

REPORT

Experiment 1: Basic AC Sweep Configuration

電路分析:

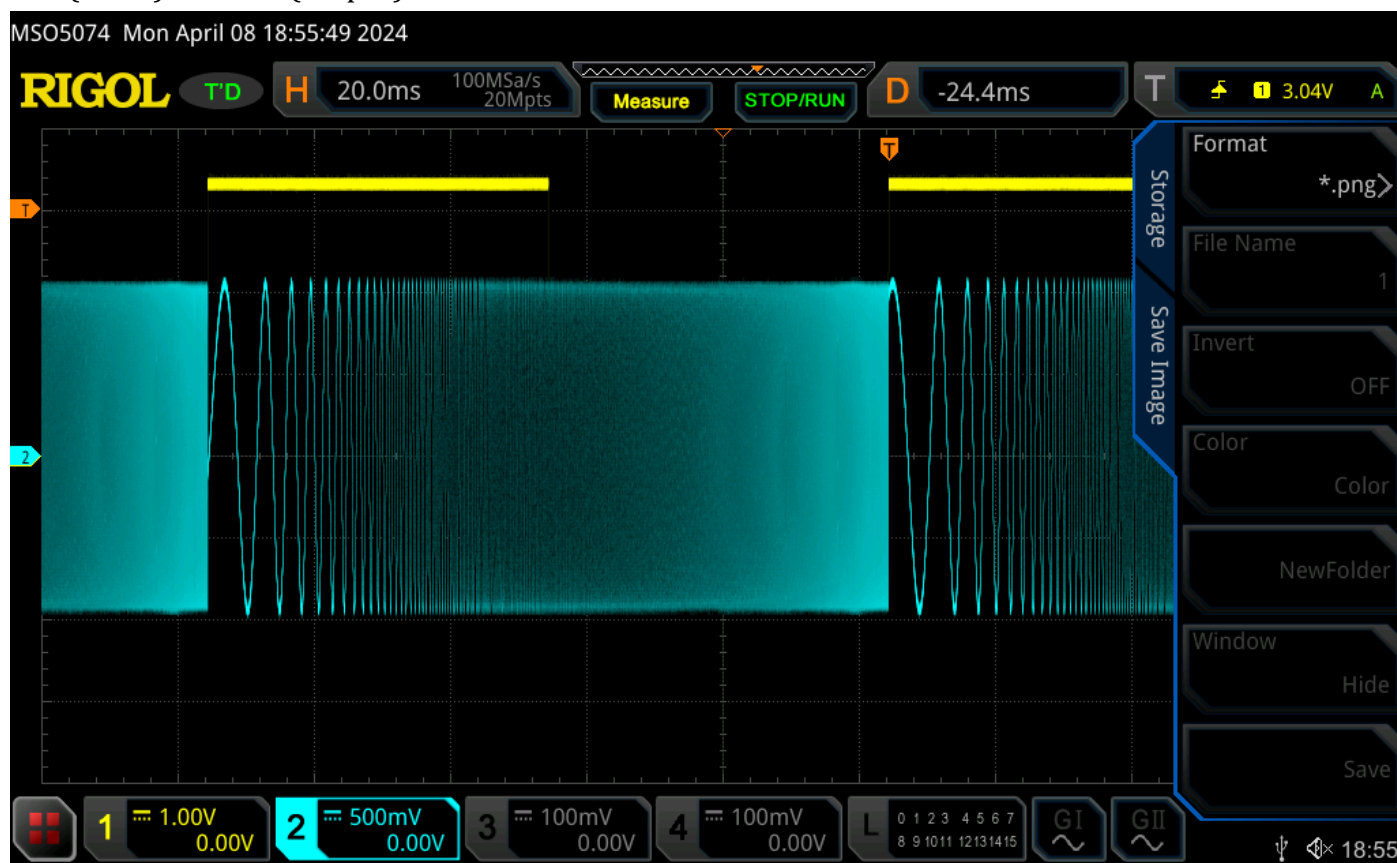
函數產生器的 sync 端口串接示波器的 Ch1；函數產生器的 output1 端口串接示波器的 Ch2。

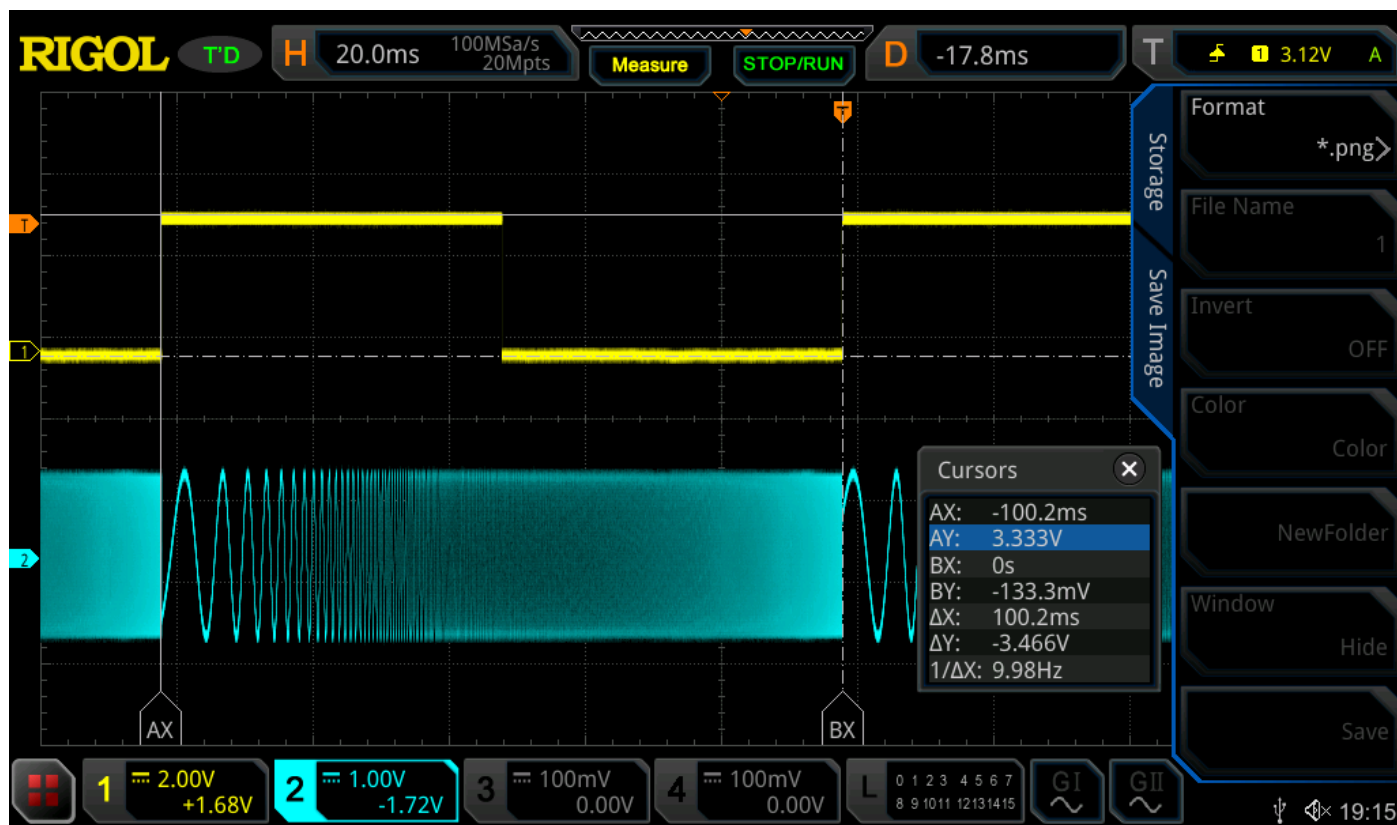
AC Sweep 是什麼？

AC Sweep 是一種在電子學和信號處理領域常見的技術，用於分析電路中交流(AC)信號的行為。透過在一個或多個電路元件的頻率被以一定範圍內的連續值進行改變，此技術主要用於模擬和測試電路在不同頻率下的響應，同時觀察和記錄相應的輸出，也包括觀察各種頻率波段被過濾的情形，這對於設計和優化許多電子產品系統之電路至關重要，也可以幫助工程師了解電路對於不同頻率下的響應情況，從而優化設計並確保其正常運作。

2.

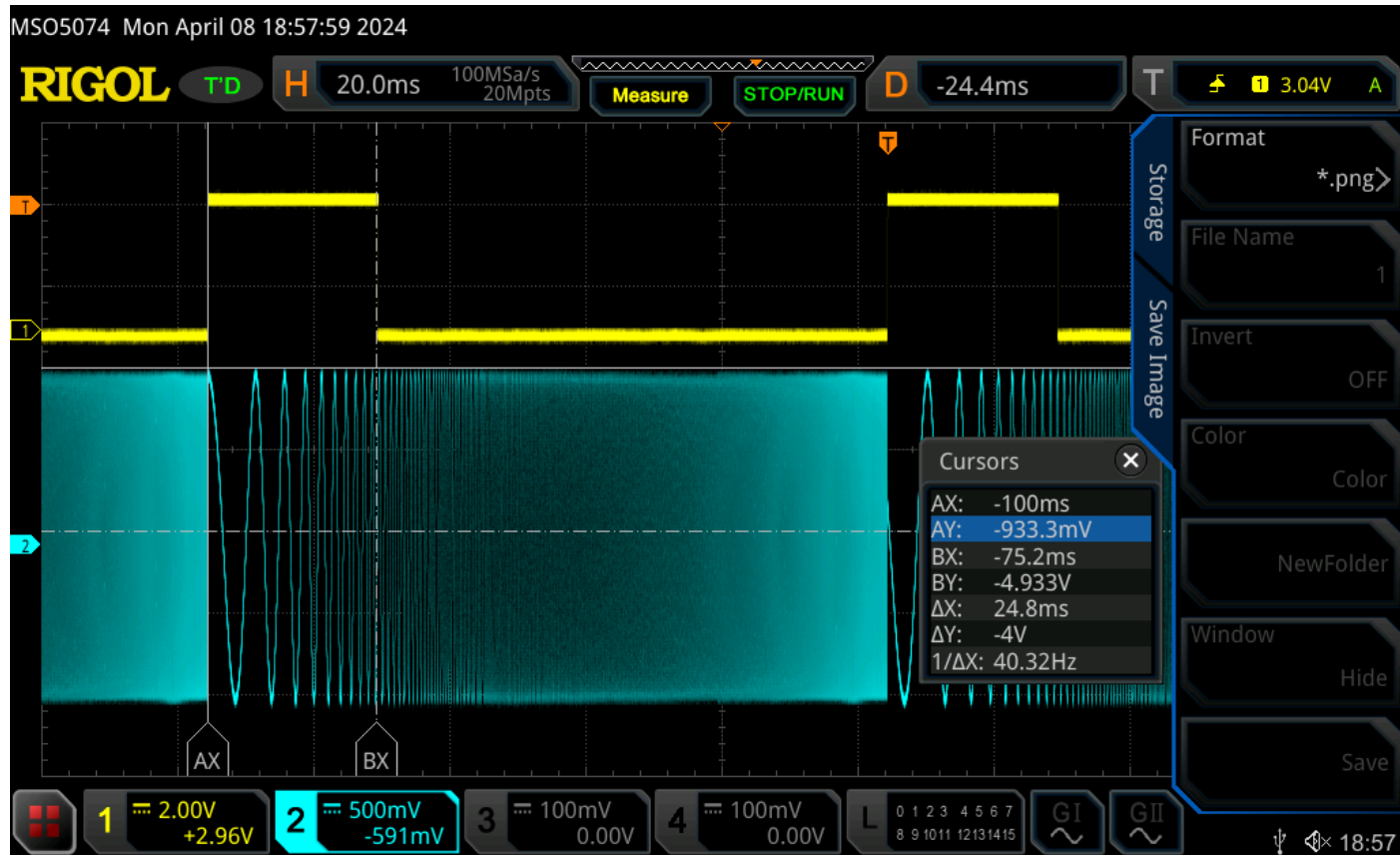
CH1(SYNC) and CH2(output) waveform with marker= off



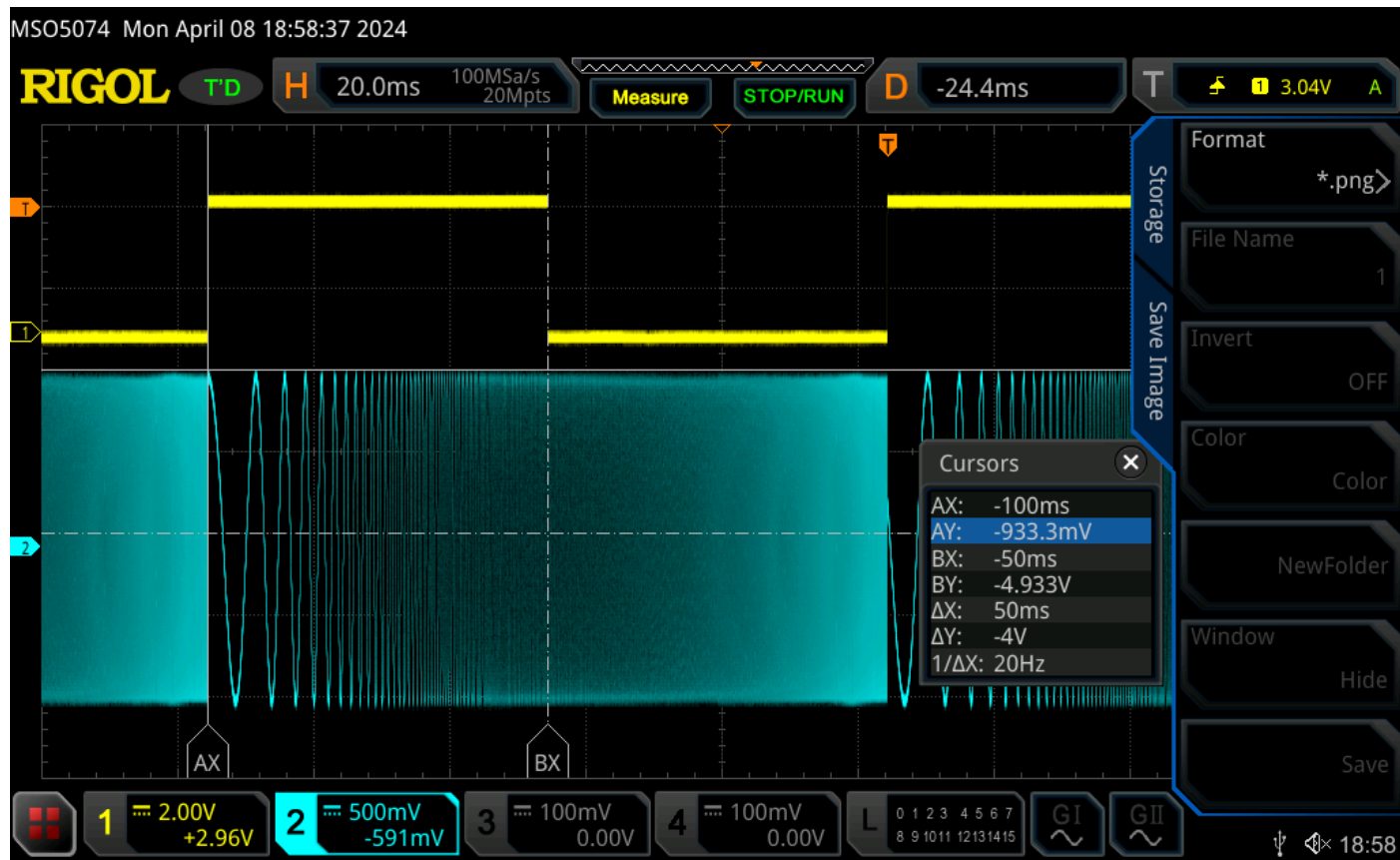


3.

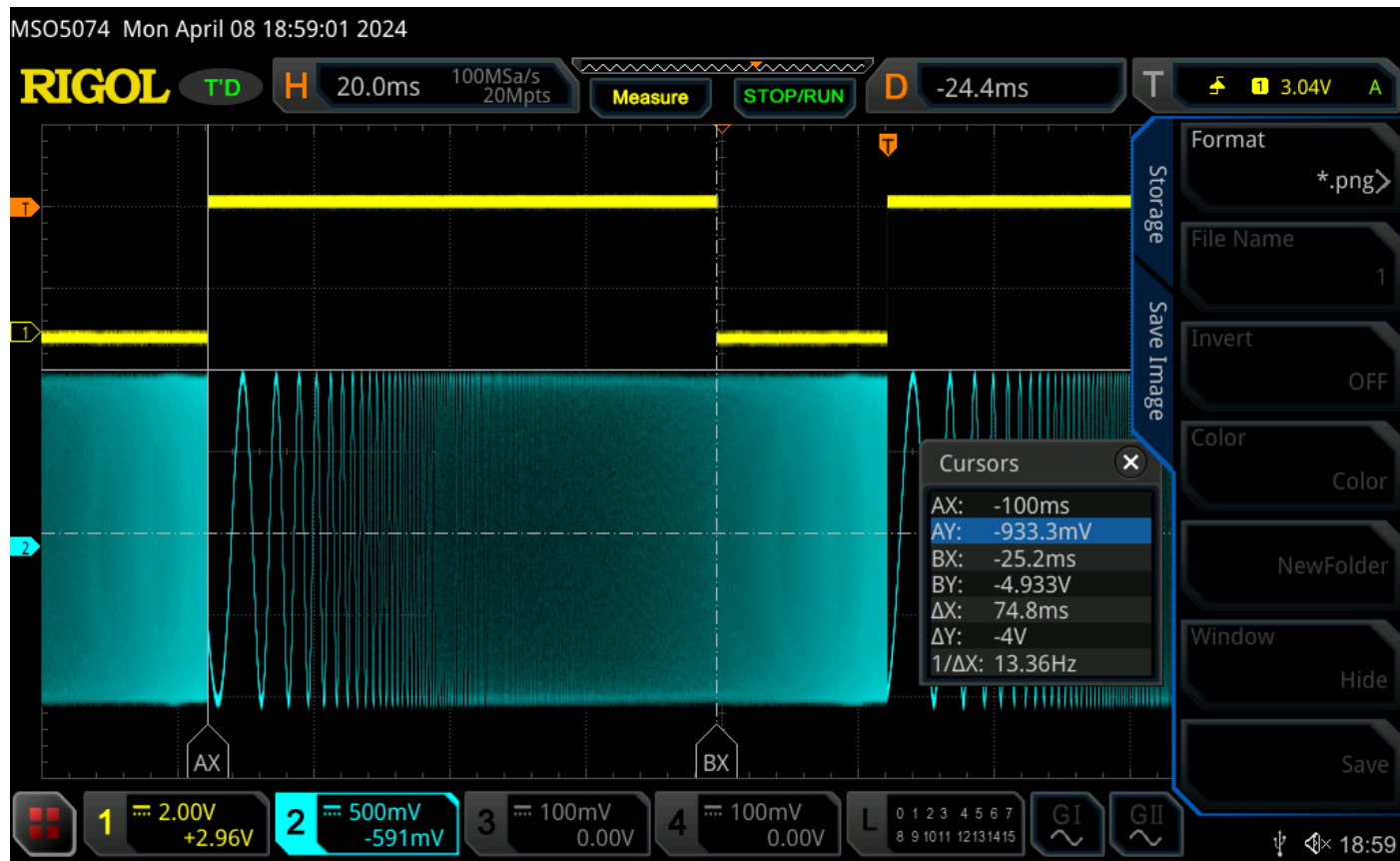
CH1(SYNC) and CH2(output) waveform with marker=1k Hz



CH1(SYNC) and CH2(output) waveform with marker=10k Hz

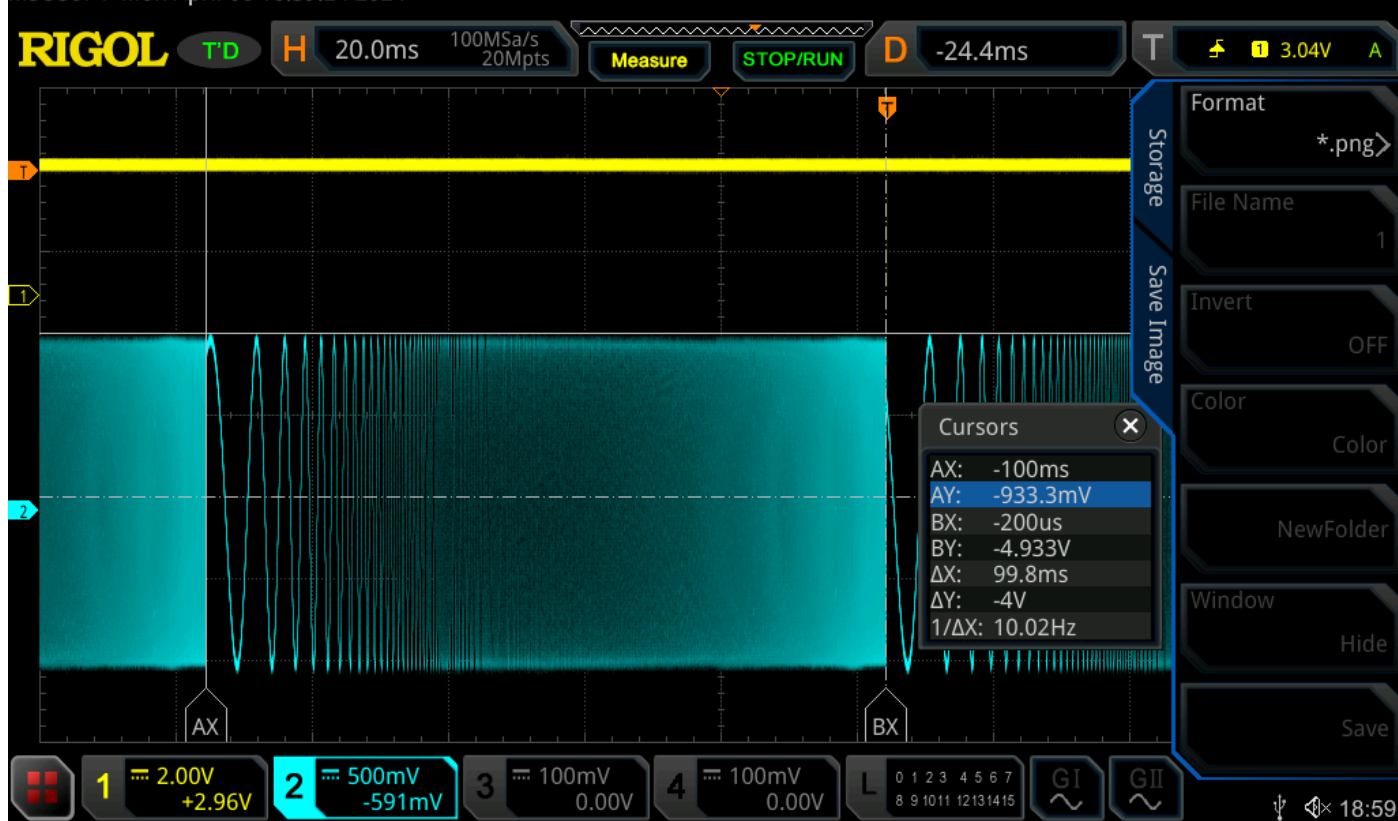


CH1(SYNC) and CH2(output) waveform with marker=100k Hz



CH1(SYNC) and CH2(output) waveform with marker=1M Hz

MSO5074 Mon April 08 18:59:24 2024



Question:

What do you find?

一開始 Marker 關閉時，Sync 的方波 duty cycle 是 50%，當 Marker 開啟時，Sync 方波的 duty cycle 會隨著設定的 Marker frequency 變大而比例變高，以下是對應的表格：

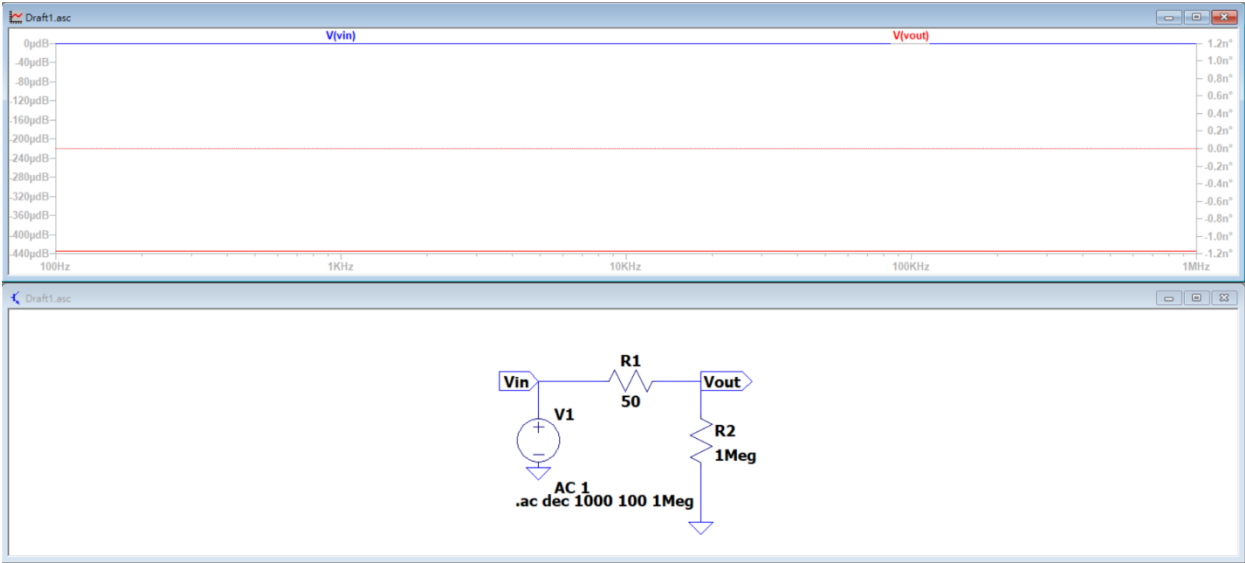
Marker frequency:	1k Hz	10k Hz	100k Hz	1Mk Hz	Marker off
Sync square wave duty cycle:	25.1497%	49.9002%	75.0499%	100%	50%

What is the main purpose of the marker frequency?

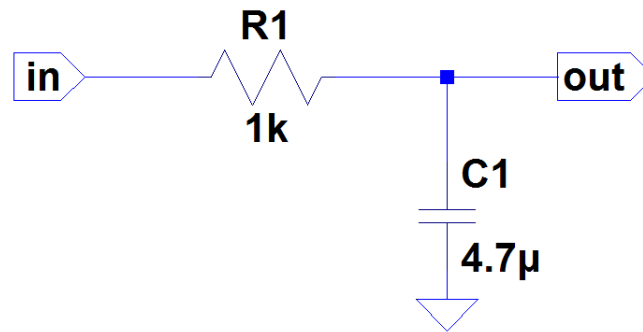
標記頻率的主要目的是在頻譜分析時，快速標記特定的頻率點，以幫助使用者或工程師快速識別觀察的信號或特定的頻率成分，方便進行頻率的相關測量、分析和電路的調整。

如實驗中我們設定的 1k Hz 標記頻率，其 Sync 方波在下降階段對應到的 AC Sweep 位置就是 1k Hz 的頻段，同理在 10k Hz、100k Hz、1M Hz Sync 方波下降階段對應到的 AC Sweep 位置也都是對應頻率的頻段，這也說明為甚麼當標記頻率設定為 1M Hz 時，Sync 方波 Duty cycle 會是 100%，因為我們對函數產生器的 AC Sweep 設定就是從 100Hz 跑到 1M Hz。

LTSpice Simulation:



Experiment 2: The Transient Response of RC Circuits



電路分析:

與第三個小時驗相同，因此將在那裏分析。

電路計算:

$$H(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad , f = 100 \text{ Hz} \rightarrow \omega = 2\pi f = 2\pi \times 100 = 200\pi \quad , R = 1000 \quad , C = 4.7\mu \text{ 代入}$$

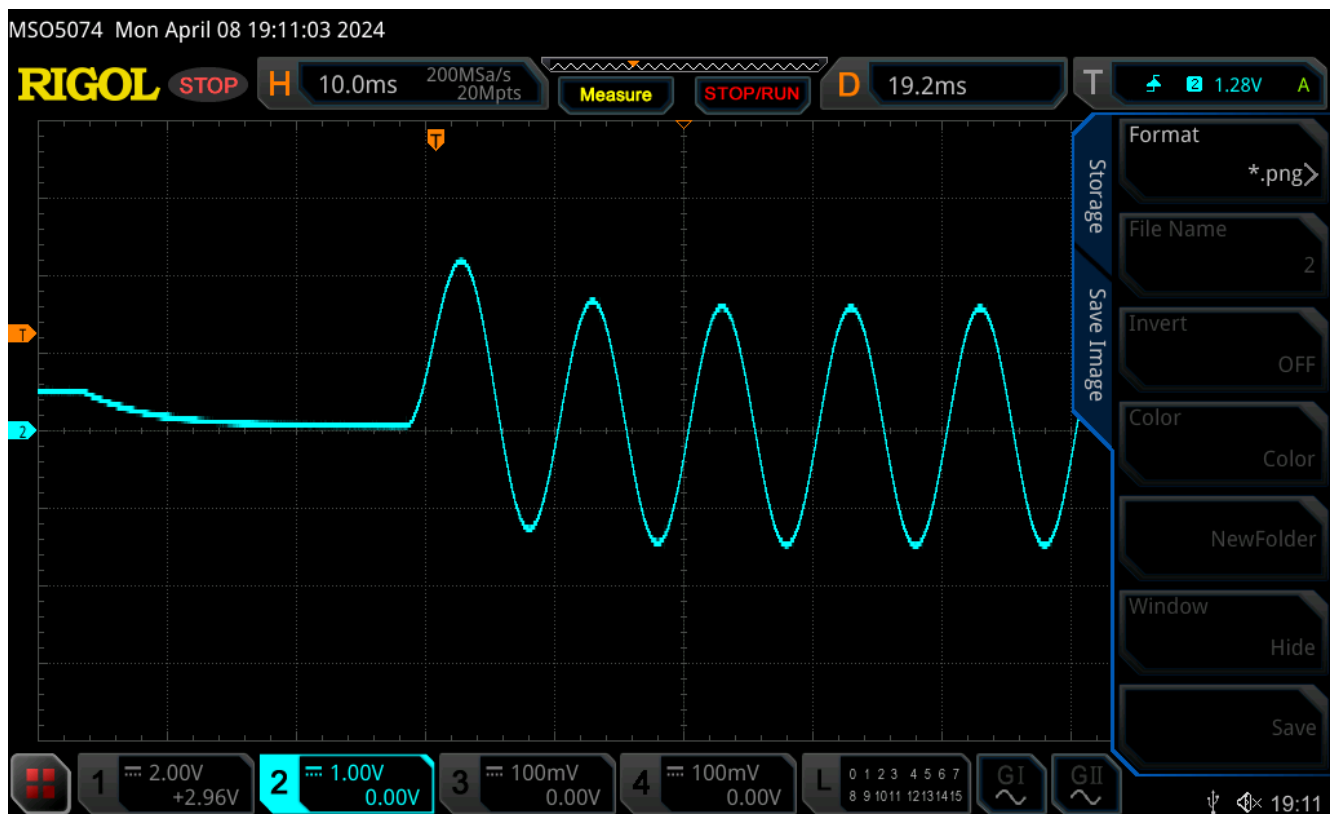
$$H(\omega) = \frac{1}{1 + j\frac{47}{50}\pi}$$

$$\rightarrow |H(\omega)| \cong 0.321 \quad , \theta \cong -71.29^\circ$$

$$\text{又} \because V_{in,PP} = 10V \quad \therefore V_{out,PP} = 10 \times 0.321V = 3.21V$$

也就是輸出峰對峰值理論上是 3.21V

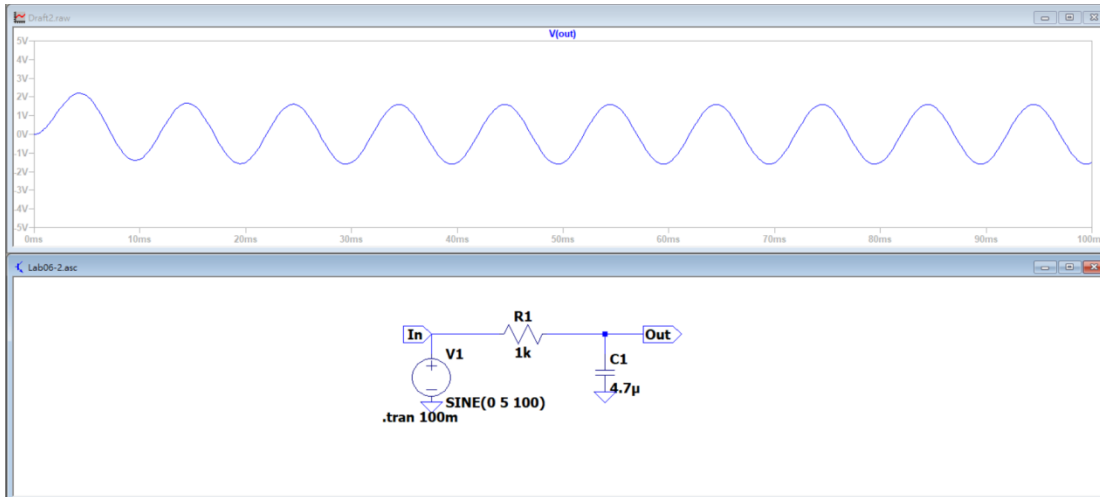
3. transient waveform



結果分析:

在電路運作初期，會有明顯不穩定的現象，此現象可由電路學公式： $v(t) = V_s + (V_i - V_s) \cdot \exp(-t/RC)$ (V_i = 電容初始跨壓; V_s = 某一時間後突然加上 RC 電路的 step 電壓) 解釋。由於 $(V_i - V_s) \cdot \exp(-t/RC)$ 會隨時間增加而遞減，因此在電路最初期時 ($t > 0$)， $v(t) = V_i$ ，導致 $V_{out,PP}$ 會稍稍高於後面電路進入穩態時的 $V_{out,PP}$ ，這點在使用 LTspice 做模擬時也有一樣的結果，稱之為 **transient response**。

LTspice simulation:

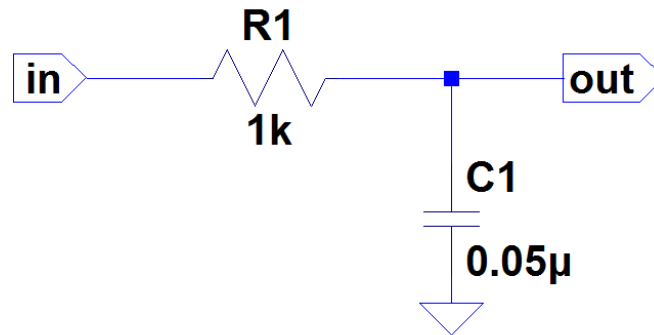


Question:

為甚麼要使用 single trigger?

實驗時若使用一般模式 trigger，隨著時間拉長，穩定的訊號持續觸發示波器，transient response 的效應就觀察不到。因此，使用 single trigger 觀察第一個觸發示波器的訊號的波形，才可以觀察到 transient response 最明顯的波形。

Experiment 3: First-Order Low-pass filter and High-pass filter

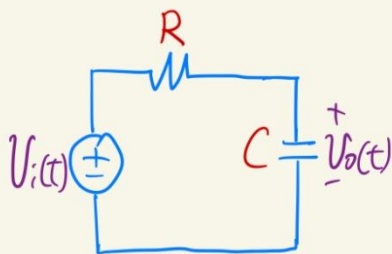


電路分析:

此電路為一個簡單的一階低通濾波器，是由一個與負載串聯的電阻以及與負載並聯的一個電容構成的 RC 電路，由於電容有電抗作用(直流時斷路，交流時短路)阻止低頻訊號通過，因此低頻訊號經過負載後較容易呈現在輸出端(OUT 端)，反之，在較高頻率的訊號輸入時，電容電抗作用減弱，起到短路作用，將大部分高頻信號導流至地，因此在輸出端(OUT 端)的高頻信號減弱。而高低頻率的區分頻率(截止頻率)則由所選擇的電阻和電容所確定，公式如下：

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

Low-Pass Filter 截止頻率計算推倒:



$$\Rightarrow H(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$\underline{\underline{j\omega = s}} \quad \underline{\underline{RC = \omega_c}} \quad \frac{1}{1 + s/\omega_c} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

$$\Rightarrow \text{Cutoff Frequency} = \omega_c = \frac{1}{RC}$$

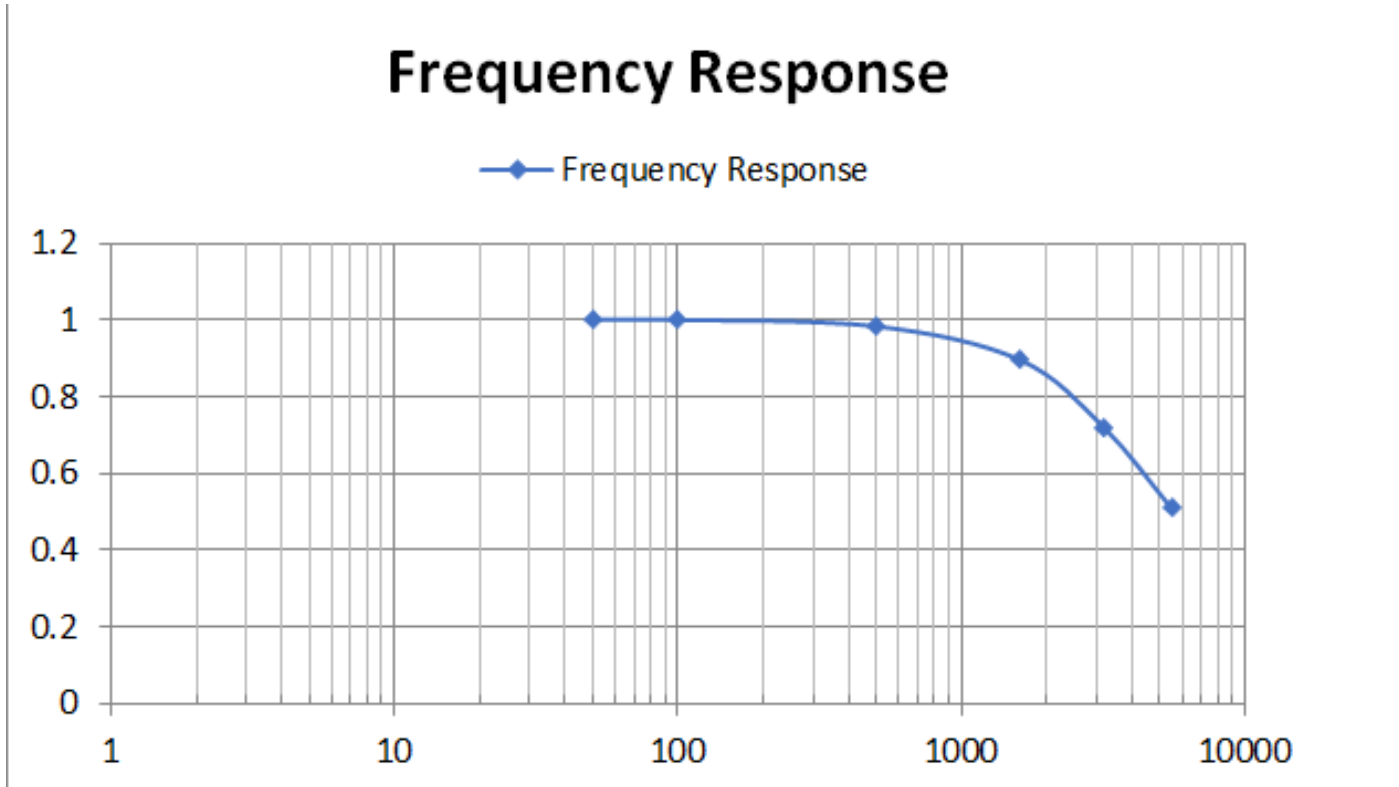
$$\Rightarrow |H(\omega)| = \begin{cases} 1 & \omega = 0 \\ 1/\sqrt{2} \approx 0.707 & \omega = \omega_c \\ 0 & \omega \rightarrow \infty \end{cases}$$

$$\Rightarrow \omega = \omega_c \rightarrow f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot 1k \cdot 0.05\mu} \approx 3183.09886183791 \text{ Hz}$$

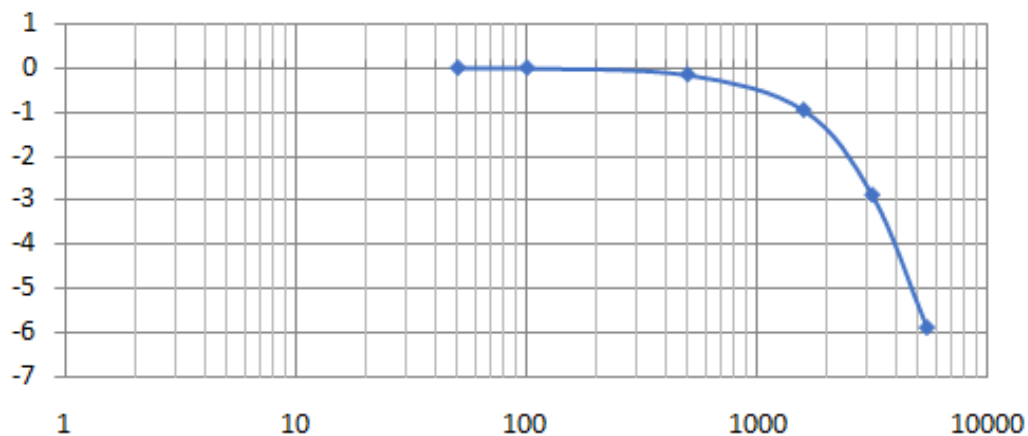
2.

	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f6	f8
Target Freq. (Hz)	50	100	500	1.60k	3.18k	5.5k	10.2k	31.7k
Vout,pp (V)	10.376	10.376	10.200	9.145	7.2105	5.1001	3.1656	1.3190
Vin,pp (V)	10.364	10.364	10.364	10.190	10.017	10.016	9.8420	9.8420
gain (V/V)	1.001	1.001	0.984	0.897	0.719	0.509	0.321	0.134
phase out->in (degree)	-1.3951	-2.1200	-9.2123	-27.460	-44.914	-59.405	-69.334	-76.153
20log (gain)	0.00868	0.00868	-0.14009	-0.94415	-2.86542	-5.86564	-9.86989	-17.4579

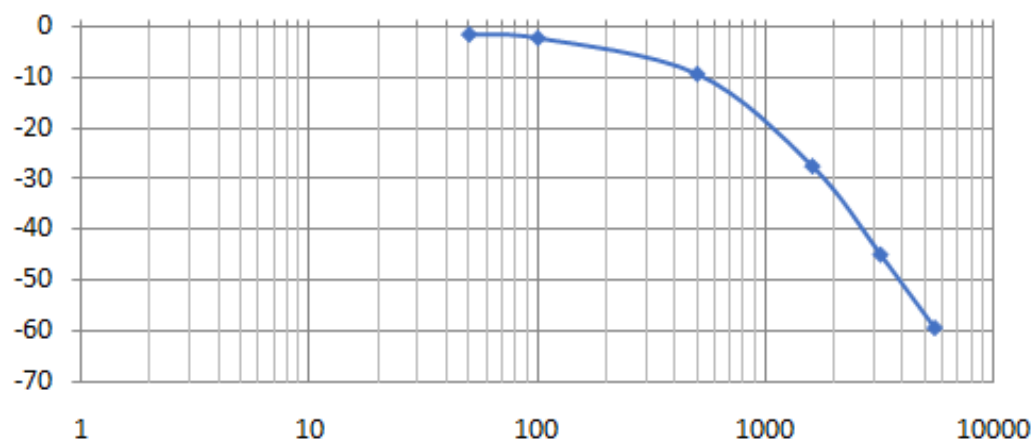
plot (x-axis=freq., y-axis=gain)



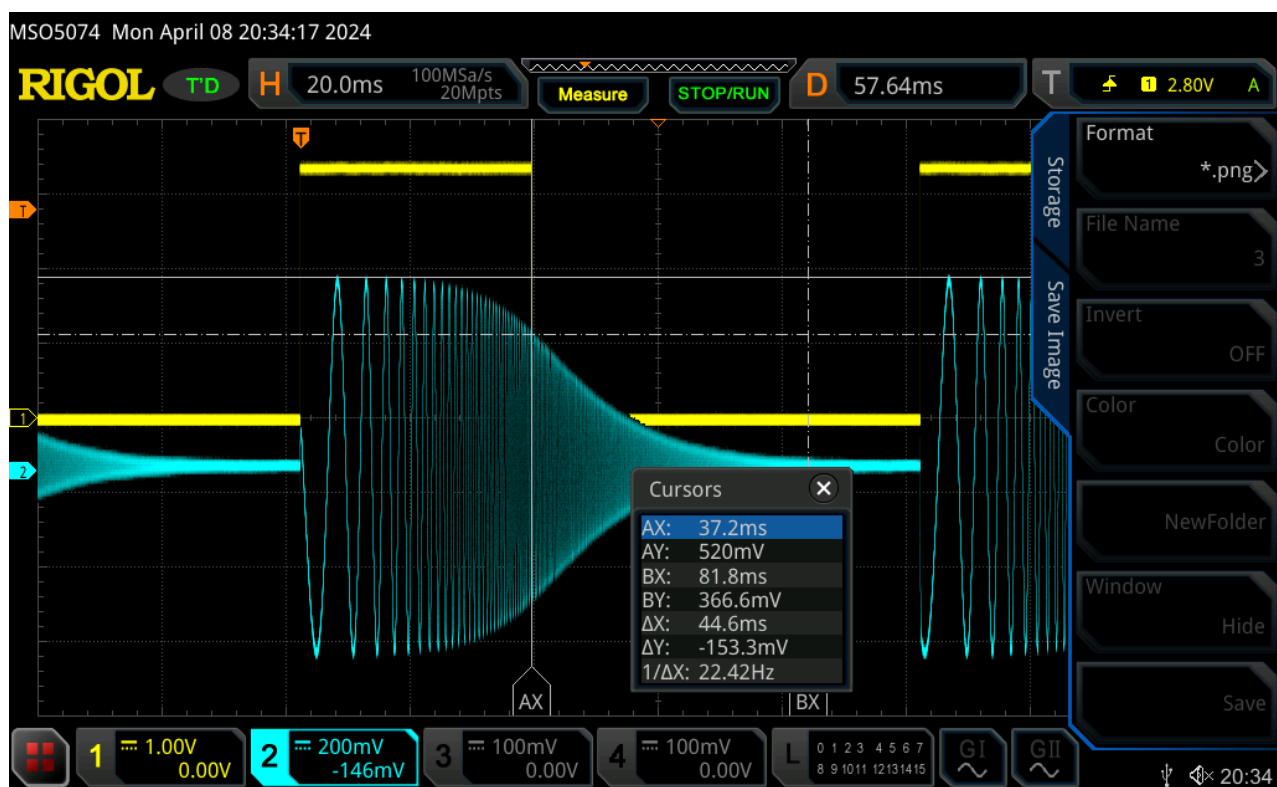
Bode magnitude plot (hand drawing, x-axis=freq., y-axis= $20\log(\text{gain})\text{dB}$)



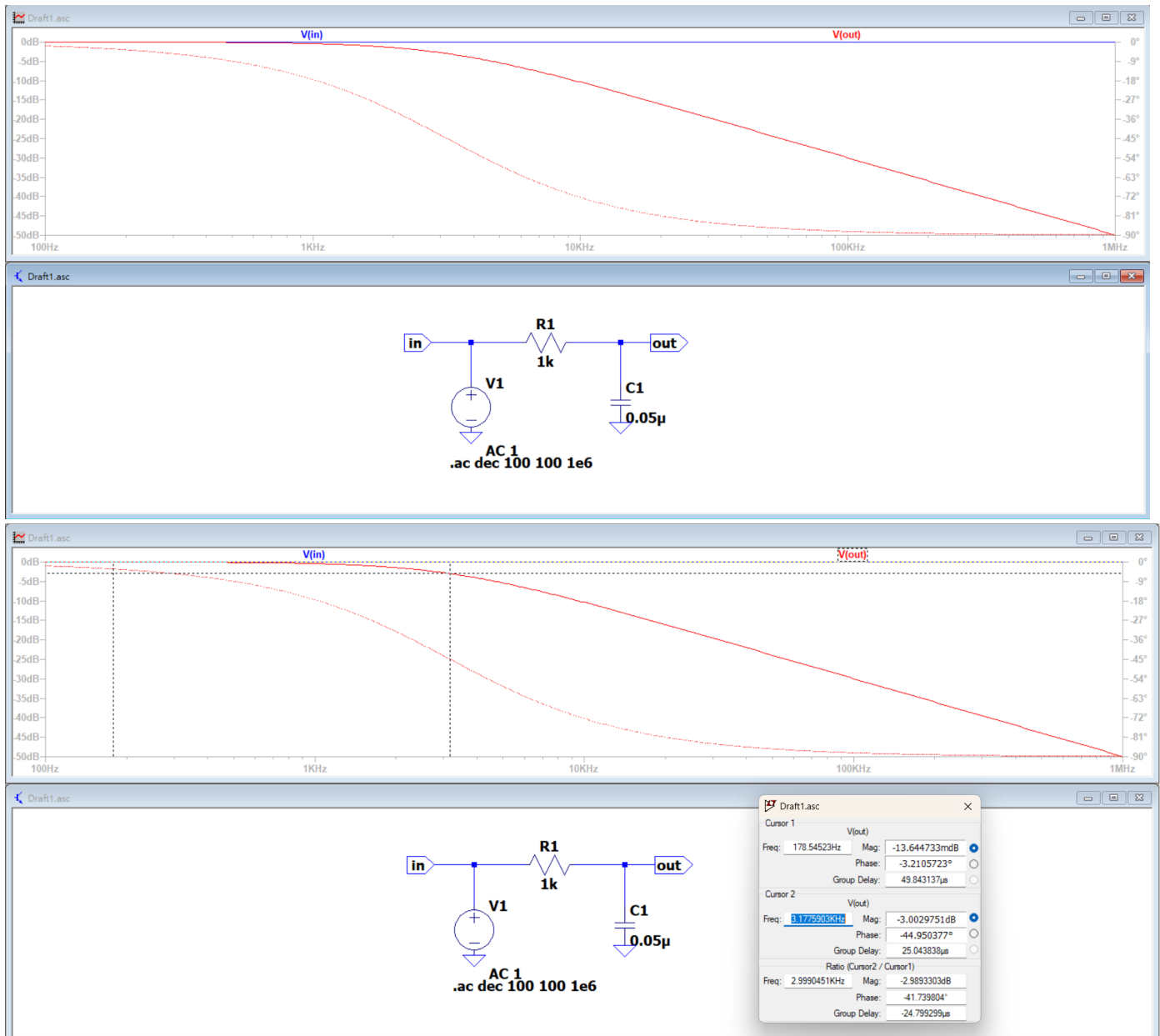
Bode phase plot (hand drawing, x-axis=freq., y-axis=phase difference (out to in) degree)



3. Output AC Sweep waveform

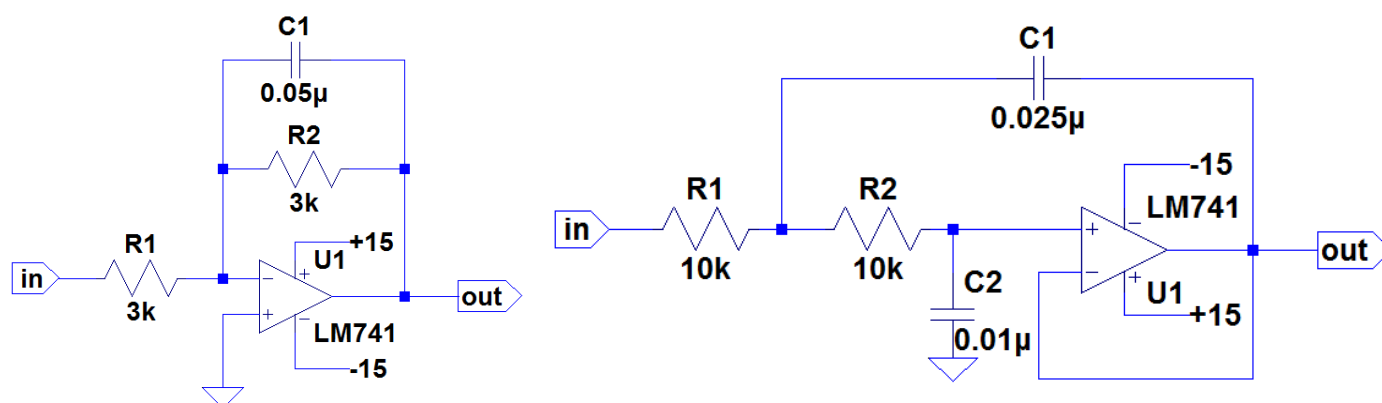


Approximate 3db frequency = 3050 Hz

LTSpice Simulation:

Cursor 量出截止頻率約為 3.1775kHz

Experiment 4: Active First-Order and Second-Order Low-pass filter



電路計算分析

First-Order Low-pass filter:

$$Z_1 = R_1$$

$$Z_f = R_2 \parallel C_1 = R_2 \parallel \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_1}$$

$$H(\omega) = -\frac{Z_f}{Z_i} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + j\omega R_2 C_1} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_c}} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_c}}$$

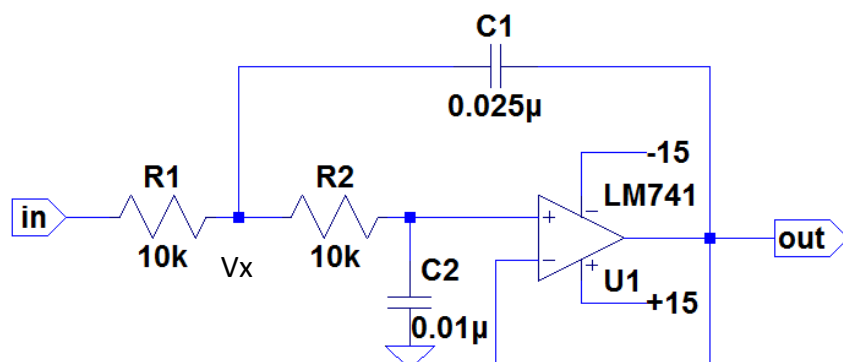
$$\Rightarrow \text{Simple Pole: } \omega_c = \frac{1}{R_2 C_1} \Rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \approx \boxed{1061 \text{ Hz}}$$

$$|H(\omega)| = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega R_2 C_1)^2}} \Rightarrow \phi = 180^\circ - \tan^{-1}(\omega R_2 C_1)$$

$$\text{When } f = f_c = 1061 \text{ Hz} \Rightarrow \phi = 180^\circ - \tan^{-1}(1) = 135^\circ \Rightarrow |H(\omega)| = \frac{3k}{3k} \frac{1}{\sqrt{2}} = \underline{\underline{0.707}}$$

$$20 \log(0.707) \\ \approx -3 \text{ dB}$$

Second-Order Low-pass filter:



By KCL(因為虛短路，所以 $V_+ = V_- = V_{out}$):

$$\frac{V_{in} - V_x}{R_1} + \frac{V_{out} - V_x}{R_2} + \frac{V_{out} - V_x}{1/sC_1} = 0$$

由分壓公式:

$$V_{out} = V_x \times \frac{1/sC_2}{R_2 + 1/sC_2}$$

兩者經整理可得:

$$H(\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1}\right)s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad \omega_c = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

因此-3dB 點的頻率為 $\frac{\omega_c}{2\pi} = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} / (2\pi) = 1.006584k \text{ Hz}$ 。

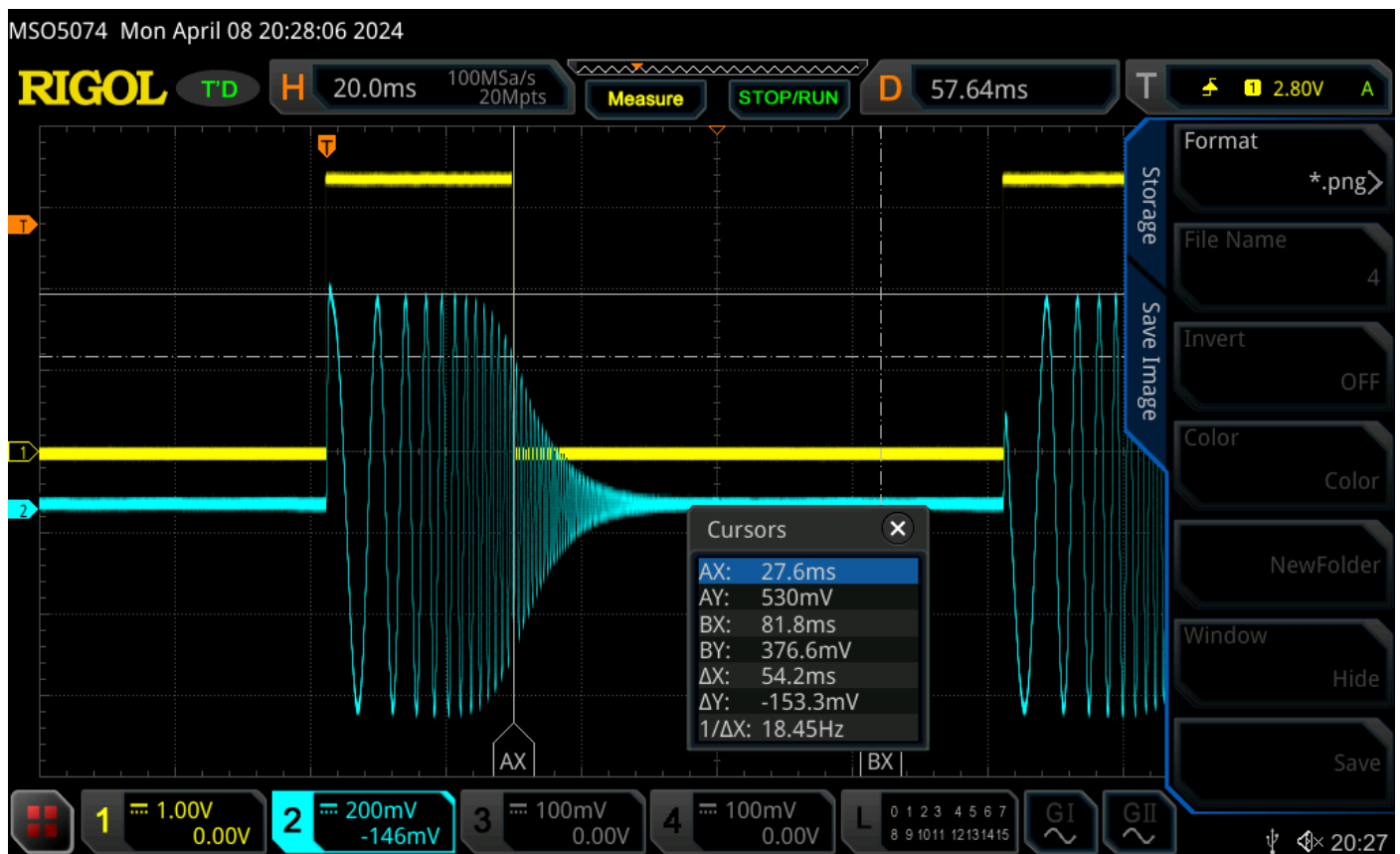
經過觀察 $H(\omega)$ 式子可以發現分母有 s^2 ，且兩個 pole 很接近，因此過了-3dB 點以後是以-40dB/decade 的速度衰減。

由計算可以發現，Second-Order low-pass filter 在高頻波濾波效率上比 First-Order low-pass filter 還要好。

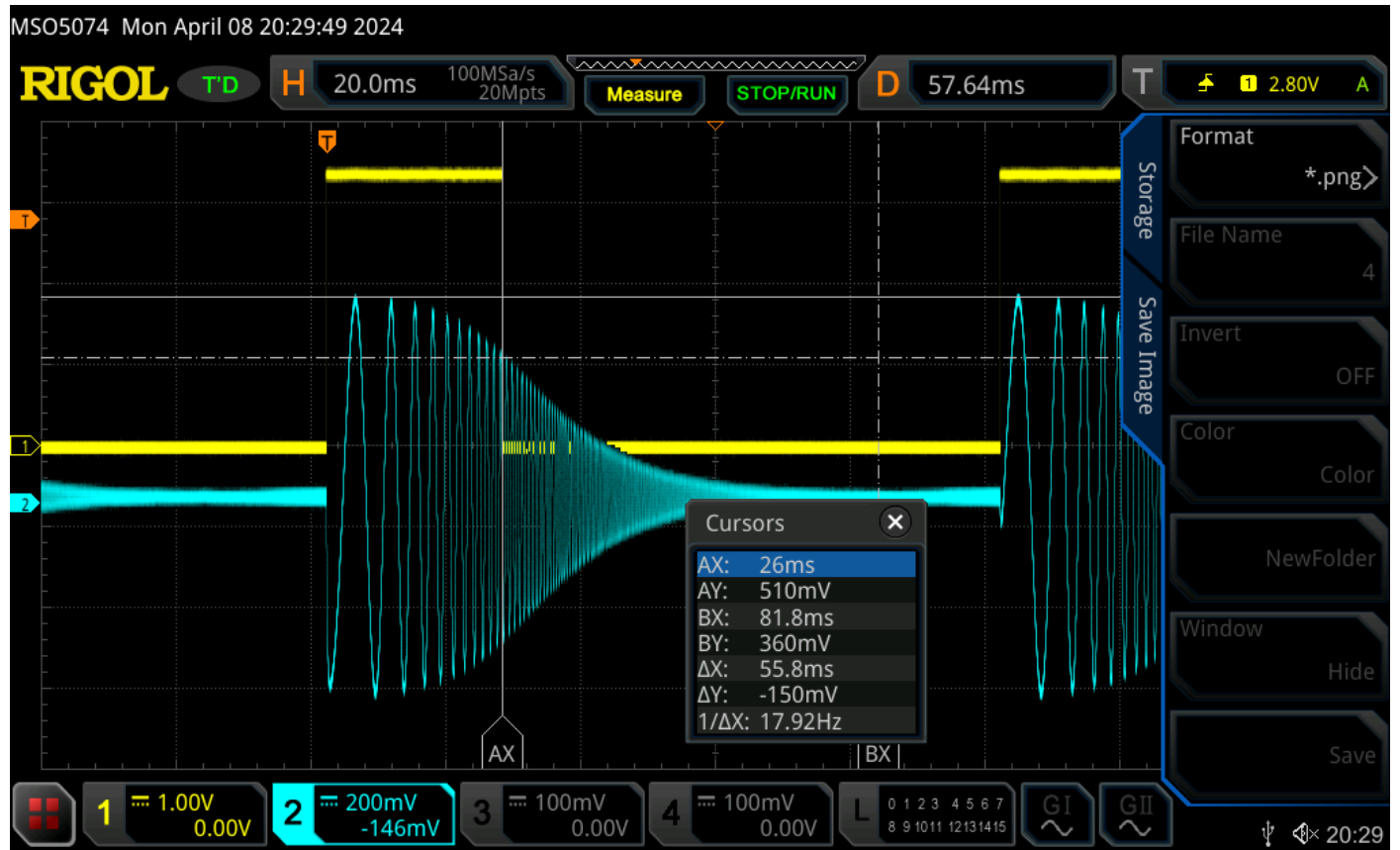
1.

	$f_{3dB}(\text{measured}) \text{ (Hz)}$
1 st order LPF	1240
2 nd order LPF	1100

Active 1-order LPF AC SWEEP waveform



Active 2-order LPF AC SWEEP waveform



2.

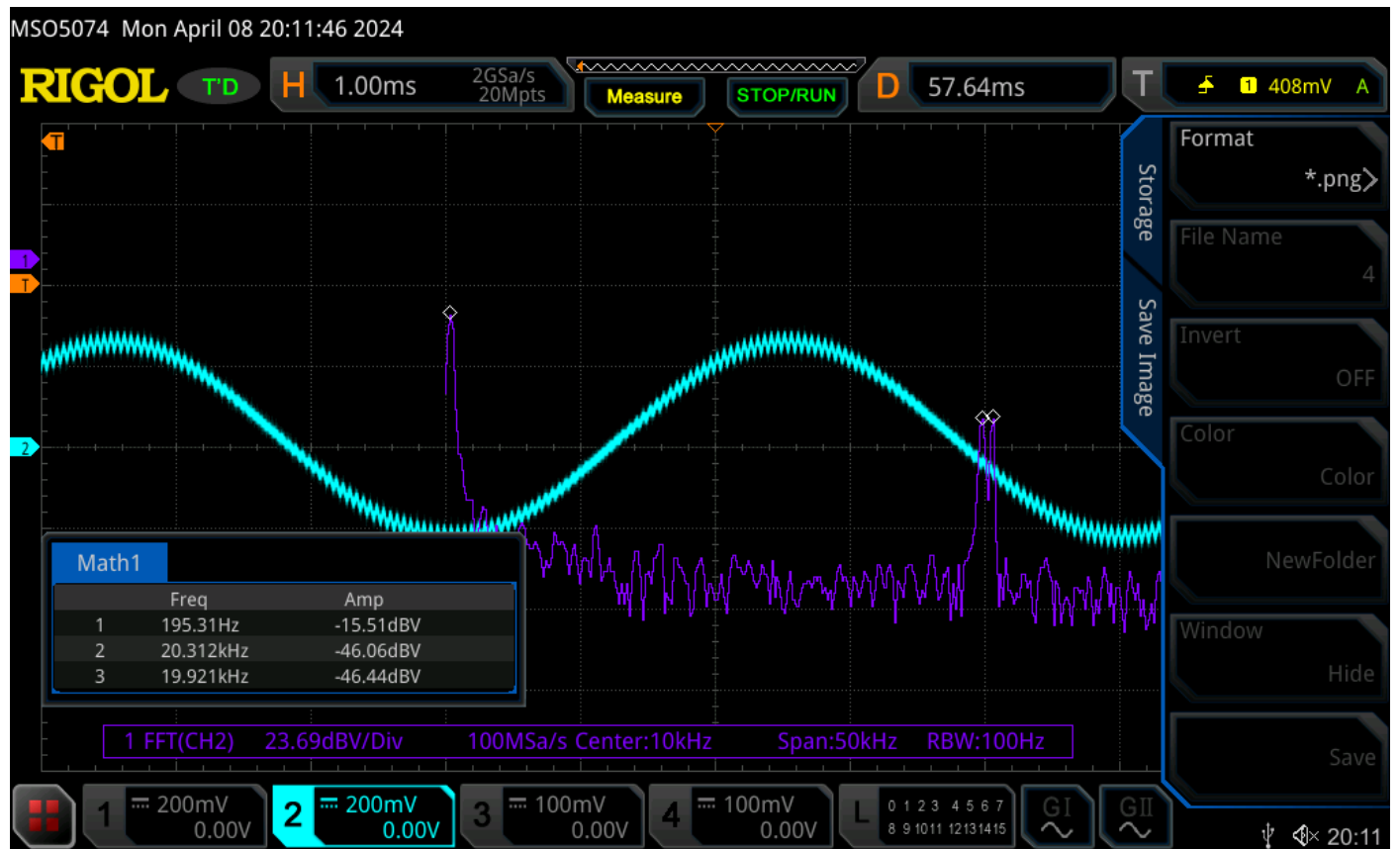
Active 1-order LPF input and output waveform (time domain)



Active 1-order LPF input FFT (frequency domain)



Active 1-order LPF output FFT (frequency domain)



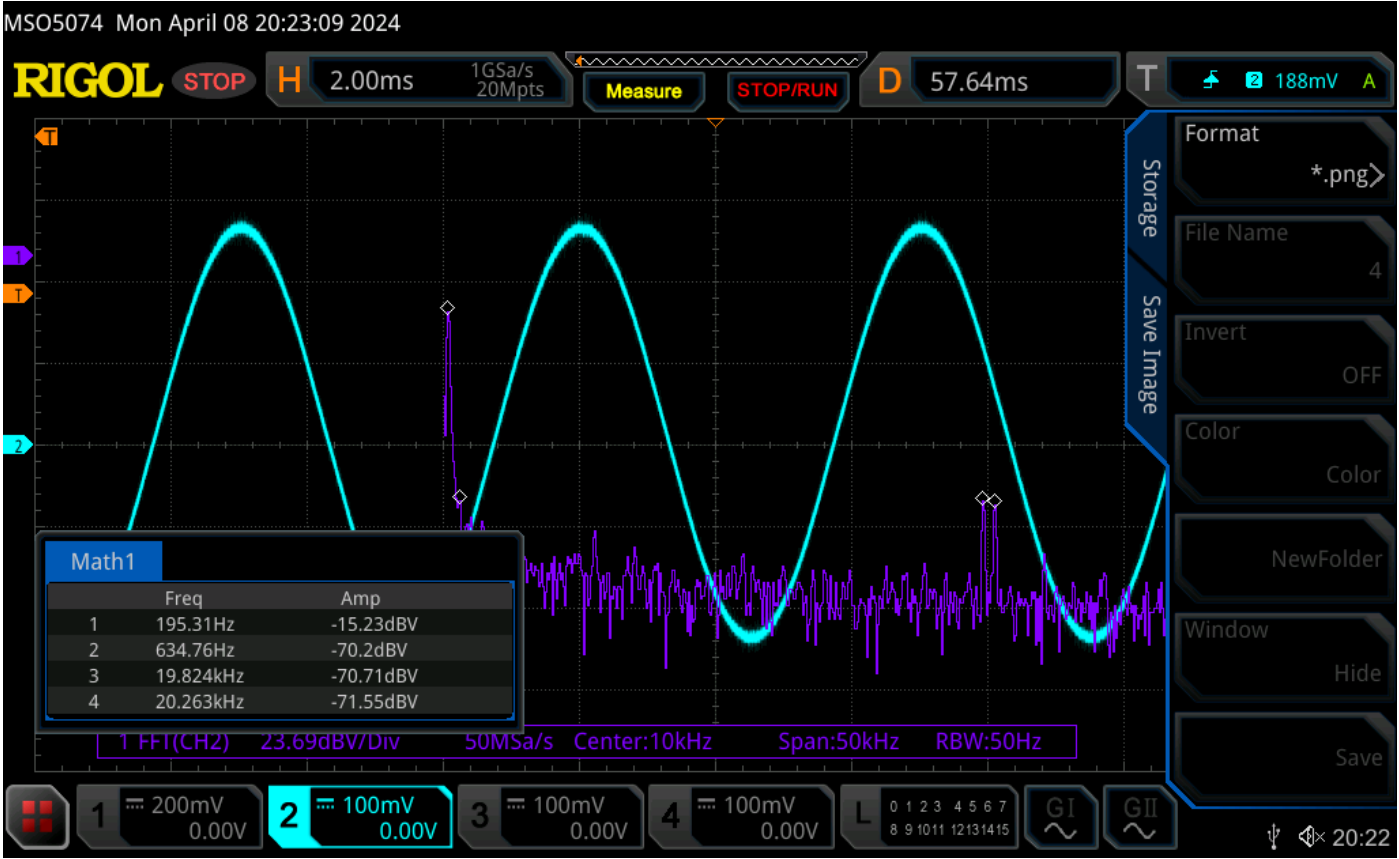
Active 2-order LPF output waveform (time domain)



Active 2-order LPF input FFT (frequency domain)

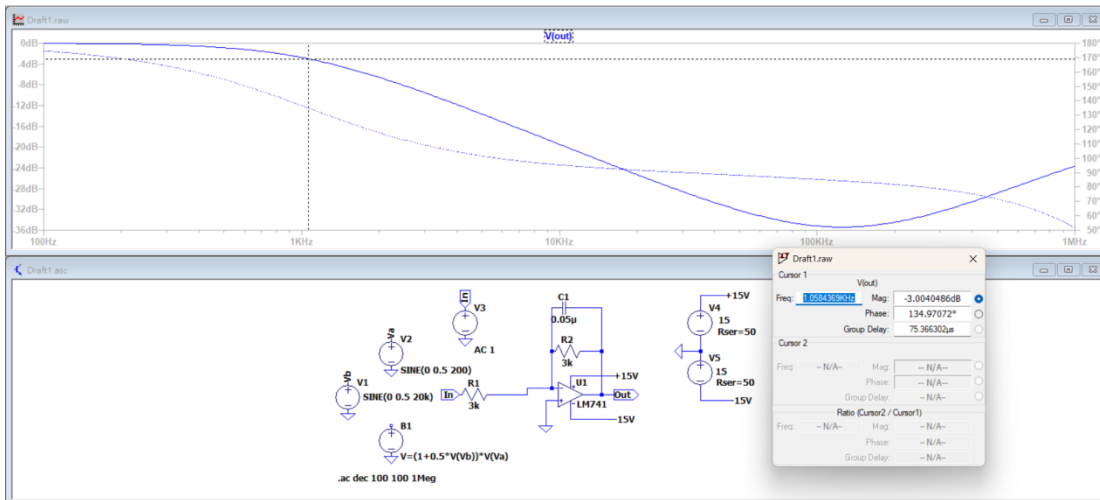


Active 2-order LPF output FFT (frequency domain)

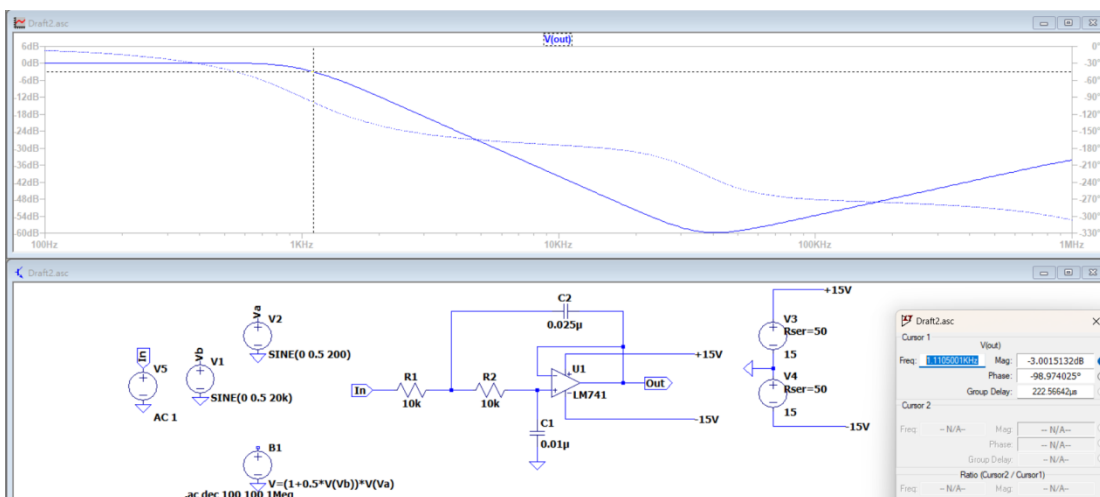


LTSpice Simulation:

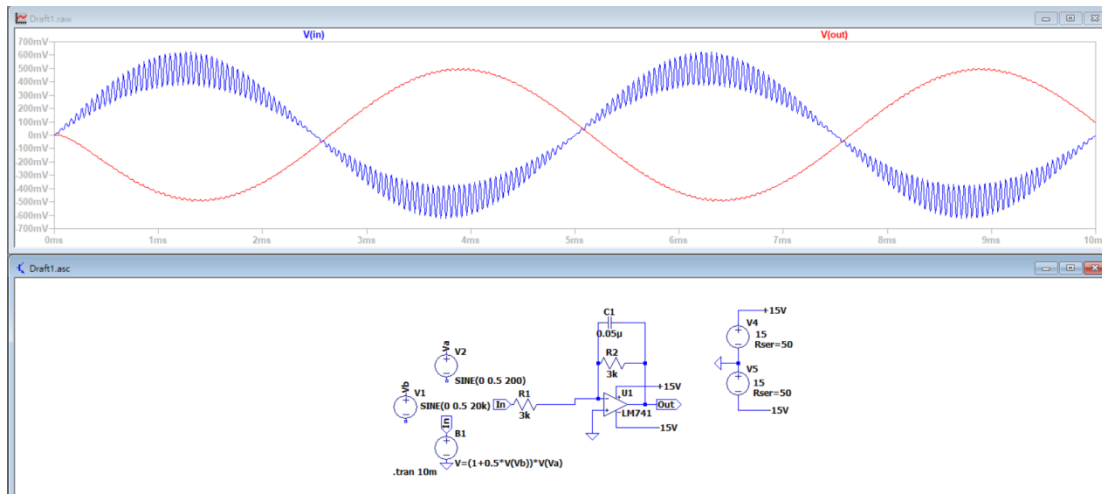
Active 1-order LPF AC SWEEP bode plot



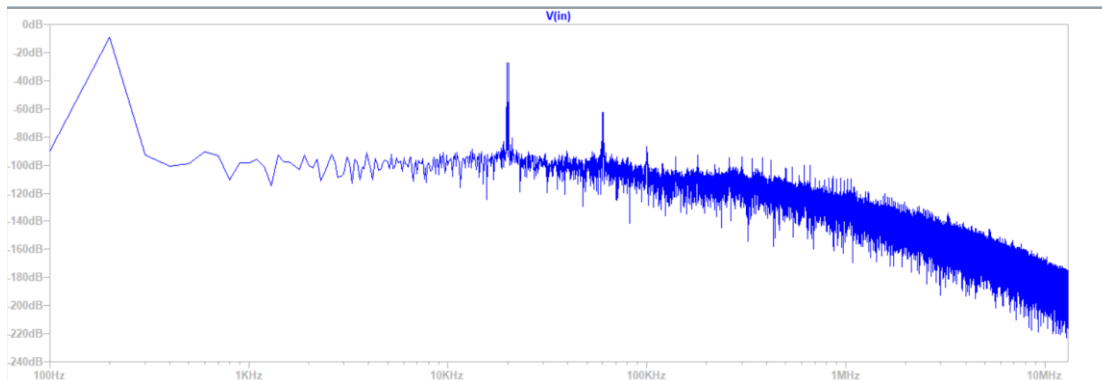
Active 2-order LPF AC SWEEP waveform



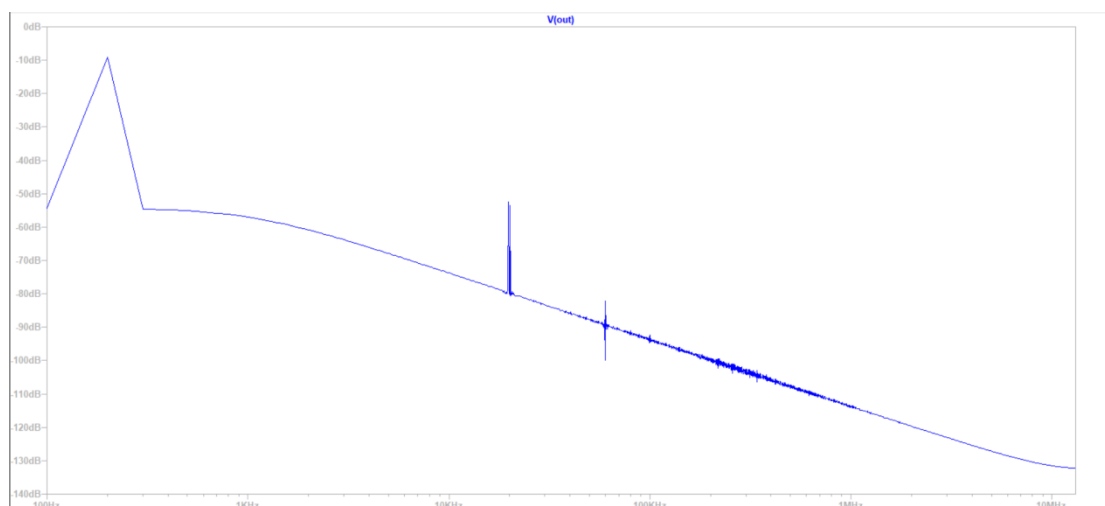
Active 1-order LPF input and output waveform (time domain)



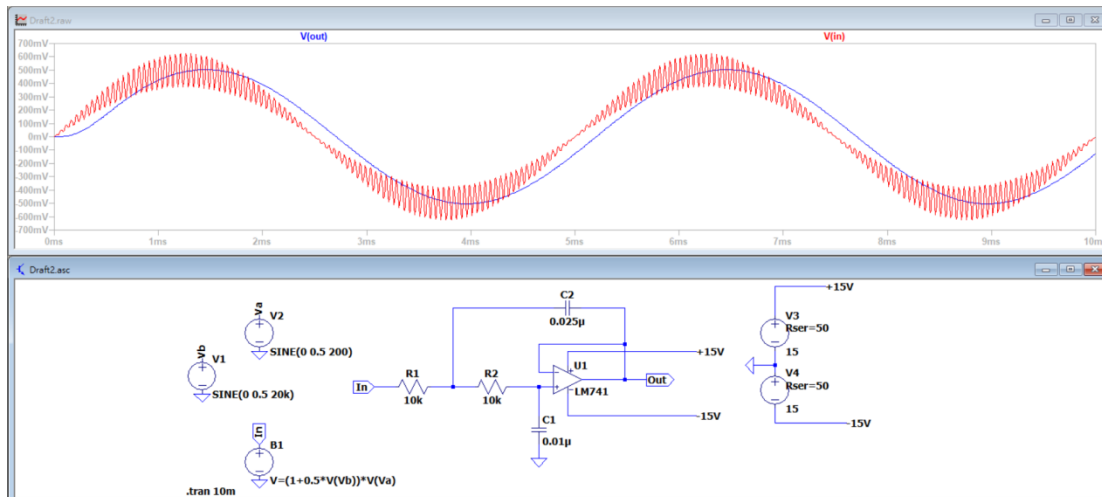
Active 1-order LPF input FFT (frequency domain)



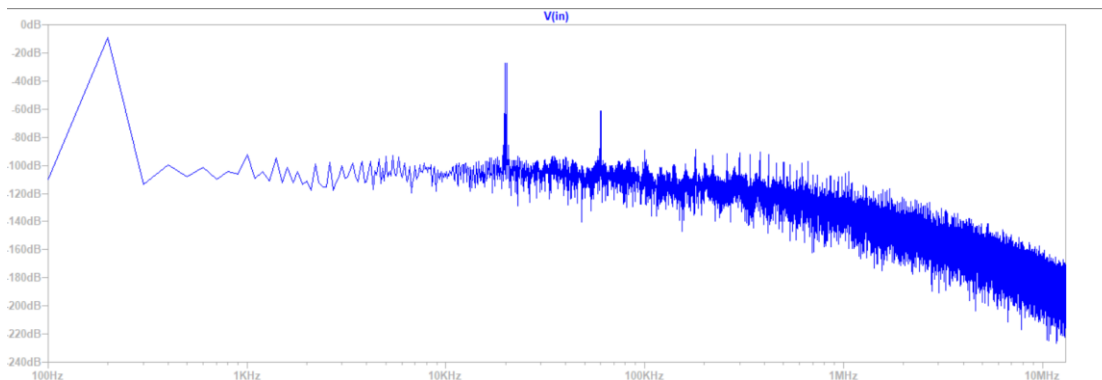
Active 1-order LPF output FFT (frequency domain)



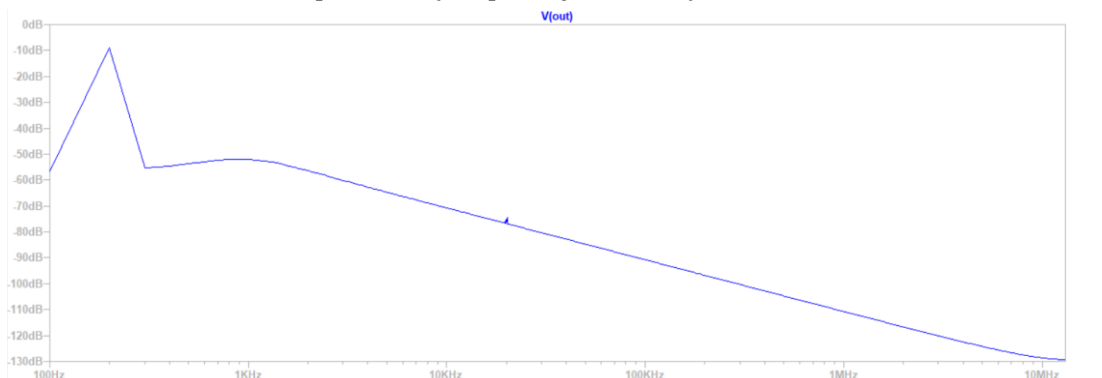
Active 2-order LPF output waveform (time domain)



Active 2-order LPF input FFT (frequency domain)



Active 2-order LPF output FFT (frequency domain)



AM modulation 數學分析：

$$V_{AM}(t)$$

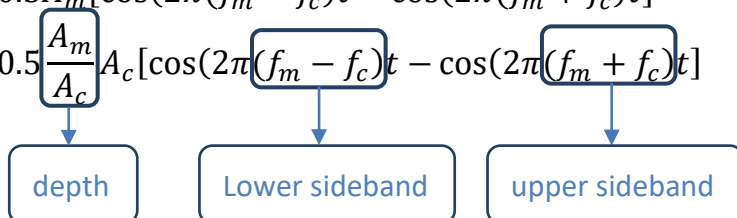
$$= A_{AM} \sin(2\pi f_{AM} t)$$

$$= (A_c + A_m \sin(2\pi f_m t)) \sin(2\pi f_c t)$$

$$= A_c \sin(2\pi f_c t) + A_m \sin(2\pi f_m t) \times \sin(2\pi f_c t)$$

$$= A_c \sin(2\pi f_c t) + 0.5 A_m [\cos(2\pi(f_m - f_c)t) - \cos(2\pi(f_m + f_c)t)]$$

$$= A_c \sin(2\pi f_c t) + 0.5 \frac{A_m}{A_c} A_c [\cos(2\pi(f_m - f_c)t) - \cos(2\pi(f_m + f_c)t)]$$



本實驗中：

$$f_c = 200\text{Hz}, f_m = 20\text{kHz}, \text{depth} = 100\%$$

$$A_c = 0.5V \rightarrow A_m = 0.5V$$

由公式計算出：

Carrier 所在頻率為 200Hz，Lower sideband 所在頻率為 $20k - 200 = 19.8k\text{Hz}$ ，Upper sideband 所在頻率為 $20k + 200 = 20.2k\text{Hz}$ 。

	Carrier	Lower sideband	Upper sideband
	200 Hz	19.8k Hz	20.2k Hz
Before filter	-15.14 dB	-21.43 dB	-21.43 dB
After 1 st order filter	-15.23 dB	-46.06 dB	-46.06 dB
After 2 nd order filter	-15.51 dB	-70.71 dB	-70.71 dB

Question:

使用 FFT 觀察的好處？

FFT 圖中可以看到除了 time domain 主要觀察到的訊號以外，也可以看到 noise 或是 distortion 的訊號。由於是由不同頻率作為區分，所以這些包括雜訊以及失真的小訊號不會被振幅大的主訊號所掩蓋。

實驗心得:

這次實驗的前三個實驗跟實驗三的前兩個實驗有些相似之處，也不是我第一次接觸 AC Sweep 等相關知識，因此做起實驗與寫起結報更加的熟悉且更了解電路在做些什麼，且在第四小實驗中透過兩個不同的低通濾波器，也讓我發現就算都是濾波器但過濾的效率可是大大不同，整體來說這次實驗相比前幾次實驗，有比較輕鬆且容易，可以明顯感受到助教希望我們有更多時間去讀期中考。

除此之外，這次實驗在電路分析階段需要使用非常多電路學以及電子學的知識，也算是幫助我好複習的訊號模型以及波德圖的計算。

實驗結論:

實驗一的重點在於幫助我們了解 AC Sweep 與 Marker 的產生與使用，透過改變不同的 Marker frequency 來抓取 AC Sweep 的不同頻率位置。

實驗二的重點在於藉由 single trigger，來觀察 RC 電路的 transient response。

實驗三的重點在於藉由簡單的低通濾波器，來讓我們了解過濾高頻信號的原理以及實際的-3db 點該如何計算與尋找。

實驗四的重點在於觀察一階與二階低通濾波器，在處理高頻信號的效率差異以及過濾後的 FFT 差異。

Reference:

Charles Alexander. & Matthew Sadiku. (2016). Fundamentals of Electric Circuits, 6th Edition. McGraw-Hill Education

Adel S. Sedra , Kenneth C. (KC) Smith , Tony Chan Carusone , and Vincent Gaudet (2020). Microelectronic Circuits, 8th edition. Oxford University

Engineering Radio. (2012/01/14) Low Pass Filter design. retrieve from: [Low Pass Filter design – Engineering Radio](#) (2024/04/14)

維基百科。 (2023/07/30) 低通濾波器。 檢自: [低通濾波器 - 維基百科，自由的百科全書 \(wikipedia.org\)](#) (2024/04/14)

維基百科。 (2024/02/17) 快速傅立葉變換。檢自: <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%BF%AB%E9%80%9F%E5%82%85%E9%87%8C%E5%8F%B6%E5%8F%98%E6%8D%A2> (2024/04/14)

Cadence. (unknown) Defining an AC/DC Sweep Simulation Profile. retrieve from: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2019-defining-an-ac-dc-sweep-simulation-profile> (2024/04/14)