

2102447 ETRON ENG LAB

ELECTRONICS ENGINEERING LABORATORY

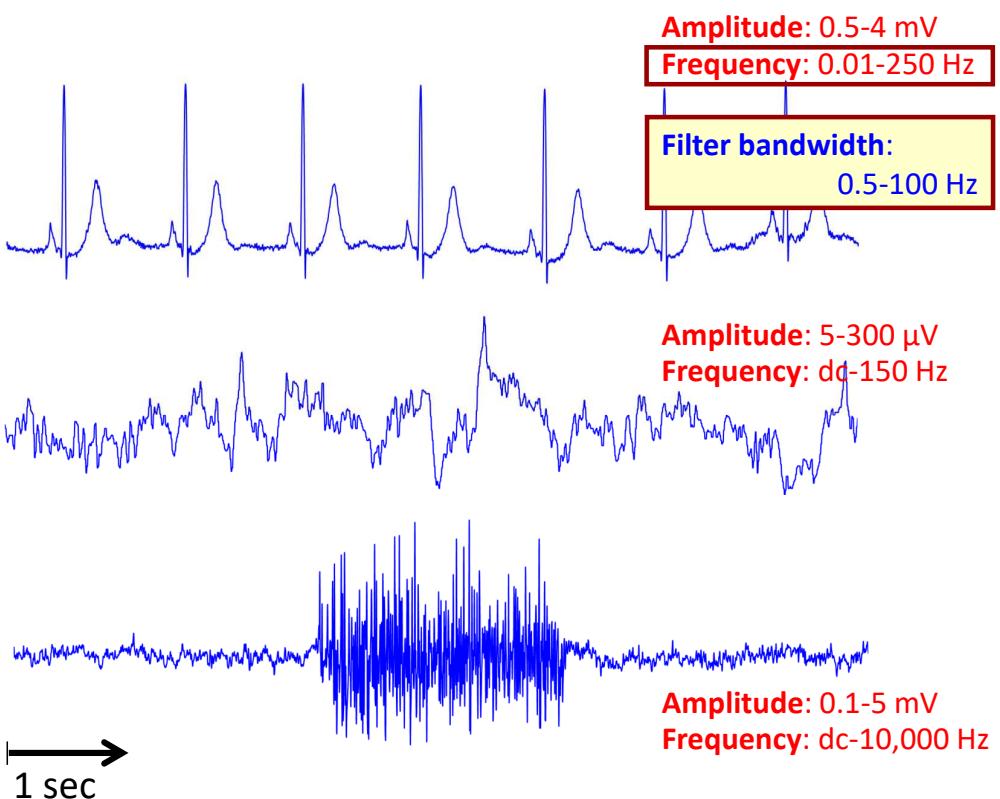
(ปฏิบัติการวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์)

ภาคการศึกษาต้น
ปีการศึกษา 2567

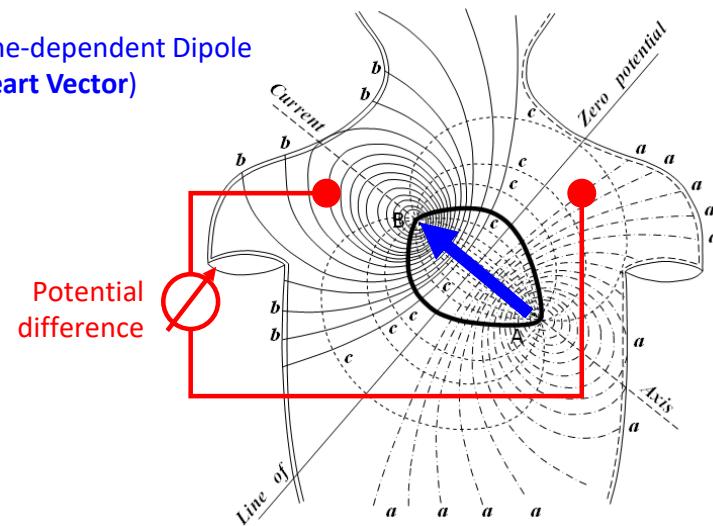
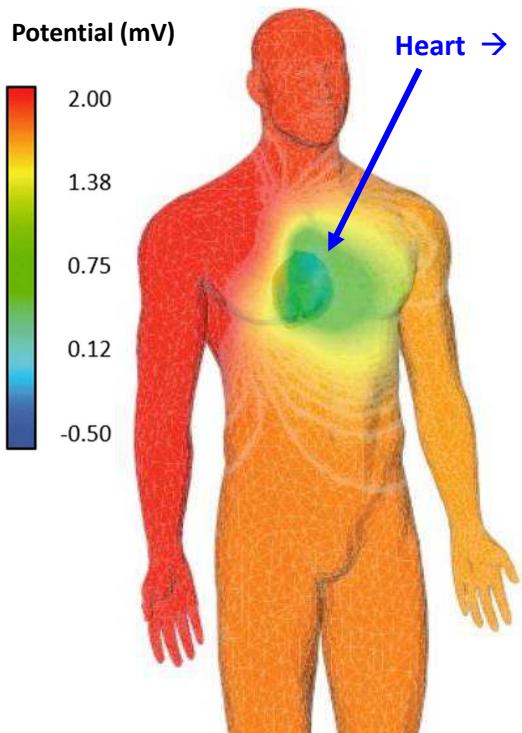
ผศ. ดร.อาภรณ์ ชีรัมมงคลส์มี
ผศ. ดร.อภิวัฒน์ เล็กอุทัย

สัญญาณศักย์ทางชีวภาพ (Biopotential Signal)

Electro-
cardiogram
(ECG)



สัญญาณศักย์ทางชีวภาพที่ตรวจวัดได้บนผิวนัง



การวัดจำเป็นต้องเลือกตำแหน่งของอิเล็กโทรดให้
“คร่อมแหล่งกำเนิด”

Credit: Image from Nejib Zemzemi



3

การตรวจวัด ECG แบบมาตรฐาน (12 leads)

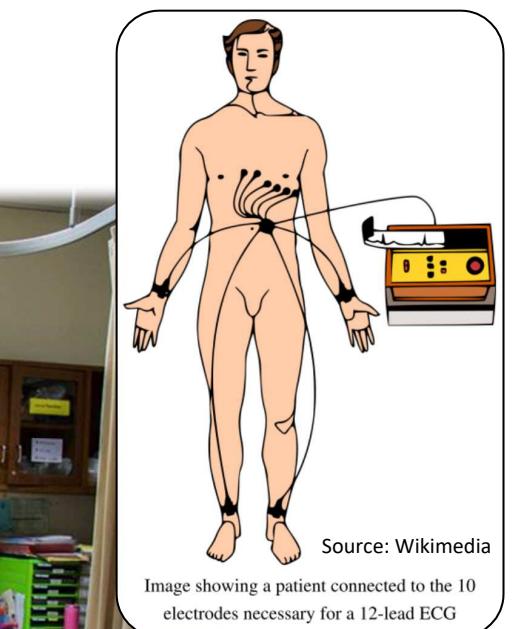
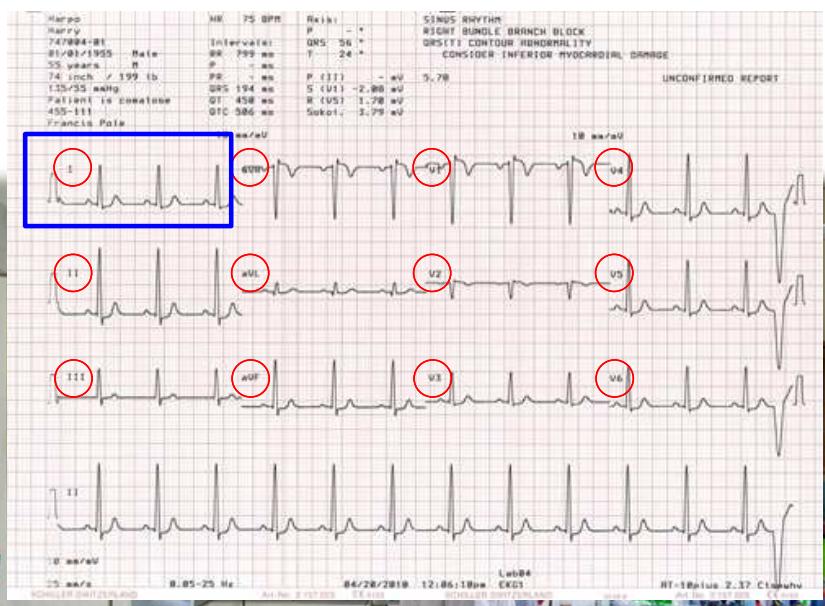
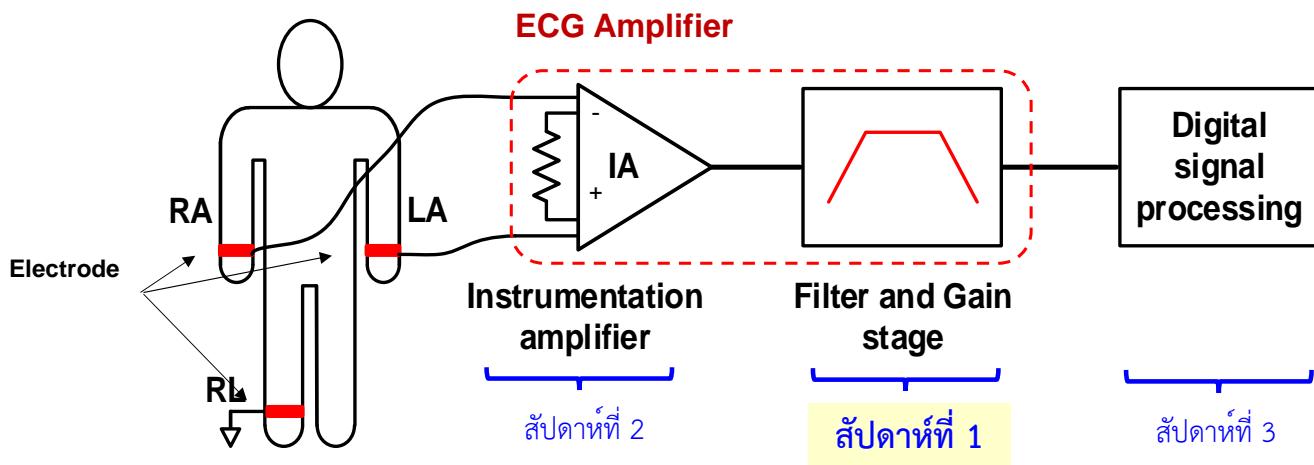


Image showing a patient connected to the 10 electrodes necessary for a 12-lead ECG

Image showing a patient connected to the 10 electrodes necessary for a 12-lead ECG

4

บล็อกไดอะแกรมของระบบวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ



RA = Right-Arm

LA = Left-Arm

RL = Right-Leg → common ของวงจร

หมายเหตุ: ควรทำงานที่ได้รับมอบหมายให้เสร็จในเวลาแล้ว

5

Assignment #1: Bandpass Filter (active)

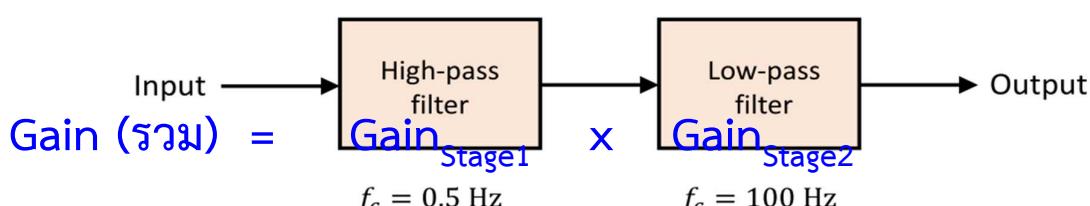
ให้นิสิตออกแบบและสร้างวงจรกรองผ่านแคบ

* แบนด์วิดท์ 0.5–100 Hz

โดยกำหนดให้วงจรกรองผ่านแคบประกอบด้วย

- 1) วงจรกรอง ผ่านสูงอันดับหนึ่งแบบไวงาน มีความถี่ตัดผ่าน = 0.5 Hz
- 2) วงจรกรอง ผ่านต่ำอันดับสองแบบไวงาน มีความถี่ตัดผ่าน = 100 Hz
- 3) ให้ กลุ่มที่ 3 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 80 เท่า
 กลุ่มที่ 4 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 90 เท่า
 กลุ่มที่ 5 สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย 100 เท่า
 ⋮
 กลุ่มที่ N สร้างวงจรกรองที่มีอัตราขยาย $(N+5)*10$ เท่า
- 4) นำวงจรทั้งสองล่วนมาต่ออนุกรมกัน

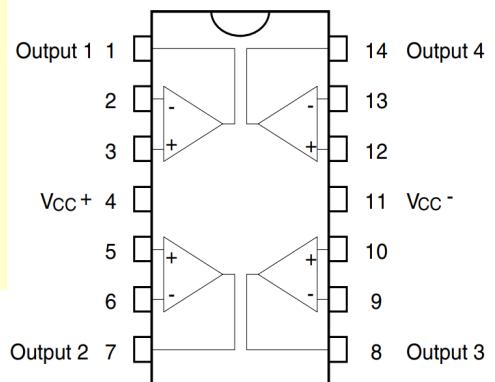
ให้ ภาคแรกเป็นวงจรกรองผ่านสูง และ ภาคที่สองเป็นวงจรกรองผ่านต่ำ



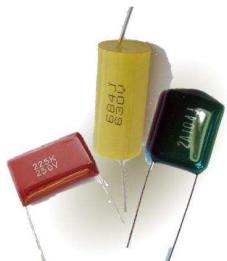
6

สิ่งที่กำหนดให้

- ไอซีอปแอมป์เบอร์ **TL064** จำนวน 1 ตัว
(ภายใต้ประกอบด้วยอปแอมป์ จำนวน 4 ตัว)
- ค่าความเก็บประจุที่ใช้ในวงจร คือ **$10nF - 1000nF$**
- ค่าความต้านทานที่ใช้ **$1k\Omega - 1000k\Omega$**
- แหล่งจ่ายไฟตรง **$\pm 9 V^*$** ให้ใช้เป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจร
- Breadboard (พยายามใช้เนื้อที่อย่างประยุกต์)



Film capacitor



Electrolyte capacitor



CourseVille:

→ [TL064 Datasheet](#)

→ [TL064 Spice model](#)

7

วิธีเพิ่มอุปกรณ์ใน LTspice (มี 2 วิธี)

Component Attribute Editor

Open Symbol: C:\Users\Apiwat\Documents\LTspiceXVII\lib\sym\OpAmps\opan

Attribute	Value	Vis.
Prefix	X	X
InstName	U2	X
SpiceModel		
Value	TL064	X
Value2		
SpiceLine		
SpiceLine2		

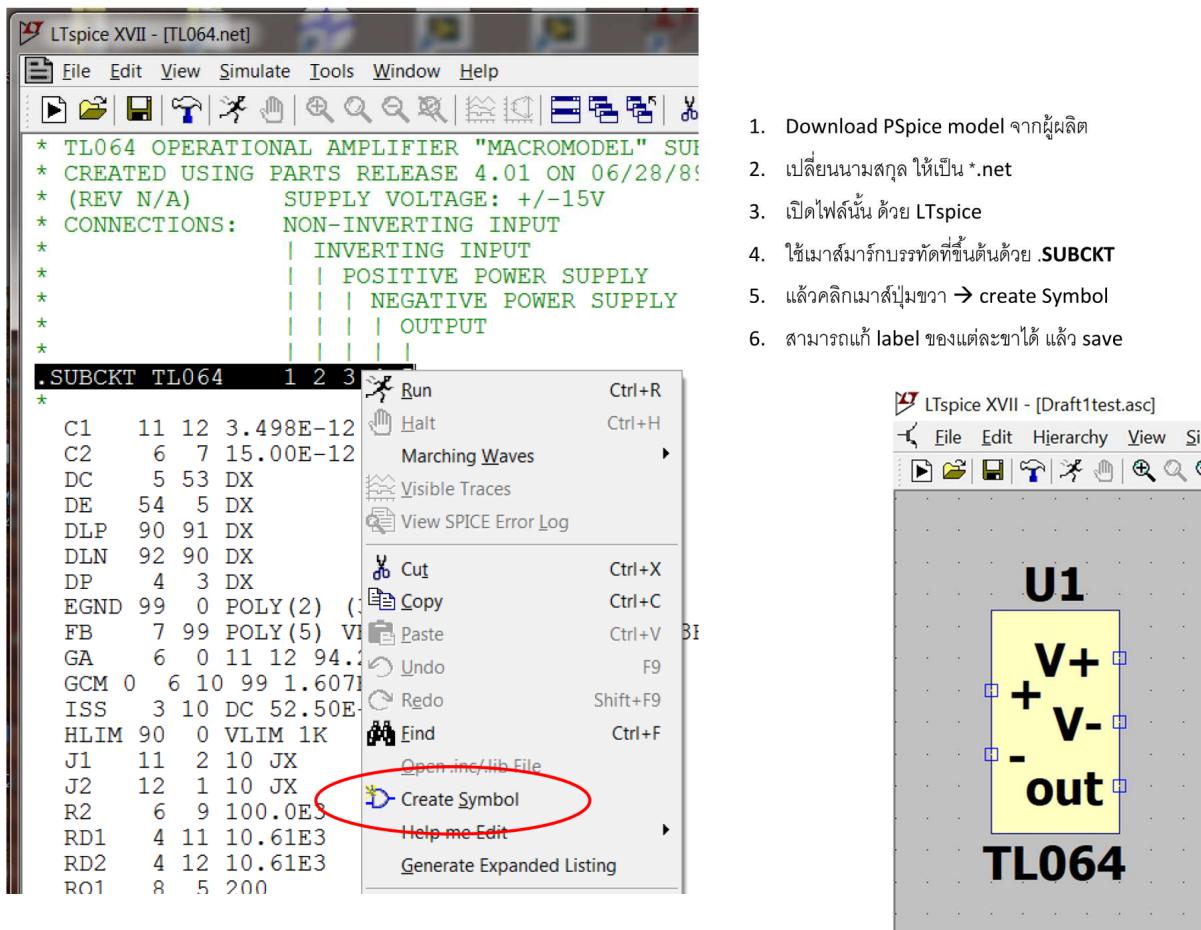
Cancel OK

1 OpAmp 2 2 3 .inc TL064.net .tran 0 .01 0 10u

R2
100k
U2
TL064
10
Rser=1m

8

วิธีเพิ่มอุปกรณ์ใน LTspice (มี 2 วิธี)



9

Standard Resistor Values: 5% tolerance

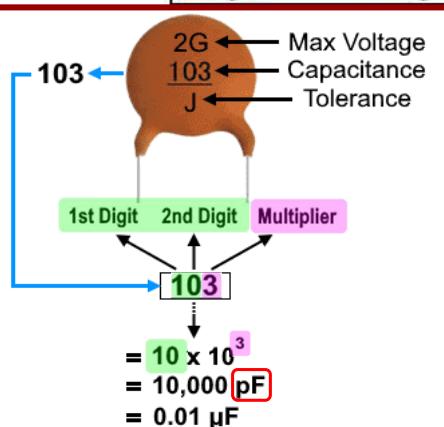
Standard Resistor Values ($\pm 5\%$)					
1.0	10	100	1.0K	10K	100K
1.1	11	110	1.1K	11K	110K
1.2	12	120	1.2K	12K	120K
1.3	13	130	1.3K	13K	130K
1.5	15	150	1.5K	15K	150K
1.6	16	160	1.6K	16K	160K
1.8	18	180	1.8K	18K	180K
2.0	20	200	2.0K	20K	200K
2.2	22	220	2.2K	22K	220K
2.4	24	240	2.4K	24K	240K
2.7	27	270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

* ห้ามนำมาอนุกรรม/ขานกัน
 (เลือกใช้ค่าใกล้เคียง)

10

Standard Capacitor Values: 10% tolerance

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



Max Voltage
Capacitance
Tolerance

1st Digit 2nd Digit Multiplier

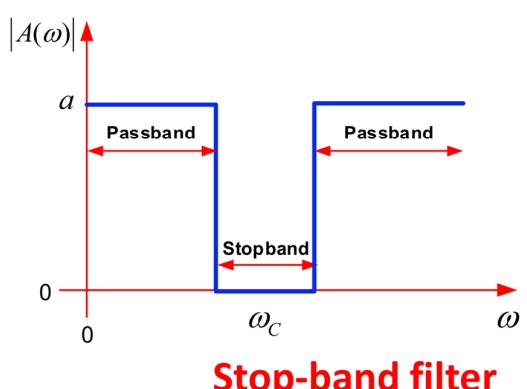
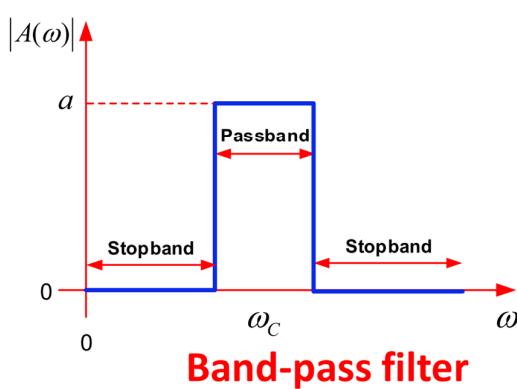
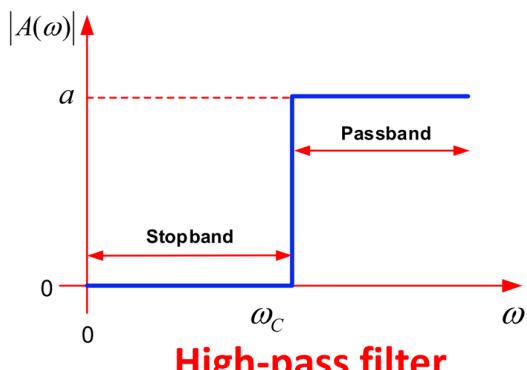
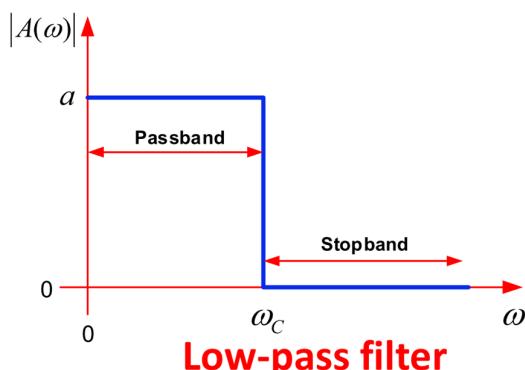
= 10×10^3
= 10,000 pF
= 0.01 μF

* ห้ามน้ำมันก្នុង/ខ្លាតក្នុង
(เลือกใช้គោតក្នុង)

11

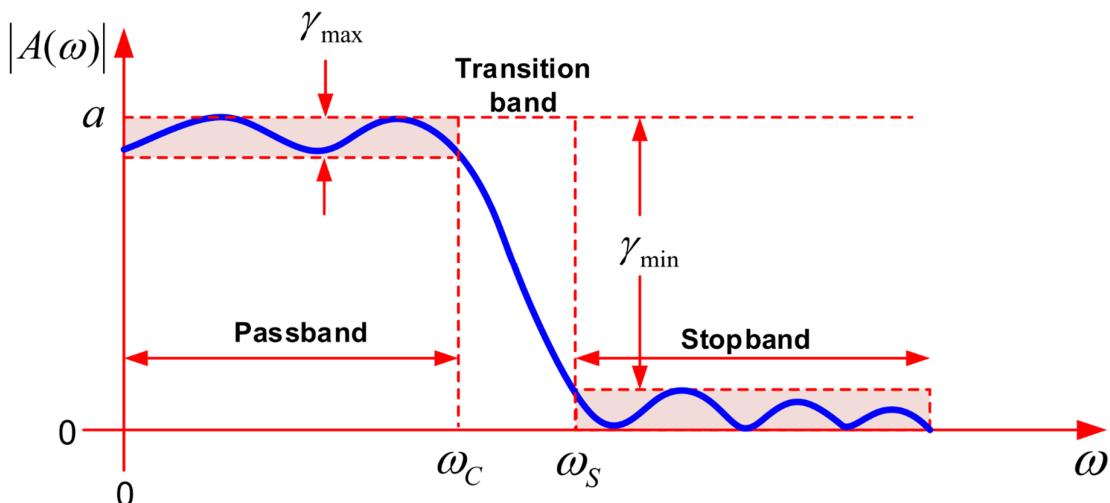
Filter Types

→ Receive an impure electrical signal and pass a desired signal and remove undesired components (noises).



12

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

13

Filter Design Tool

<https://tools.analog.com/en/filterwizard/>

Analog Filter Wizard

Filter Type Specifications Components Tolerances Next Steps Load Save Feedback Videos

Low-Pass

Passband: Gain: 0 dB, -3 dB at 10 kHz

Stopband: -40 dB at 40 kHz

Filter Response: Fewest Stages, Fastest Settling

View: Circuit

Stage A: 2nd order Low-Pass Sallen Key

Stage B: 2nd order Low-Pass Sallen Key

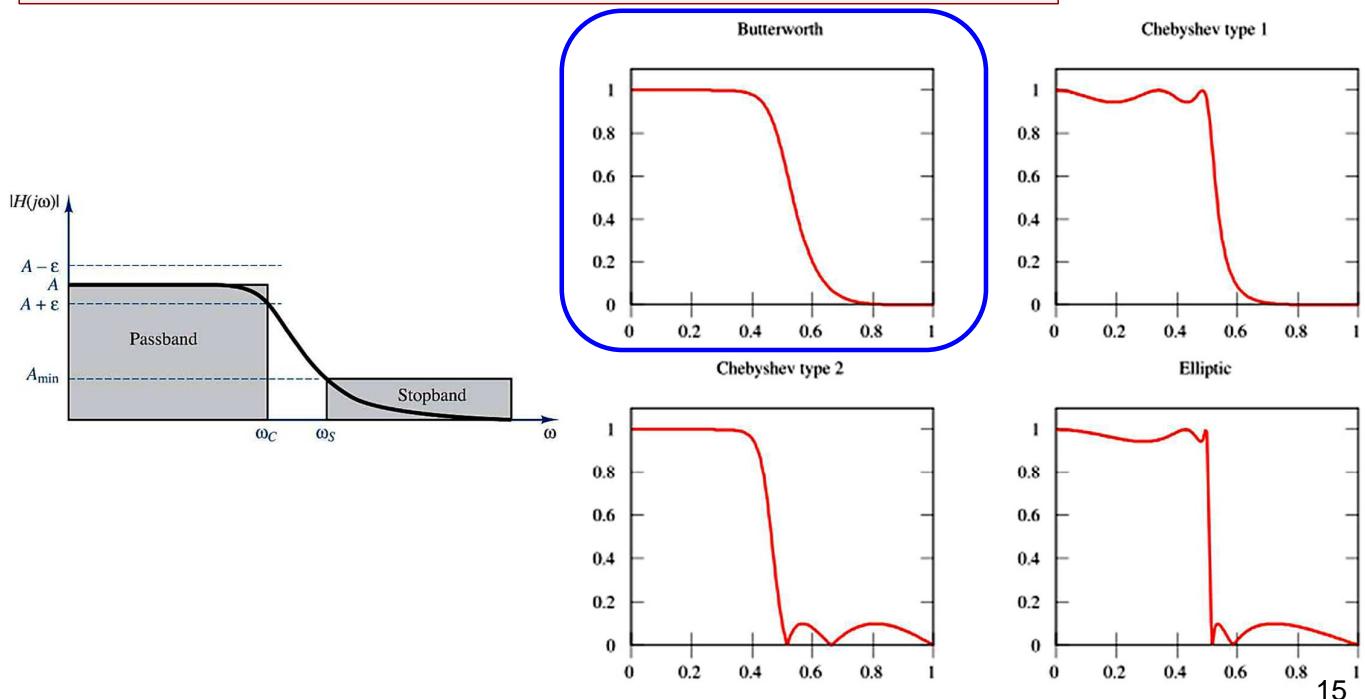
Circuit diagram:

```
IN --- 26.6kΩ --- 95.1kΩ --- 100pF --- ADA4096-2 --- 8.88kΩ --- 285kΩ --- 100pF --- ADA4096-2 --- OUT
```

14

Types of Active Filter

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



Butterworth Filter

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

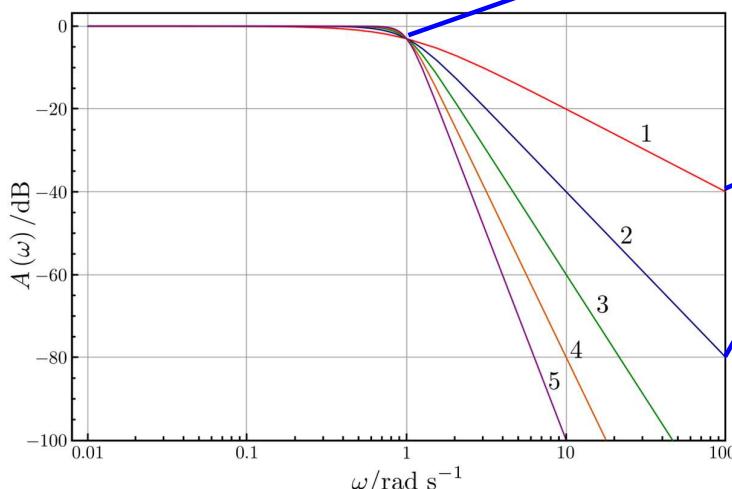
Butterworth low-pass filter: magnitude ratio

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

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

ω_c ความถี่หักมุม
(cut-off frequency)
-3 dB หรือ 0.707 เท่า

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



อัตราการเปลี่ยนแปลง
ของความถี่ (roll-off)

1 st order	-20dB/dec
2 nd order	-40dB/dec
3 rd order	-60dB/dec
...	

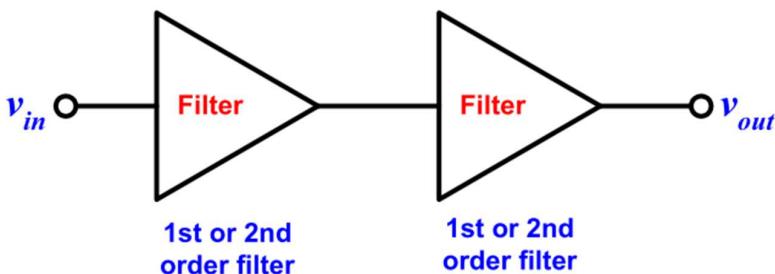
Normalized Butterworth Polynomials

Order n	Characteristic Equations	$s \equiv j\omega/\omega_c$
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	$(s+1)(s^2 + 0.6180s + 1)(s^2 + 1.6180s + 1)$	

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.



ขั้นตอน:

- 1) กระจายให้เป็น 1st หรือ 2nd order เท่านั้น
- 2) ใช้แต่สัมประสิทธิ์หน้า s (2nd order)

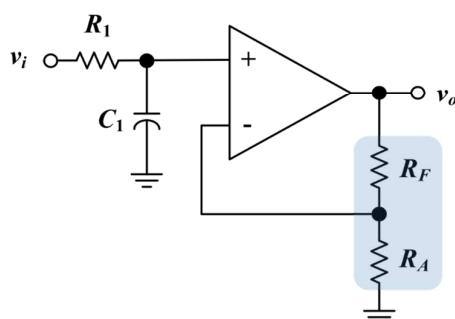
$$(s^2 + 2\zeta s + 1)$$

17

1st Order Active Filter (Low-pass)

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

$$(s + 1)$$



ผลตอบสนองเชิงความถี่

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

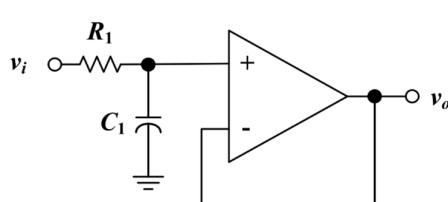
อัตราขยายที่ความถี่ต่ำ

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

ความถี่ตัดผ่าน

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

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับหนึ่งที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1



ผลตอบสนองเชิงความถี่

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

อัตราขยายที่ความถี่ต่ำ

$$A(0) = 1$$

ความถี่ตัดผ่าน

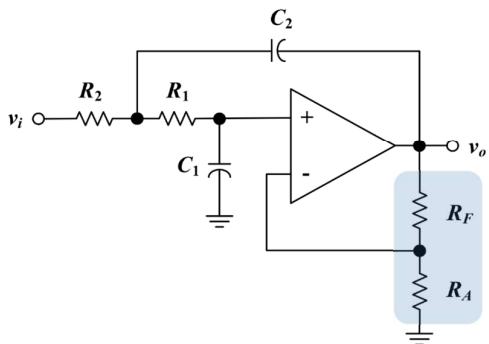
$$\omega_C = \frac{1}{R_1 C_1}$$

18

2nd Order Active Filter (Low-pass)

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

$(s^2 + 2\zeta s + 1)$



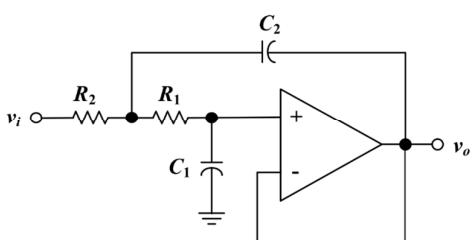
ผลตอบสนองเชิงความถี่ $A_{LF}(j\omega) = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right) \frac{1}{1 + j\omega \left((R_1 + R_2)C_1 - \frac{R_F}{R_A}R_2C_2\right) + (j\omega)^2 (R_1C_1R_2C_2)}$

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

ความถี่ตัดผ่าน $\omega_C = \frac{1}{\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}$

ตัวประกบคุณภาพ $\frac{1}{Q} = 2\zeta = \omega_C \left[(R_1 + R_2)C_1 - \frac{R_F}{R_A}R_2C_2 \right]$

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสองที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1



ผลตอบสนองเชิงความถี่ $A_{LF}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega(R_1 + R_2)C_1 + (j\omega)^2 (R_1C_1R_2C_2)}$

อัตราขยายที่ความถี่ต่ำ $A(0) = 1$

ความถี่ตัดผ่าน $\omega_C = \frac{1}{\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}$

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

19

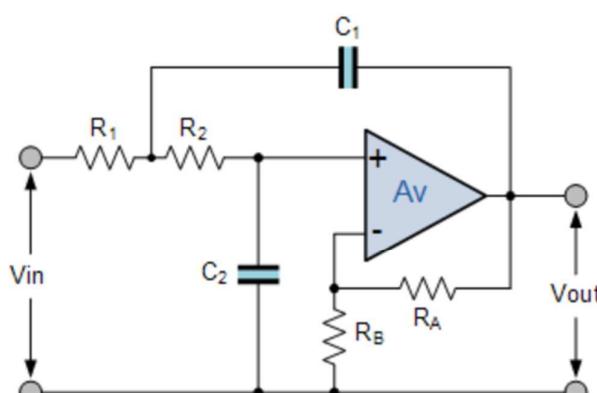
2nd Order Active Filter (Low-pass)

$(s^2 + 2\zeta s + 1)$

Order n

2 $s^2 + \sqrt{2}s + 1$

$\rightarrow 2\zeta = \sqrt{2}$



Gain (Av) = $1 + \frac{R_A}{R_B}$

If Resistor and Capacitor values are different:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$$

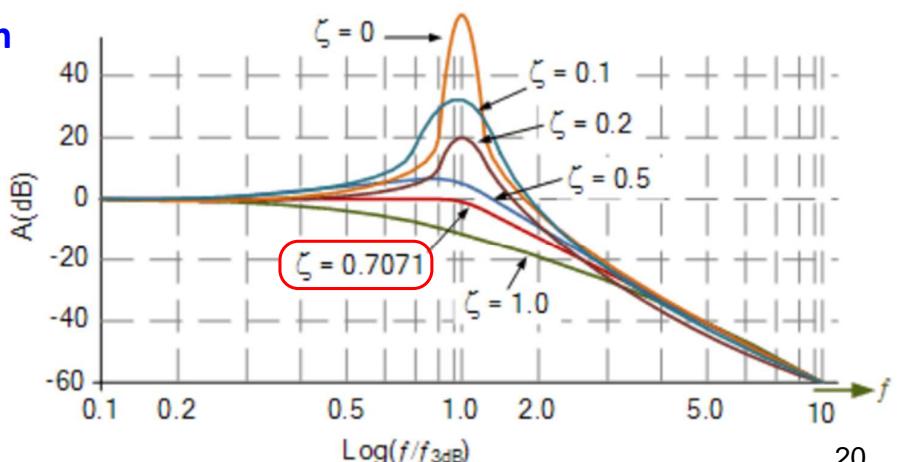
If Resistor and Capacitor values are the same:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Generally to maintain stability, an **active filters gain** for a non-inverting amplifier configuration must lie somewhere between **1-3**.

- Q: Quality factor
- ζ : Damping factor

$$\zeta = 1/2Q$$



Design Examples (4th order low-pass)

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

วงจรกรองผ่านต่ำอันดับสี่ สามารถสร้างจากรองผ่านต่ำอันดับสอง 2 วงจรมาต่ออนุกรมกัน

จากตาราง Normalized Butterworth polynomial อันดับสี่

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

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

$$(s^2 + 2\zeta_1 s + 1)(s^2 + 2\zeta_2 s + 1) = (s^2 + 0.7654s + 1)(s^2 + 1.8478s + 1)$$

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

เลือกสูตรจาก 2nd order แบบ Gain = 1

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} = 6.2832 \text{ krad/s}$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \omega_C (R_1 + R_2) C_1 = 3.1416 \times 10^3 (R_1 + R_2) C_1$$

21

Design Examples

สำหรับวงจรกรองอันดับสอง วงจรที่ 1 $\zeta_1 = 0.3827$ เนื่องจากมีสองเงื่อนไขของ

#1

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

เลือก C ก่อน

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 และมีค่าเป็นจำนวนจริงบวกและเท่ากันใน
การต่อวงจร 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 ที่เท่ากัน ในกรณีข้างบน จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไข

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

22

Design Examples

สำหรับวงจรกรองอันดับสอง วงจรที่ 2 $\zeta_1 = 0.9239$ เนื่องจากมีสองจีโอน์ไขของ

#2

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

เลือก C ก่อน

ในที่นี่ 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 และมีค่าเป็นจำนวนจริงบวกและเหมาะสมใน การต่อวงจร อาจจะต้องมีการลองผิดลองถูกดู

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

$$R_1 + R_2 = 29.409 \text{ k}\Omega$$

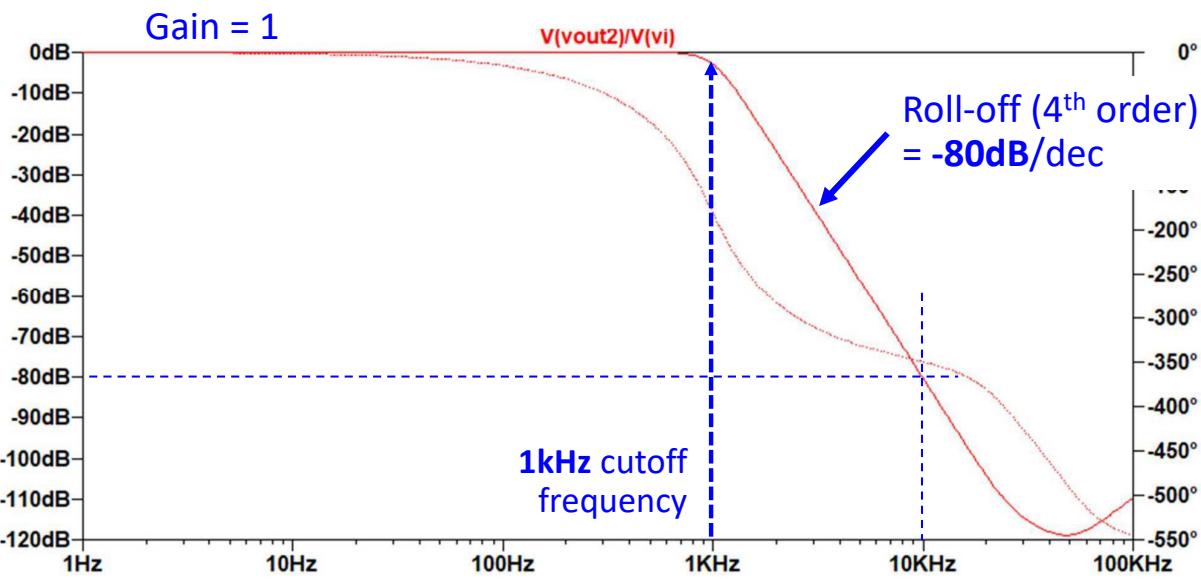
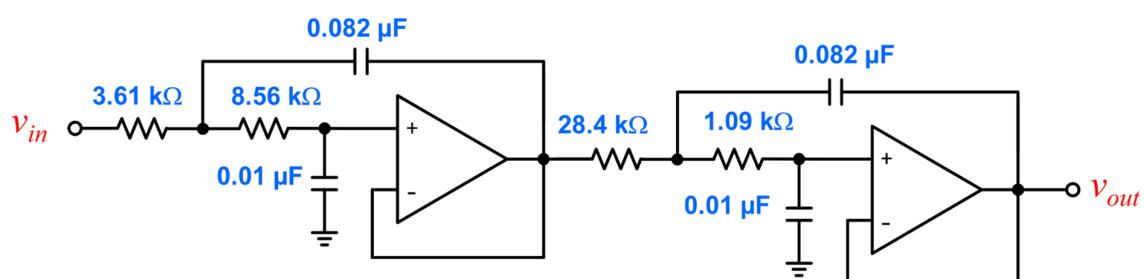
$$R_1 R_2 = 30.89 \times 10^6$$

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

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

23

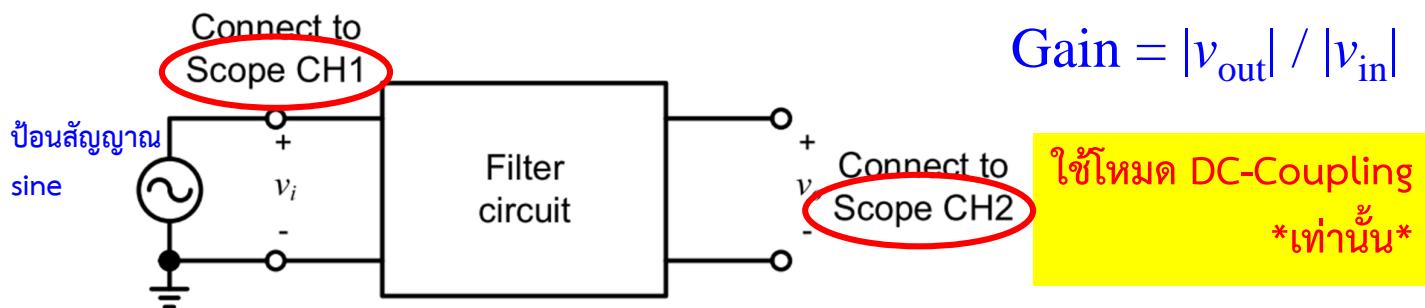
Design Examples



24

→ ดูใบงานในชีทแล็ปประกอบ

1. คำนวณค่า R, C
2. Sim ใน LTspice
3. ต่อวงจรบน breadboard
4. วัด Frequency Response (แบบ manual*)

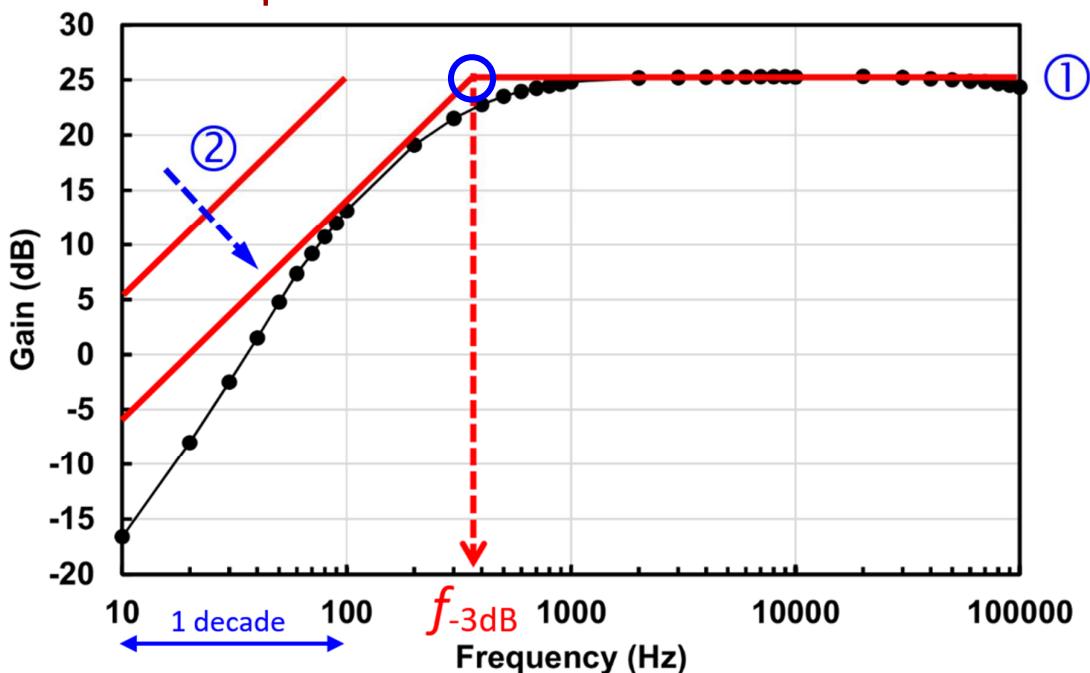


25

วิธีการหาค่าความถี่ตัดผ่าน ($f_{\text{cut-off}}$) จากกราฟ*

→ ชีทแล็ป (หน้าสุดท้าย)

* ไม่ใช่นิยาม -3dB



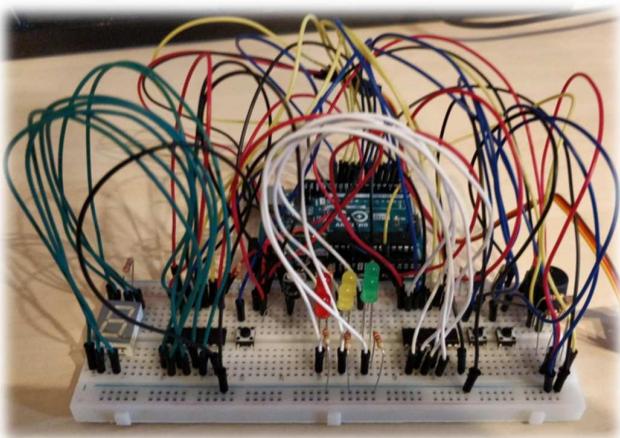
เป็นจุดตัดระหว่างเส้นกำกับ (asymptote) 2 เส้นดังนี้

(1) เส้นกำกับในแนวนอนให้สัมผัสกับแนวจุดข้อมูลที่วัดได้ (ซึ่งเป็นอัตราขยายในช่วง pass band)

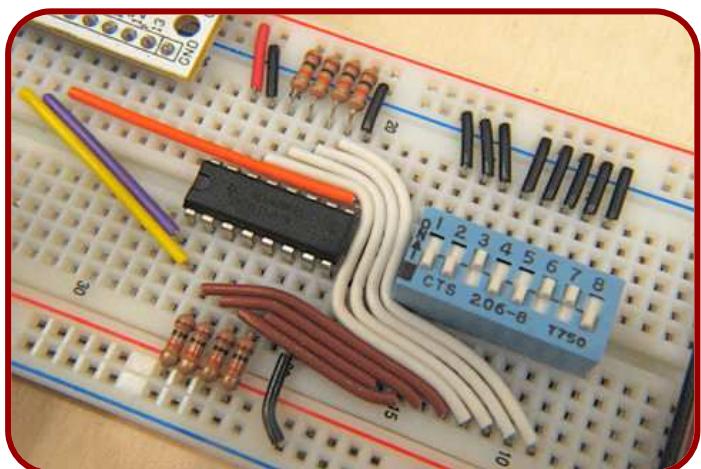
(2) เส้นตรงอีกเส้นในช่วง stop band ที่มีความชันเป็นบวกหรือลบ แล้วแต่กรณี

26

การต่อวงจรบน Breadboard



VS



27

ส่งรายงานใน CourseVille

Sec วันศุกร์ ส่งงานภายใน
วันพุธที่ 5 ก.ย. 67 เวลา 23.59 น.

- * ให้ส่งรายงานในรูปแบบ pdf
- * ใส่ชื่อกลุ่ม สมาชิกให้ครบถ้วน

S2G3ชาไทยสเลอปี



Natwara Wongrujjirawanich
Proudniphat Yugtanond
Nantiya Tanasupawat

S2G8 สจ.ปีสั้งลุย



Sarith Rapeearpakul
Nanthaphat Suwanmanee
Theeramate I-nala

S2G10ธระผู้ใหญ่



Pawit Rungtivasuwan
Sathonthorn Somnam
Naratorn Boonprasit

**S2G5 ผู้นำดูดวง
อนัญชี**



Kanisorn Ananwattanawit
Yanathip Bangvirunrak
Thanabordee Kritpiphat

S2G12ตามนั้นคับ



Panapon Pimpunchat
Pichak Tusanapeerapon
Supakit Chongsiriratanakul

S2G7 AskchatGPT



Chayuth Thanakitkoses
Soontorn Saelim
Thanakorn Srimongkol

**S2G6กลุ่มนี้ได้A
ผลลัพธ์ไม่แนบ
แต่ก็ทั้งกุ้ม**



28