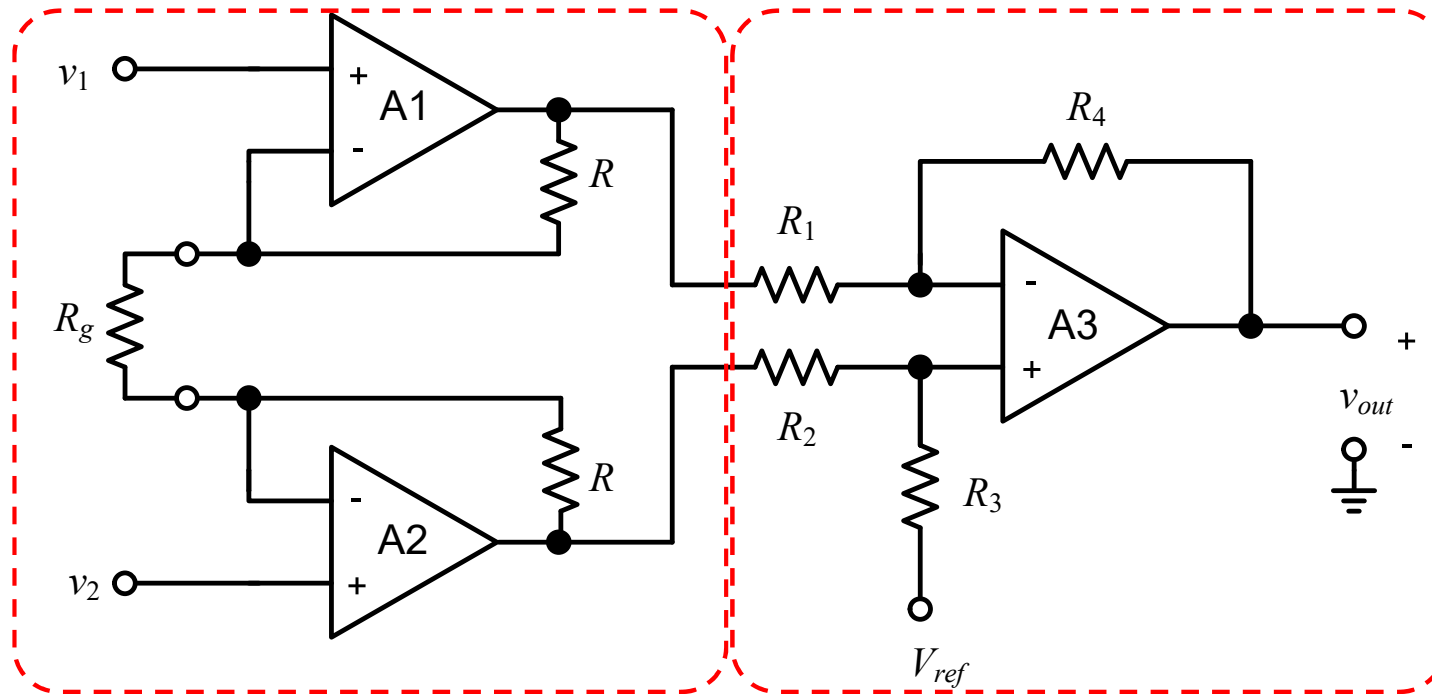


Bridge circuit for sensor applications



Equivalent circuit for a Load cell

Instrumentation Amplifier (IA)



Front end circuit

Differential amp

Three-Op Amp Instrumentation Amplifiers

In the case of $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$

$$v_{out} = \left(1 + \frac{2R}{R_g}\right)(v_2 - v_1) + V_{ref} \quad \text{where} \quad A_{dm} = \left(1 + \frac{2R}{R_g}\right)$$

Common mode rejection ratio

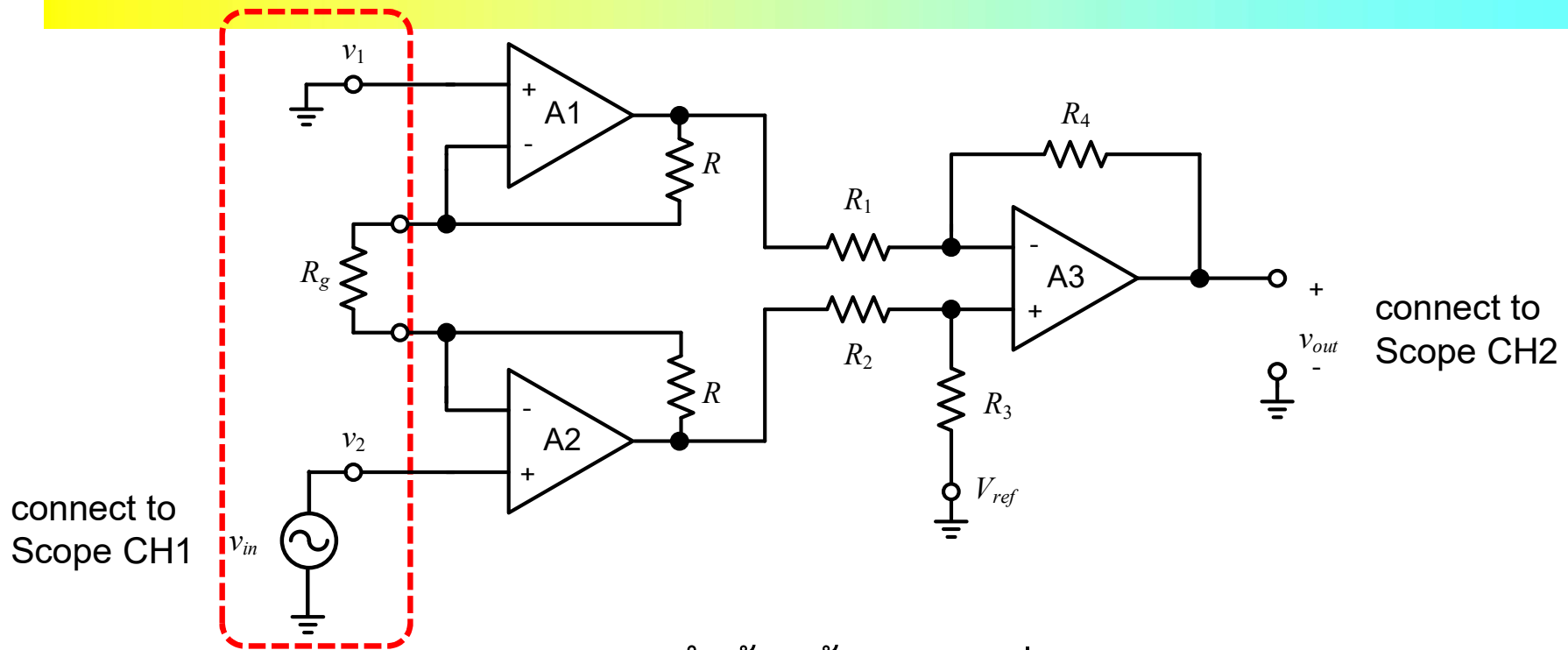
$$\text{CMRR} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right)$$

IA Module: Experimental section

- ให้ออกแบบและจำลองวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชัน ที่ใช้ออปแอมป์ 3 ตัว กำหนดให้วงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชัน มีอัตราขยาย เท่ากับ 5
- ใช้แรงดันอ้างอิง เท่ากับ 0 โวลต์
- แรงดันของแหล่งจ่าย กำหนดให้มียค่าอยู่ระหว่าง ± 9 V
- ค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจร สามารถเลือกใช้ได้ คือ ค่า 10 k Ω – 500 k Ω ***
- ไอซีของออปแอมป์ที่ใช้ในการทดลองกำหนดให้ คือ TL064

ตัวต้านทาน	ค่าที่ออกแบบไว้ (k Ω)	ค่าที่วัดด้วยมัลติมิเตอร์ (k Ω)
R		
R_g		
R_1		
R_2		
R_3		
R_4		

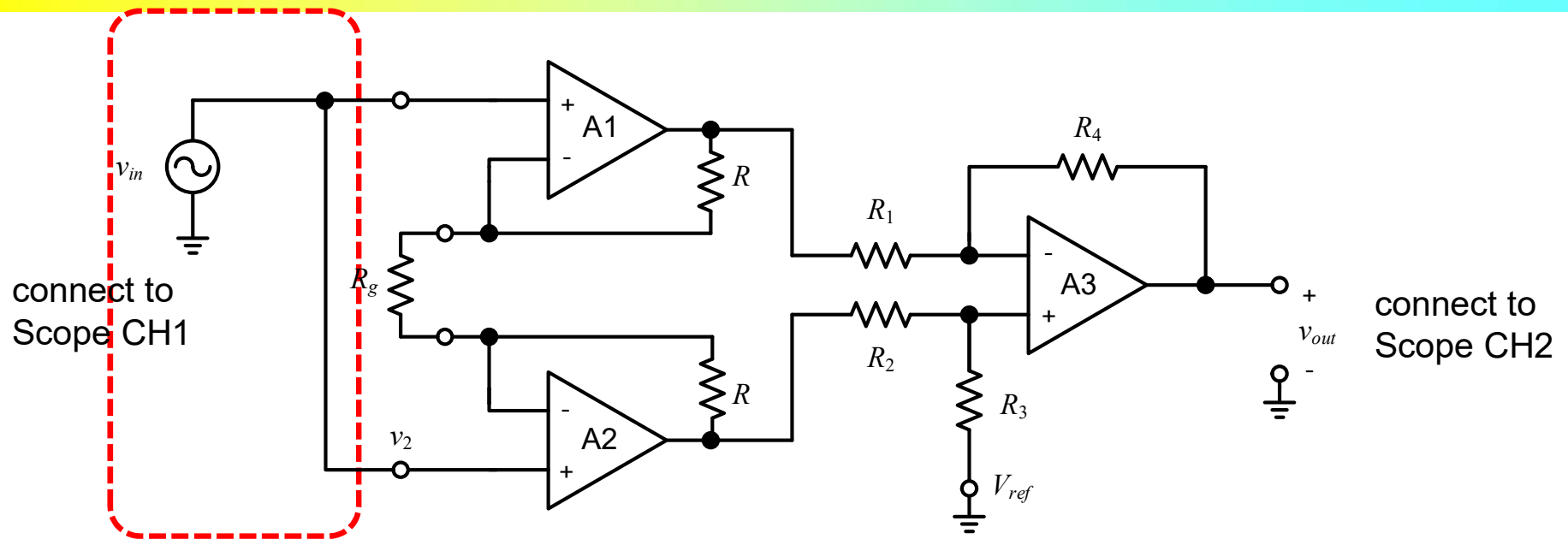
Ex 1: Differential and Common Mode Gain (A_{dm} and A_{cm})



วงจรสำหรับหาอัตราขยายผลต่าง

- ต่อวงจรขยายอินสตรูเมนต์เช่น โดยใช้ค่าความต้านทานที่ได้ออกแบบไว้
- ตั้ง v_{in} เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณไซน์ ความถี่ 1000 Hz
- ปรับค่าแรงดันของ v_{in} ตามที่กำหนดในการทดลอง ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปวัดแรงดันค่ายอดของ v_{in} และ v_{out}
- พล็อตกราฟระหว่าง v_{out} กับ v_{in}
- หาอัตราขยายผลต่างจากความชันของกราฟ

Ex 1: Differential and Common Mode Gain (A_{dm} and A_{cm})



วงจรสำหรับหาอัตราขยายผลรวม

- ต่วงจรตามรูป
- ตั้ง v_{in} เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณไซน์ ความถี่ 50 Hz ตั้งขนาดของสัญญาณ
- เพิ่มขนาดของสัญญาณไซน์ของสัญญาณขาเข้า V_{in} จนกระทั่งสามารถสังเกตเห็นสัญญาณขาออก V_{out} ที่ขั้วออก วัดขนาดจากยอดถึงยอด (Peak-to-peak value) ของสัญญาณขาเข้าและขาออกเพื่อใช้คำนวณหาอัตราขยายผลรวม

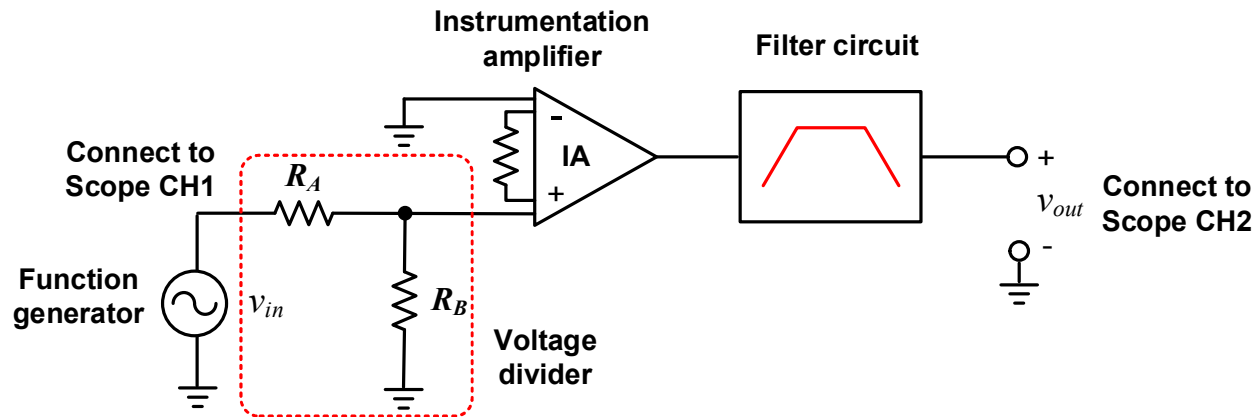
Remark



- ก่อนเริ่มการทดลองอันใหม่ ตรวจสอบการเชื่อมต่อภาค input ทุกครั้ง เพื่อความถูกต้องและรวดเร็วในการทดลอง ส่วนใหญ่ลืมปรับตรงส่วนนี้ทำให้วัดไม่ออกครับ
- การตั้งสเกลแกนเวลาให้เหมาะสมกับคาบของสัญญาณไซน์ ในแต่ละเงื่อนไขควรให้เห็นสัญญาณ 2-3 คาบของสัญญาณไซน์ที่ความถี่นั้นๆ

(หมายเหตุ พลาตตรงนี้กันค่อนข้างมาก)

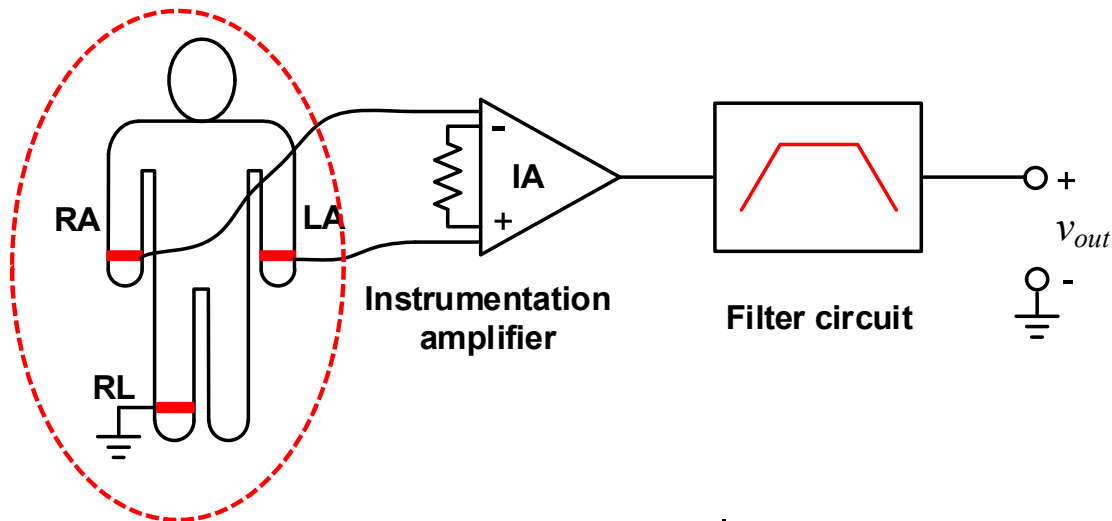
Ex 2: Frequency Response of an ECG Amplifier



วงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจซึ่งประกอบด้วยวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันและวงจรกรอง
และการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่

- สร้างวงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ โดยนำวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันมาต่อเข้ากับวงจรกรองที่ได้จากการทดลองในสัปดาห์แรก
- ต่อวงจรแบ่งแรงดัน ที่มีอัตราส่วนการแบ่งแรงดันให้ลดทอนสัญญาณลง 50 เท่า คำนวณค่าความต้านทานที่ต้องนำมาใช้ สาเหตุที่ต้องแบ่งแรงดันเนื่องจากเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในห้องปฏิบัติการฯ สามารถกำเนิดสัญญาณได้ขนาดเล็กสุด 100 mVpp ซึ่งถ้าป้อนเข้าวงจรโดยตรงจะเกิดการอิ่มตัวของวงจรได้ $Atten = \frac{R_B}{R_A + R_B}$
- ต่อขาเข้าของวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณ ผ่านทางวงจรแบ่งแรงดัน
- วัดแรงดันขาเข้าและขาออก โดยต่อ CH1 ของ DSO เข้ากับขาเข้าของวงจรขยาย และ CH2 เข้ากับขาออกของวงจรกรอง
- ป้อนสัญญาณไซน์ที่ความถี่ตั้งแต่ 0.1 – 1000 Hz คำนวณค่าอัตราขยาย $Gain(dB) = 20 \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in} \times Atten} \right)$
- พล็อตกราฟของอัตราขยายเทียบกับความถี่

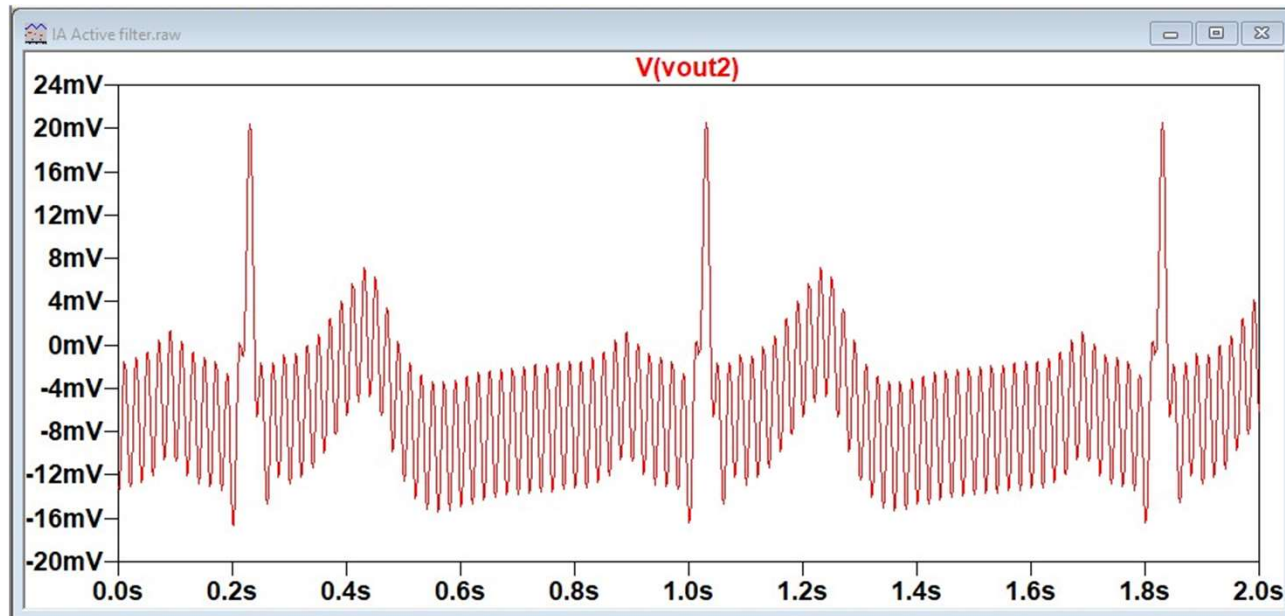
Ex 3: ECG Measurement



การวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

- ใช้วงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ
- ให้สมาชิกในกลุ่ม 1 คน เป็นอาสาสมัคร ในการวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ นำสายสัญญาณและขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่กำหนดให้ ต่อเข้ากับแขนซ้าย แขนขวา และขาขวา ต่อขาออกของวงจรเข้ากับ DSO CH1
- ปรับสเกลแนวอนของออสซิลโลสโคป ให้เห็นรูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ประมาณ 2-4 รูปคลื่น
- ปรับสเกลแกนตั้งของออสซิลโลสโคป ให้เห็นรูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจอย่างสวยงามและชัดเจน
- บันทึกรูปคลื่นสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจลงใน thumb drive โดยบันทึกแบบเป็นไฟล์รูปภาพ (นามสกุล .png หรือ .jpg) และ บันทึกแบบเป็นไฟล์ข้อมูล (นามสกุล .CSV)

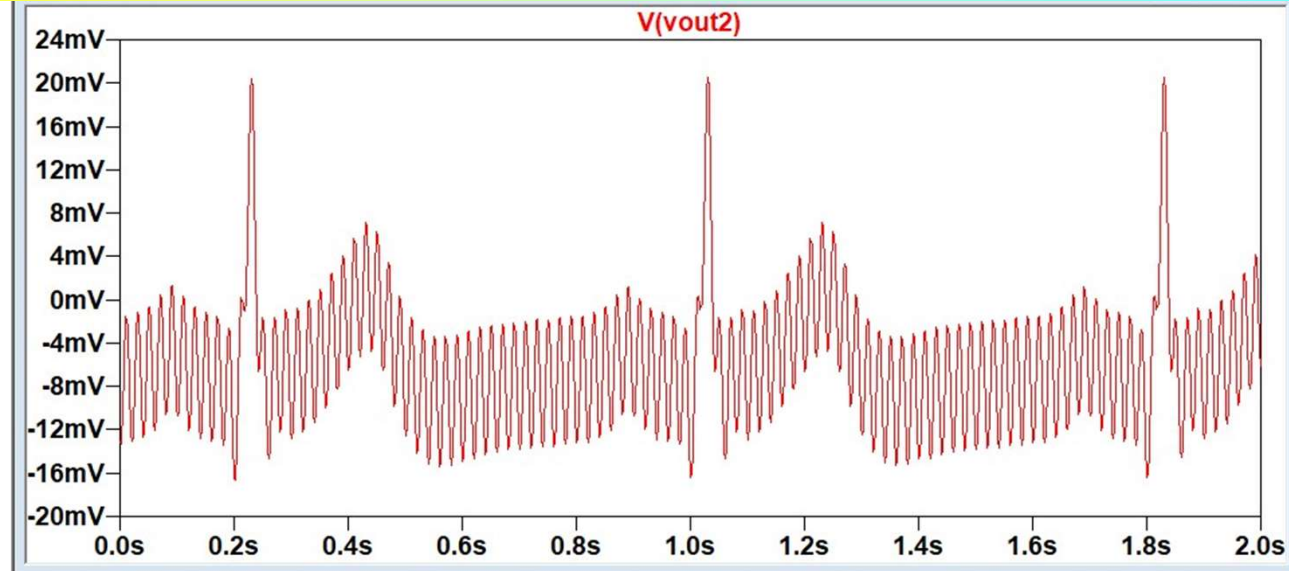
ECG Module: Denoise



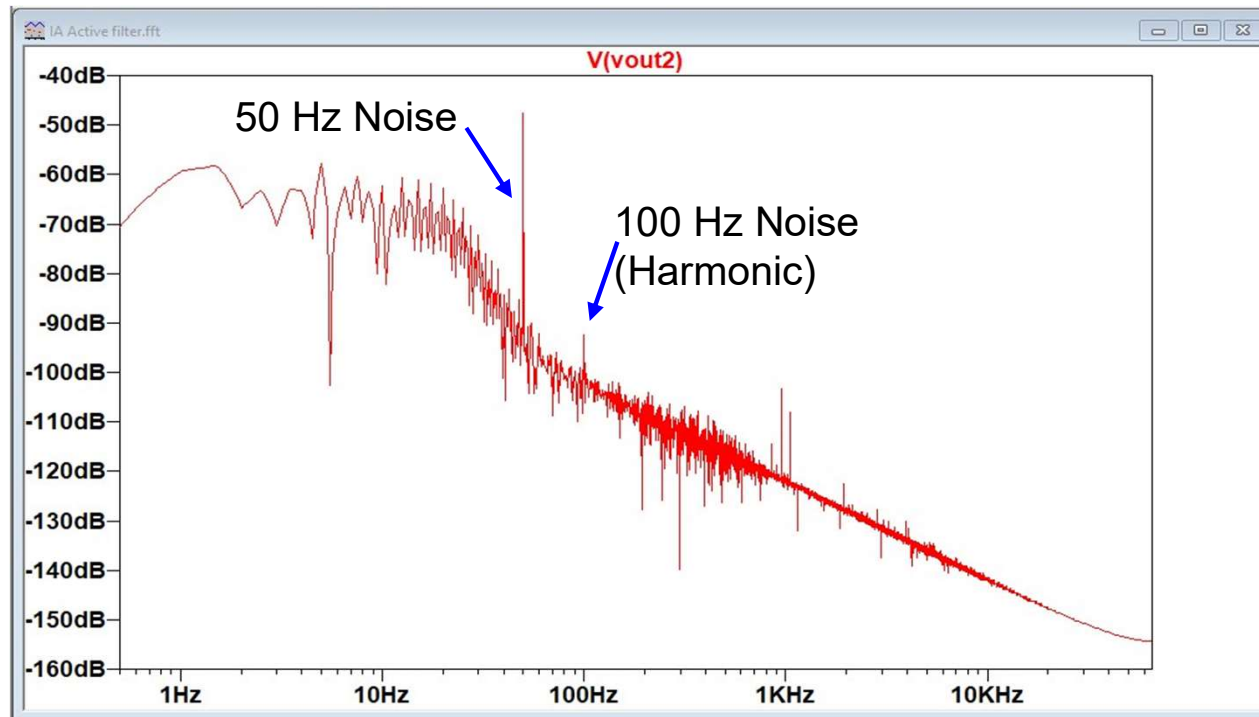
$$y(t) = x(t) + n(t) = x(t) + a \cos(2\pi f_n t)$$

Here $x(t)$ is ECG and $n(t)$ is the signal with constant frequency of 50 Hz

ECG Module: Denoise



FFT (Fast Fourier Transform)



Discrete Fourier Transform (DFT)

Discrete Fourier transform converts the time domain signal to the frequency domain components. The time domain signal is a finite sequence of discrete-time samples

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

$x(n)$ is the time domain signal sampled at the sampling rate f_s or the sampling interval $T_s = 1/f_s$

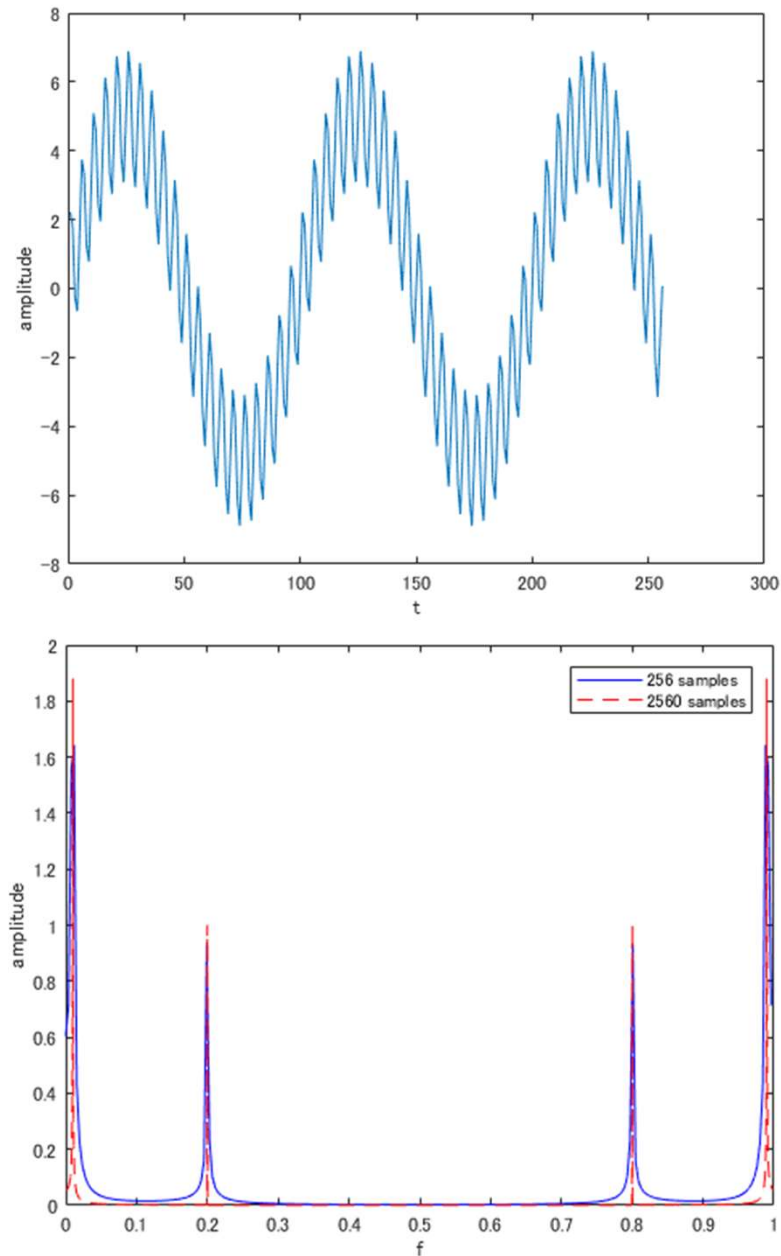
$$x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)$$

$X(k)$ is the frequency domain signal.

$$X(0), X(1), X(2), \dots, X(N-1)$$

Where $f_k = \frac{k}{N} f_s = k\Delta f$ and $\Delta f = \frac{1}{N} f_s$

Discrete Fourier Transform



$$x(n) = 5 \sin 2\pi 0.01 n T_S + \sin 2\pi 0.2 n T_S$$

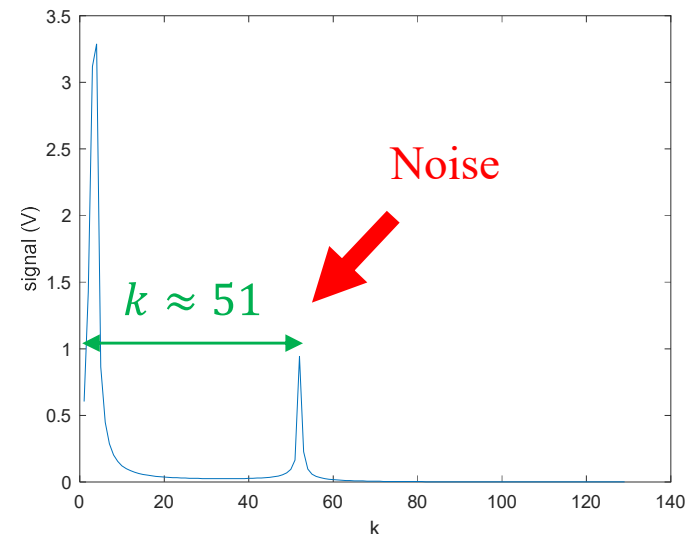
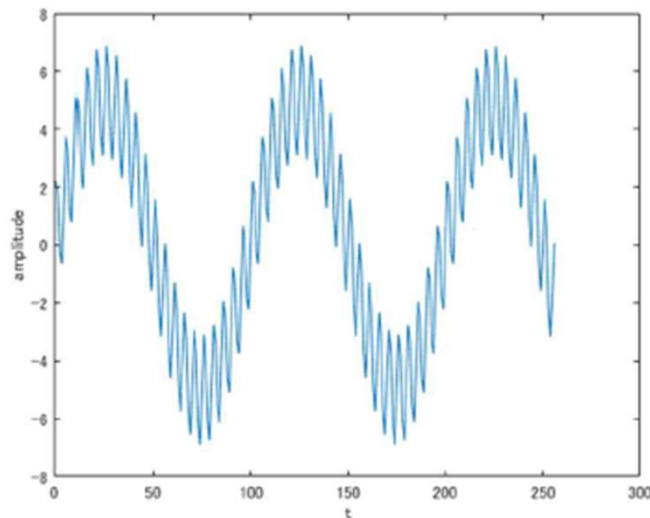
$$T_S = 1 \text{ sec or } f_S = 1 \text{ Hz}$$

Example of DFT signals with different number of samples

Ex 1: Signal generation

$$S(n) = 5\sin 2\pi 0.01nT_S + \sin 2\pi 0.2nT_S$$

- ใช้ LabVIEW สร้างสัญญาณซึ่งผลรวมของสัญญาณไซน์สองความถี่
 - i. ความยาวของสัญญาณทั้งสองเท่ากับ 256 Samples
 - ii. สุ่มสัญญาณทั้งสองด้วยอัตราการสุ่ม 1 Hz ($f_S = 1$ Hz หรือ $T_S = 1$ sec)
 - iii. สัญญาณไซน์ตัวที่ 1 แสดงสัญญาณตั้งต้นมี Amplitude เท่ากับ 5 และมีความถี่เท่ากับ 0.01 Hz (สัญญาณ 100 ตัวแสดงค่าสัญญาณไซน์ 1 คาบ)
 - iv. สัญญาณไซน์ตัวที่ 2 แสดงสัญญาณรบกวนมี Amplitude เท่ากับ 1 และมีความถี่เท่ากับ 0.2 Hz (สัญญาณ 5 ตัวแสดงค่าสัญญาณไซน์ 1 คาบ)
- ใช้ LabVIEW คำนวณ DFT ของสัญญาณ $S(n)$
- จากกราฟของหาตำแหน่งของสัญญาณรบกวน $f_0 \approx \frac{k}{N} f_S$



Ex 2: IIR Filter and Butterworth Filter: Notch Filter

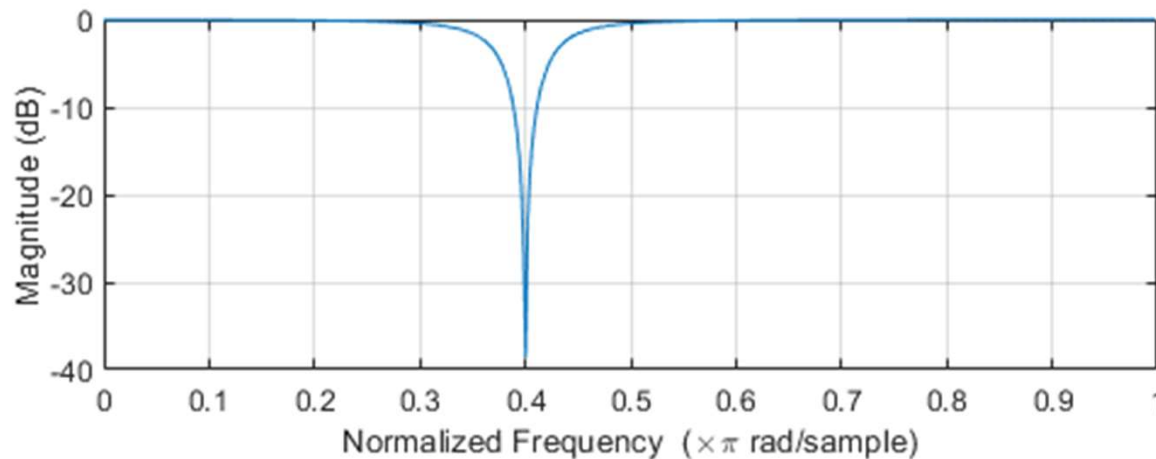
- สร้าง Notch filter โดยใช้ IIR

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

โดยที่ a และ b เป็นสัมประสิทธิ์ที่ต้องนำไปใส่ใน LabVIEW

$$\omega_n = 2\pi \frac{f_0}{f_s} = 2\pi \frac{k}{N} \quad \text{ตำแหน่งที่ต้องการกรองความถี่ออก และ}$$

r คือ สัมพันธ์กับความกว้างของ notch filter



ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ notch filter มี $\omega_n = 0.4\pi$ และ $r = 0.9$

Ex 2: IIR Filter and Butterworth Filter: Notch Filter

- สร้าง Notch filter โดยใช้ Butterworth polynomial อันดับ (Order) ที่ 7 โดยอาศัยคำสั่งใน LabVIEW ประเภทของวงจรกรอง (Filter type) ตั้งเป็น 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)
- กำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองทั้งสองดังนี้
 - a. วงจรกรอง Notch $f_s = 1$, f_0 ที่คำนวณได้จาก $\frac{k}{N}f_s$ และ $r = 0.9$ โดยที่
$$\omega_n = 2\pi \frac{f_0}{f_s}$$
 - b. วงจรกรอง Butterworth $f_s = 1$, $f_l = \frac{k}{N}f_s - 0.5\Delta$, $f_h = \frac{k}{N}f_s + 0.5\Delta$
เมื่อ $\Delta = 0.01$
- บันทึกผลการกรองจาก filter ทั้งสองที่ได้ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (สเปกตรัม)

Ex 3: Noise Reduction in ECG signal

- เปิดไฟล์สัญญาณ ECG ที่ได้จากการทดลองในการเรียนก่อนหน้านี้ โปรแกรม spreadsheet เช่น Excel ให้ใช้ข้อมูลเวลา เพื่อคำนวณหาค่า f_s และหาจำนวนข้อมูลทั้งหมด N
- เปลี่ยนสัญญาณ Input จากสัญญาณไซน์สองสัญญาณ เป็นสัญญาณ ECG ที่ได้จากการทดลองในการเรียนก่อนหน้านี้
- ประมวลค่า f_0/f_s ของสัญญาณรบกวนจากสเปกตรัมของสัญญาณจากค่า k/N
- ดัดแปลง code ของ Notch filter แบบ IIR ในการทดลองที่ผ่านมา ทดลองปรับค่า r ที่ให้ผลลัพธ์ที่มีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด
- ดัดแปลง code ของ Band-stop filter แบบ Butterworth ทดลองปรับค่า n อันดับของวงจรกรอง และ Δ เพื่อคำนวณค่า $f_l = \frac{k}{N}f_s - 0.5\Delta$, $f_h = \frac{k}{N}f_s + 0.5\Delta$ ของวงจรกรอง Butterworth ที่ให้ผลลัพธ์ที่มีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด
- บันทึกผลการกรองจาก filter ทั้งสองที่ได้ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (สเปกตรัม)