

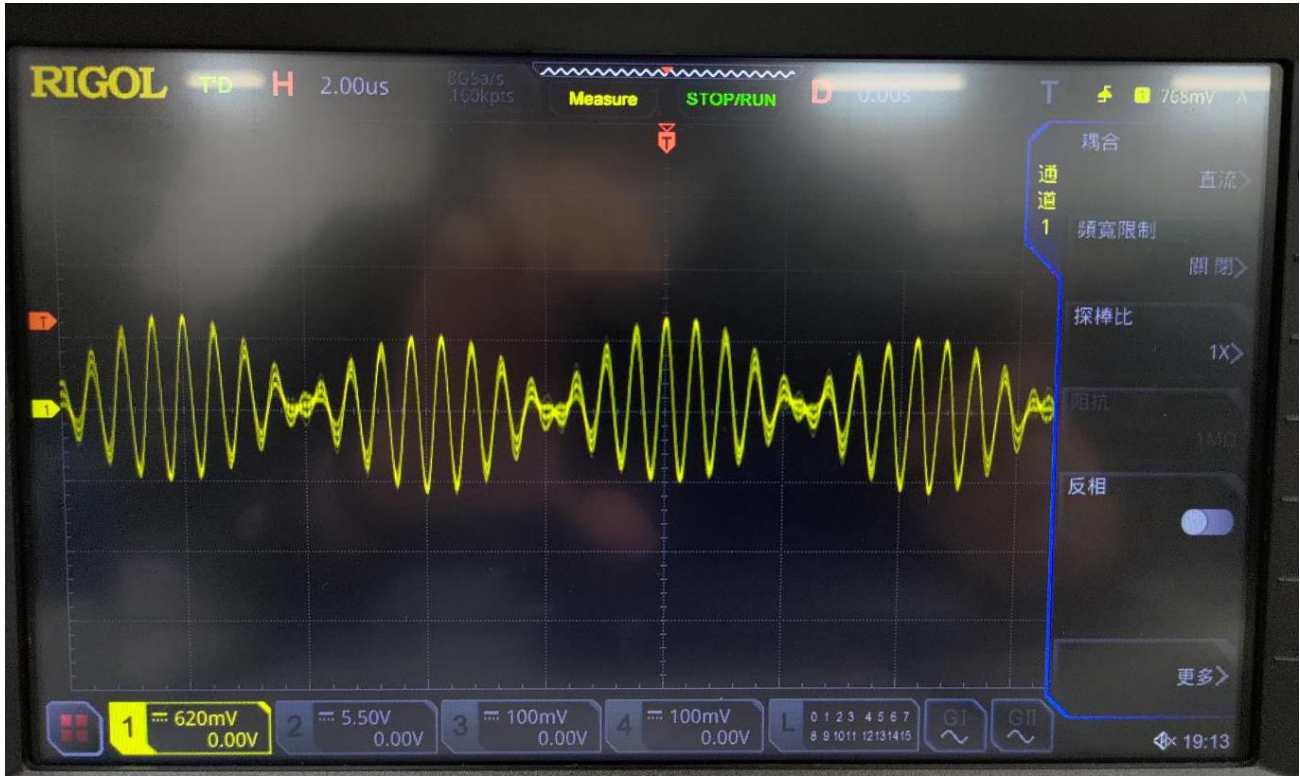
REPORT

Experiment 1: Double Side Band – Suppressed Carrier Modulation and Demodulation

組員:0811562 何祁恩 109700035 林謹茹

1.

output waveform in DC coupling



Channel 1 的訊號為透過 MPY634 的 Balanced Modulator 所形成的 DSB-SC
為兩個 sinusoidal 的訊號相乘:

$$V_{DSB-SC}(t) = [V_c \cos(2\pi f_c t)] \cdot [V_m \cos(2\pi f_m t)] \quad (1)$$

將(1)積化和差之後可以得到:

$$V_{DSB-SC}(t) = \frac{V_c \cdot V_m}{2} [\cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \cos[2\pi(f_c - f_m)t]] \quad (2)$$

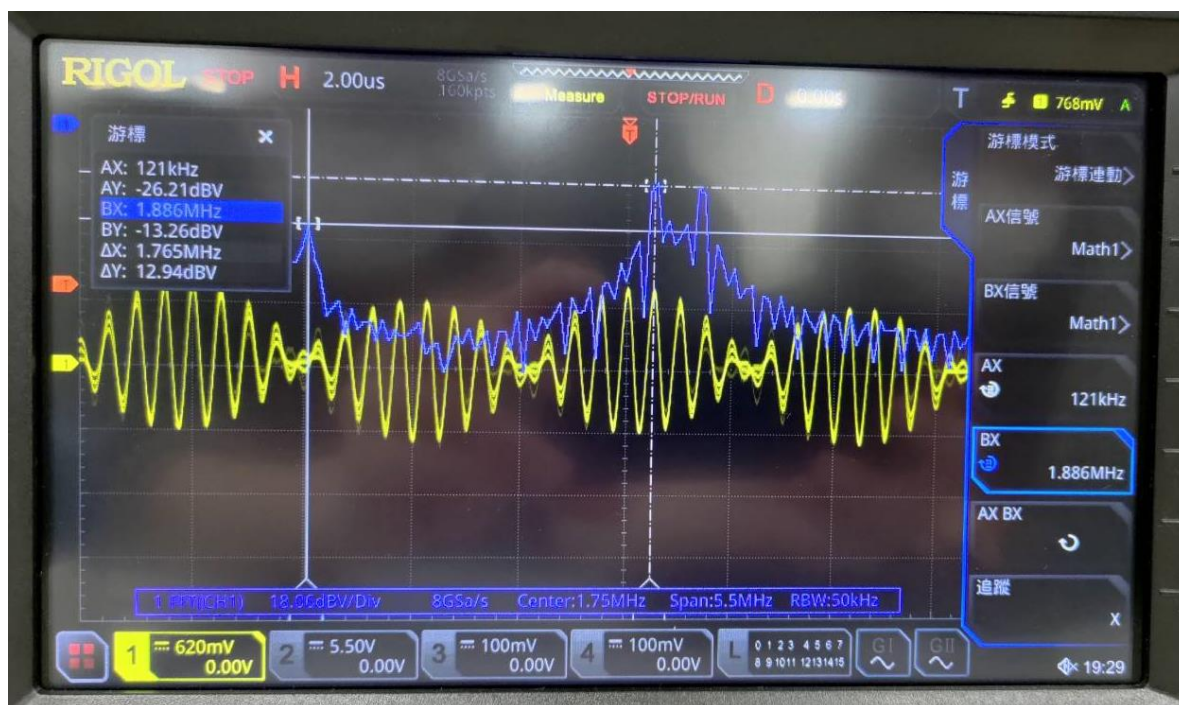
將(2)帶入實驗參數後:

$$\begin{aligned} V_{DSB-SC}(t) &= \frac{5\sqrt{2}}{2} \left\{ \cos\left(2\pi(2 \cdot 10^6 - 120 \cdot 10^3)t\right) + \cos\left(2\pi(2 \cdot 10^6 + 120 \cdot 10^3)t\right) \right\} \\ &= \frac{5\sqrt{2}}{2} \left\{ \cos(2\pi(188000)t) + \cos(2\pi(212000)t) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

可以得知其實是有兩個頻率分別為 1.88MHz 及 2.12MHz 的正弦波所合成的，而且他們的權重相等(因為震幅皆為 $\frac{5\sqrt{2}}{2}$)，因此可以預期在做 FFT 轉到頻率 domain 的時候會在 1.88MHz 及 2.12MHz 這兩處看到 side band，且大小應該會是相等的。

2.

output FFT waveform with data (measured by cursor)



	Modulation(Signal)		Lower sideband		Upper sideband		
	120k	Hz	1.88M	Hz	2.12M	Hz	
Magnitude (dB)	-26.21	dB	-13.26				dB

如同剛才的預期，確實可以在1.88MHz及2.12MHz看到兩個 band，如同前面的公式推導，但是值得注意的是，仍然可以看到 Modulation frequency 那邊有一條 band，經過助教的討論後得到的原因如下：因為 MPY634 是類比 IC，是在很久以前生產的，在針對乘法運算還是會有瑕疵。因此近年已經沒有人在使用類比 IC 在計算乘法了。反倒是轉而使用數位 IC 來製作乘法的功能。

此外，這個 IC 還有一個很大的缺點，我找遍了 MPY634 的 data sheet 並沒有找到關於任何一句關於 SF 的 default 值為多少。根據 data sheet 給的 Multiplier transfer function 如下：

$$V_{out} = A \left[\frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{SF} - (Z_1 - Z_2) \right] \quad (4)$$

根據這題的接法可以再更進一步化簡為：

$$V_{out} = \frac{(X_1)(Y_1)}{SF} \quad (5)$$

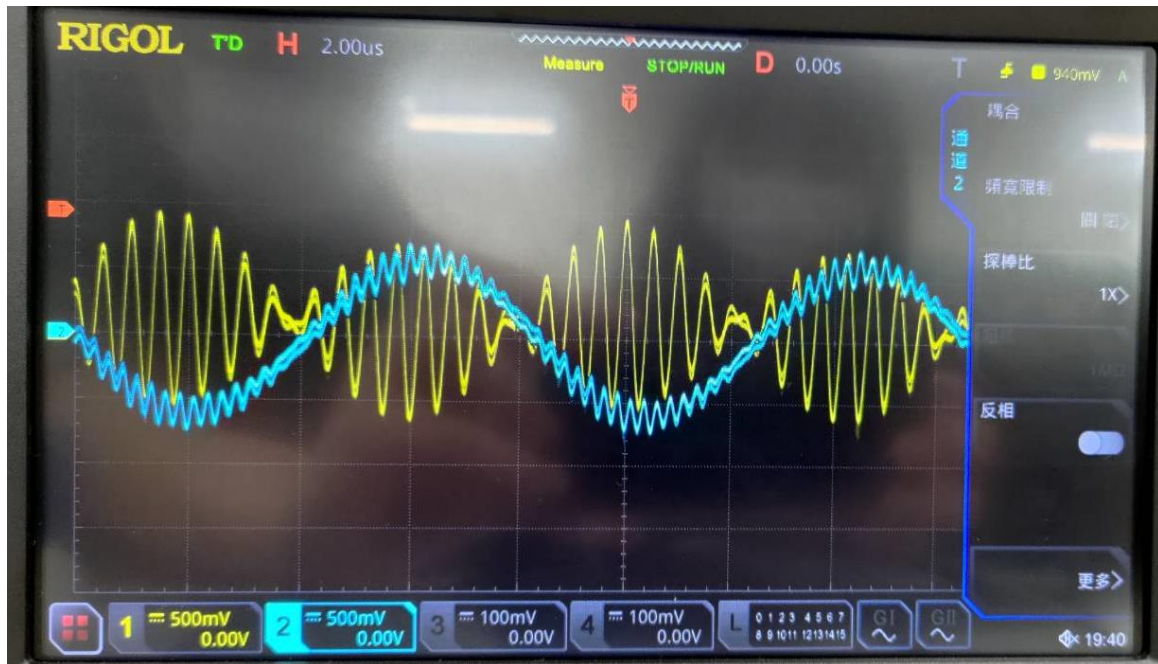
接著，計算其分貝(單位為 dB)：

$$20\log(V_{out}) = 20\log(X_1) + 20\log(Y_1) - 20\log(SF) \quad (6)$$

透過(6)可以得知，在我們未知浮接 SF 這個 pin 時，SF 的值為多少時，要求精準量測 FFT 之後的數值其實是蠻奇怪的一件事情。我認為僅需要知道有兩條數值相對大的 side band 即可，不需要過度要求我們將一個我們也不知道實際上理論值為多少的數值量測到非常精準。(因為未知 SF 值為多少)

3.

Vout1 and Vout2 waveform in DC coupling



解調變 DSB-SC:

透過將(2)式乘上載波:

$$V_{DSB-SC_{\text{demodulate}}}(t) = \left\{ \frac{V_c \cdot V_m}{2} [\cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \cos[2\pi(f_c - f_m)t]] \right\} \cdot [V_c \cos(2\pi f_c t)] \quad (7)$$

將(7)透過積化和差後可得:

$$\begin{aligned} V_{DSB-SC_{\text{demodulate}}}(t) &= \left\{ \frac{V_c \cdot V_m}{2} [\cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \cos[2\pi(f_c - f_m)t]] \right\} \cdot [V_c \cos(2\pi f_c t)] \\ &= \frac{V_c^2 \cdot V_m}{2} [\cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \cos[2\pi(f_c - f_m)t]] \cdot [V_c \cos(2\pi f_c t)] \\ &= \frac{V_c^2 \cdot V_m}{2} \left\{ \cos[2\pi(f_c + f_m)t] \cdot [\cos(2\pi f_c t)] + \cos[2\pi(f_c - f_m)t] \cdot [\cos(2\pi f_c t)] \right\} \\ &= \frac{V_c^2 \cdot V_m}{2} \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left\{ \cos[2\pi(2f_c + f_m)t] + \cos[2\pi(f_m)t] \right\} + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \cos[2\pi(2f_c - f_m)t] + \cos[2\pi(f_m)t] \right\} \right\} \end{aligned}$$

化簡合併可得:

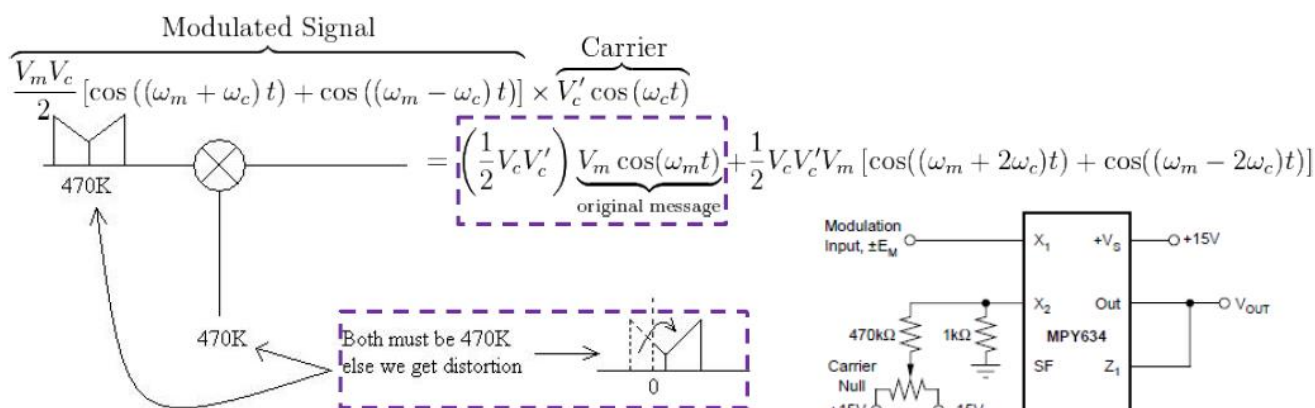
$$V_{DSB-SC_{\text{demodulate}}}(t) = \frac{V_c^2 \cdot V_m}{2} \left\{ \cos[2\pi(f_m)t] + \frac{1}{2} \cdot \cos[2\pi(2f_c + f_m)t] + \frac{1}{2} \cdot \cos[2\pi(2f_c - f_m)t] \right\} \quad (8)$$

從(8)可以得知:

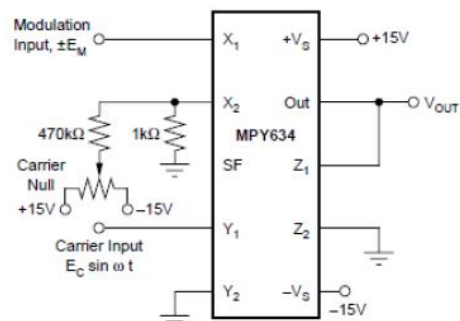
〈a〉會有三種頻率的成分，分別是 $(f_m, 2f_c - f_m, 2f_c + f_m)$ 〈b〉頻率為 f_m 的振幅為另外兩種高頻的振幅的兩倍，因此理論上會比他們大 $20\log(2) = 6.020dB$ 〈c〉exp1-2 FFT 可以看出，原本的 $V_{DSB-SC}(t)$ 含有 f_m 的成分，乘上載波後，解調變效果其實不會太好。

註：講義在解調變這邊的公式推導後半部應該少乘了一個 0.5

Schematic of Demodulation of DSB-SC (synchronous demodulation)



要使用一樣的
頻率及相
位要一樣才
可以解調變



The basic multiplier connection performs balanced modulation. Carrier rejection can be improved by trimming the offset voltage of the modulation input. Better carrier rejection above 2MHz is typically achieved by interchanging the X and Y inputs (carrier applied to the X input).

4.

Vout2 FFT waveform with data (measured by cursor)



	Modulation(Signal)	Lower sideband	Upper sideband
	120k Hz	3.88M Hz	4.12M Hz
Magnitude (dB)	-6.923 dB	-26.79 dB	

由(8)可知:

$$V_{DSB-SC_{\text{demodulate}}}(t) = \frac{V_c^2 \cdot V_m}{2} \left\{ \cos[2\pi(f_m)t] + \frac{1}{2} \cdot \cos[2\pi(2f_c + f_m)t] + \frac{1}{2} \cdot \cos[2\pi(2f_c - f_m)t] \right\}$$

頻率為 f_m 的振幅為另外兩種高頻的振幅的兩倍，因此理論上會比他們大 $20\log(2) = 6.020dB$

但是因為 IC 的缺陷，沒有盡責的確實完成他乘法的工作，因此量測到的數值與理論值差很多。

Question:

Why the sideband frequencies are 1.88MHz and 2.12MHz?

由(2)可知:

$$V_{DSB-SC}(t) = \frac{V_c \cdot V_m}{2} [\cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \cos[2\pi(f_c - f_m)t]]$$

帶入實驗參數 $(f_m, f_c) = (120k, 2M)$ ，可以得到兩根高頻的 side band 為:

$$\begin{cases} f_c - f_m = 2M - 120k = 1.88M \\ f_c + f_m = 2M + 120k = 2.12M \end{cases}$$

Is there any other frequency element observed after demodulation?

由(8)可知:

$$V_{DSB-SC_{\text{demodulate}}}(t) = \frac{V_c^2 \cdot V_m}{2} \left\{ \cos[2\pi(f_m)t] + \frac{1}{2} \cdot \cos[2\pi(2f_c + f_m)t] + \frac{1}{2} \cdot \cos[2\pi(2f_c - f_m)t] \right\}$$

可以從 FFT 的圖片中清楚看到有三種頻率的成分，分別是 $(f_m, 2f_c - f_m, 2f_c + f_m)$ ，但是如同前面提到

的類比 IC 乘法的缺陷， $V_{DSB-SC}(t)$ 本身其實是還有 f_m 的成分存在，因此在解調變時乘上載波後，應該會變得相當複雜，產生許多不同頻率。

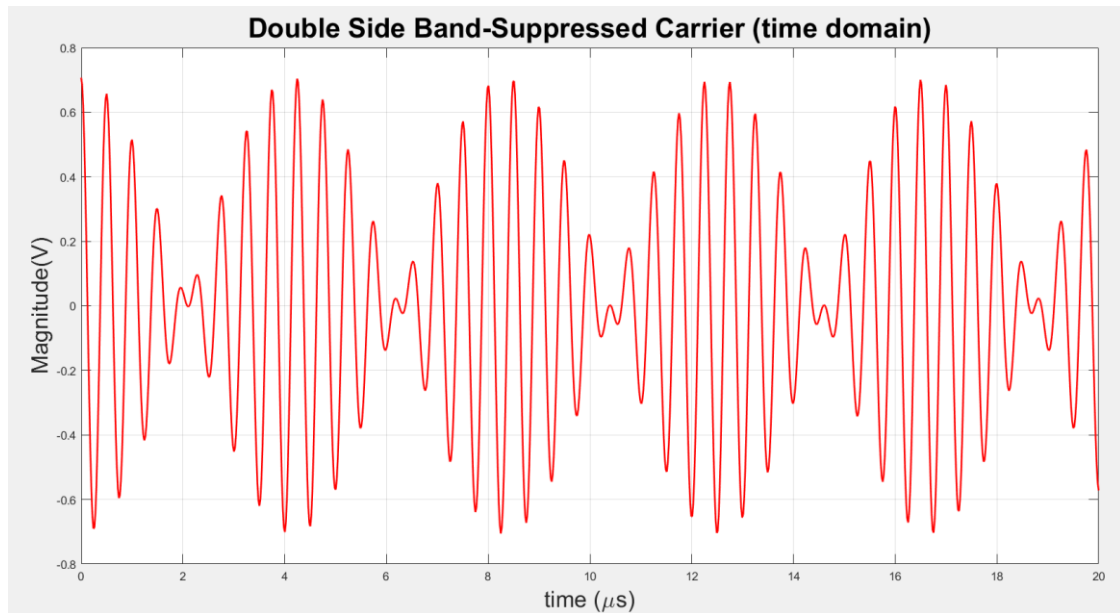
Experiment 1 Matlab Simulation:

Part 1:

Generate DSB-SC signal by multiplying two sinusoidal signals:

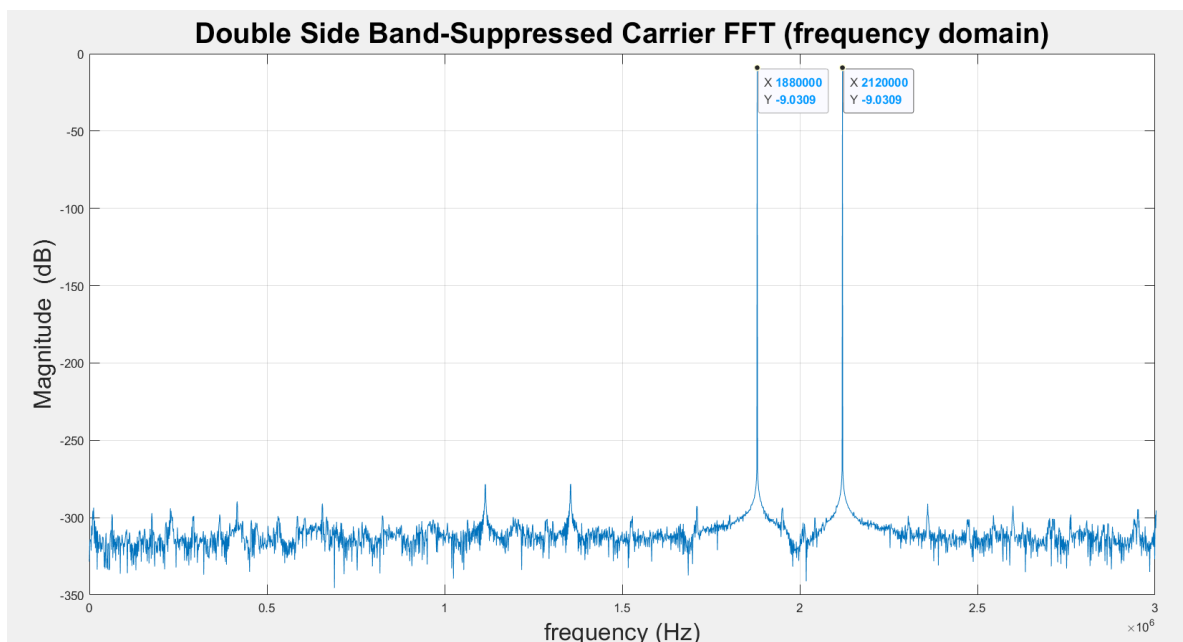
$$V_{DSB-SC}(t) = [V_c \cos(2\pi f_c t)] \cdot [V_m \cos(2\pi f_m t)]$$

$$= \frac{5\sqrt{2}}{2} \{ \cos(2\pi(188000)t) + \cos(2\pi(212000)t) \}$$



Part 2:

FFT the DSB-SC AM signal:



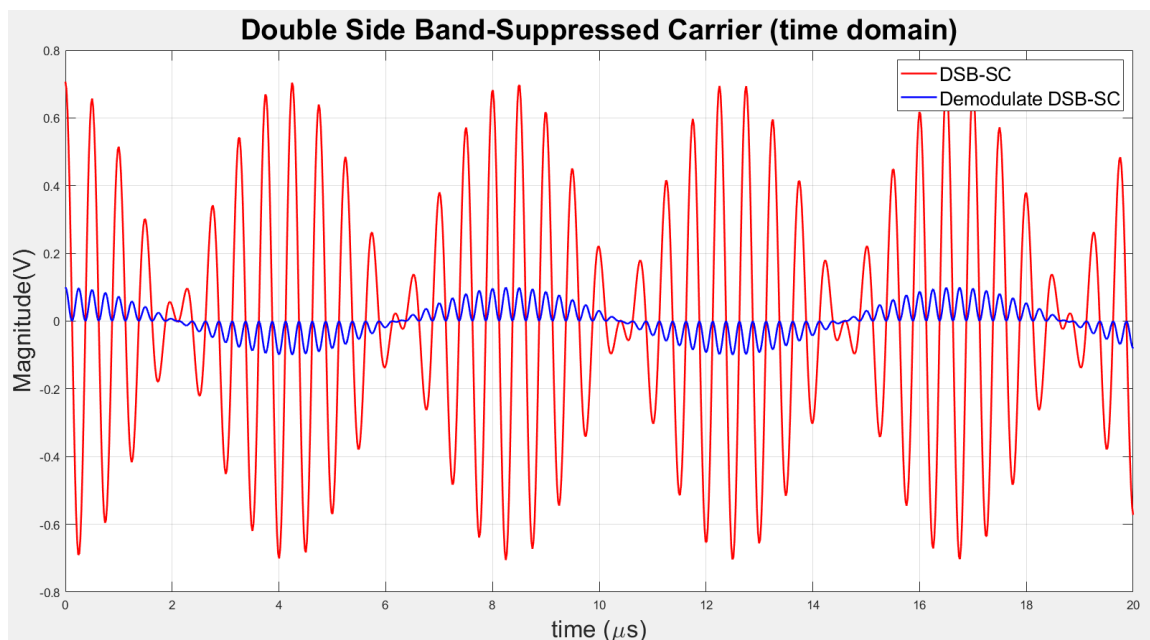
因為不知道 SF 為多少，我將其設為 10 來做計算，因此縱座標會是不準的，但是可以觀察到將 DSB-SC 做 FFT 之後確實可以在頻率為 1.88M 及 2.12M 看到大小一樣的 side band 存在。而在頻率為 120k 處也不會觀察到因為 IC 缺陷而產生的 band。

Part 3:

Demodulate the DSB-SC signal by multiplying the carrier wave:

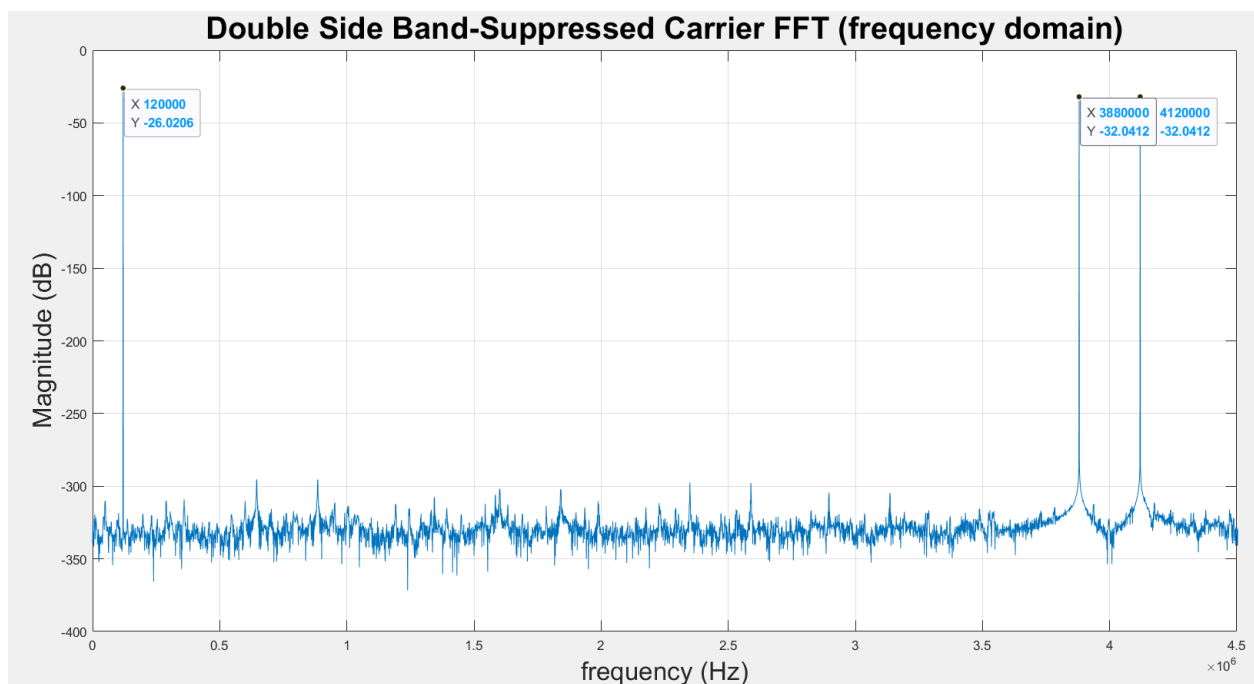
$$V_{DSB-SC_{\text{demodulate}}}(t) = \left\{ \frac{V_c \cdot V_m}{2} \left[\cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \cos[2\pi(f_c - f_m)t] \right] \right\} \cdot [V_c \cos(2\pi f_c t)]$$

$$= \frac{V_c^2 \cdot V_m}{2} \left\{ \cos[2\pi(f_m)t] + \frac{1}{2} \cdot \cos[2\pi(2f_c + f_m)t] + \frac{1}{2} \cdot \cos[2\pi(2f_c - f_m)t] \right\}$$



Part 4:

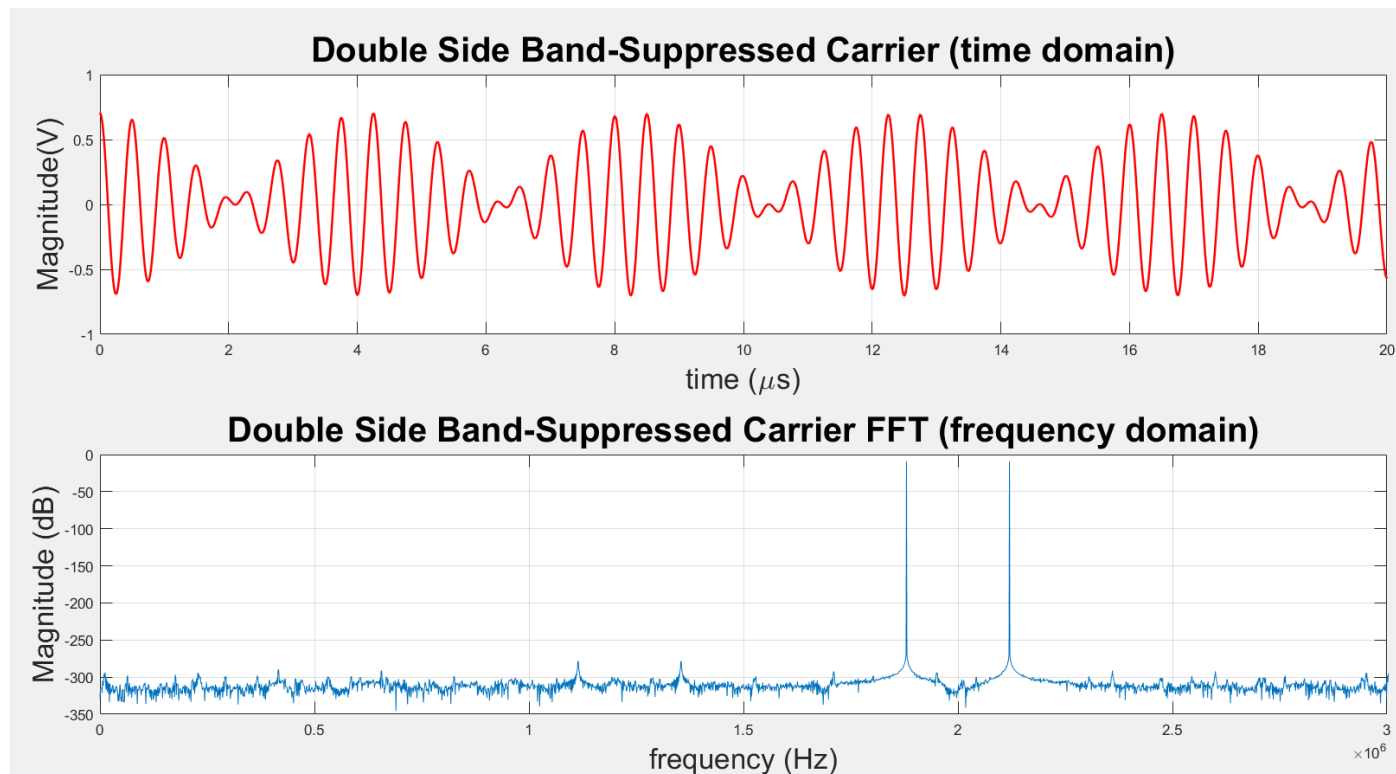
FFT the signal after demodulating:



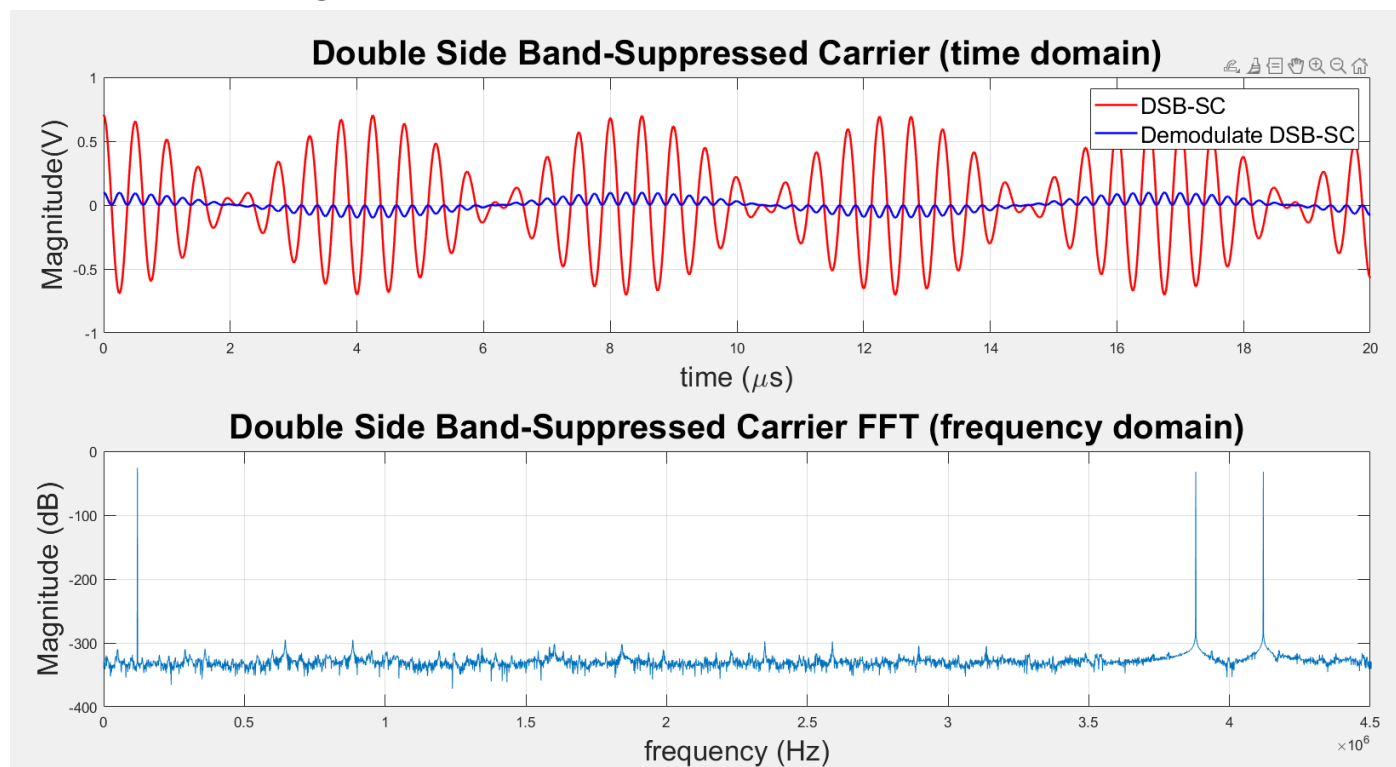
結果與前面所推導的(8)式相同，可以看到低頻的訊號比高頻的訊號大了6dB，原因是他們在 time domain 的振幅就差兩倍所致。

Subplot the time domain and frequency domain:

DSB-SC AM signal:



Demodulate DSB-SC signal:



Matlab code:

```

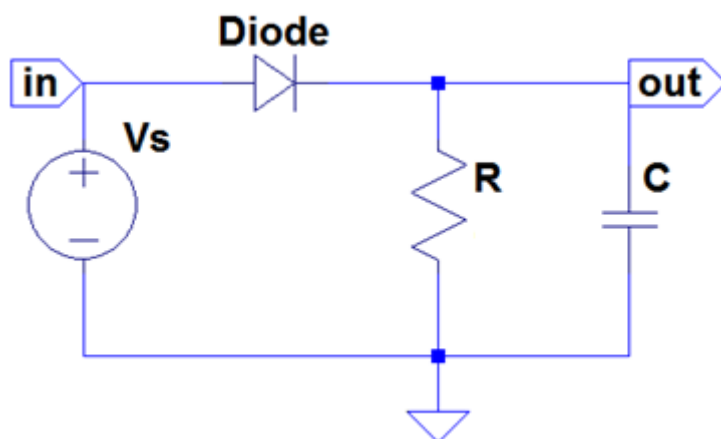
1  clc;
2  clear;
3
4  Fs = 100000000; % Sampling frequency
5  T = 1/Fs; % Sampling period
6  L = 100 * 10^3; % Length of signal
7  t = (0:L-1)*T; % Time vector
8
9  %simulation time
10 initial = 0;
11 final = 20 * 10^-6;
12 N = 1000; %grid number
13 time = linspace(initial, final, N);
14
15 %sinusoidal wave parameter setting
16 A_c = sqrt(2);
17 f_c = 2 * 10^6;
18 A_m = 5;
19 f_m = 120 * 10^3;
20 A_c_prime = A_c;
21 SF = 10;
22
23 %generate AM signal in time domain
24 AM_signal = A_c * cos(2 * pi * f_c * time) * A_m * cos(2 * pi * f_m * time) / SF;
25
26 %FFT (reference from MathWork)
27 AM_signal1 = A_c * cos(2 * pi * f_c * t) * A_m * cos(2 * pi * f_m * t) / SF;
28 Y = fft(AM_signal1);
29 P2 = abs(Y/L);
30 P1 = P2(1:L/2+1);
31 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
32 f = Fs*(0:(L/2))/L;
33
34 %demodulate the DSB-SC
35 Demo_AM_signal = AM_signal * A_c_prime * cos(2 * pi * f_c * time) / SF;
36
37 %FFT demodulate signal
38 Demo_AM_signal1 = AM_signal1 * A_c_prime * cos(2 * pi * f_c * t) / SF;
39 Y2 = fft(Demo_AM_signal1);
40 P4 = abs(Y2/L);
41 P3 = P4(1:L/2+1);
42 P3(2:end-1) = 2*P3(2:end-1);
43 f2 = Fs*(0:(L/2))/L;
44
45 figure(1);
46 plot(time * 10^6, AM_signal, '-r', 'LineWidth=1.5'); hold on;
47 xlabel('time (\mus)', 'FontSize=20');
48 ylabel('Magnitude(V)', 'FontSize=20');
49 title('Double Side Band-Suppressed Carrier (time domain)', 'FontSize=24');
50 grid on;

```

```

51
52     figure(2);
53     plot(f,20*log10(P1)) ;hold on;
54     xlabel('frequency (Hz)', FontSize= 20);
55     ylabel('Magnitude (dB)', FontSize= 20);
56     xlim([0,3000000]);
57     title('Double Side Band-Suppressed Carrier FFT (frequency domain)', FontSize= 24);
58     grid on;
59
60     figure(3);
61     plot(time * 10^6,AM_signal, '-r', LineWidth= 1.5);hold on;
62     plot(time * 10^6,Demo_AM_signal, '-b', LineWidth= 1.5);hold on;
63     xlabel('time (\mus)', FontSize= 20);
64     ylabel('Magnitude(V)', FontSize= 20);
65     title('Double Side Band-Suppressed Carrier (time domain)', FontSize= 24);
66     legend('DSB-SC', 'Demodulate DSB-SC', Fontsize = 16);
67     grid on;
68
69     figure(4);
70     plot(f,20*log10(P3)) ;hold on;
71     xlabel('frequency (Hz)', FontSize= 20);
72     ylabel('Magnitude (dB)', FontSize= 20);
73     xlim([0,4500000]);
74     title('Double Side Band-Suppressed Carrier FFT (frequency domain)', FontSize= 24);
75     grid on;
76
77     figure(5);
78     subplot(2,1,1);
79     plot(time * 10^6,AM_signal, '-r', LineWidth= 1.5);hold on;
80     xlabel('time (\mus)', FontSize= 20);
81     ylabel('Magnitude(V)', FontSize= 20);
82     title('Double Side Band-Suppressed Carrier (time domain)', FontSize= 24);
83     grid on;
84
85     subplot(2,1,2);
86     plot(f,20*log10(P1)) ;hold on;
87     xlabel('frequency (Hz)', FontSize= 20);
88     ylabel('Magnitude (dB)', FontSize= 20);
89     xlim([0,3000000]);
90     title('Double Side Band-Suppressed Carrier FFT (frequency domain)', FontSize= 24);
91     grid on;
92
93     figure(6);
94     subplot(2,1,1);
95     plot(time * 10^6,AM_signal, '-r', LineWidth= 1.5);hold on;
96     plot(time * 10^6,Demo_AM_signal, '-b', LineWidth= 1.5);hold on;
97     xlabel('time (\mus)', FontSize= 20);
98     ylabel('Magnitude(V)', FontSize= 20);
99     title('Double Side Band-Suppressed Carrier (time domain)', FontSize= 24);
100    legend('DSB-SC', 'Demodulate DSB-SC', Fontsize = 16);
101    grid on;
102
103    subplot(2,1,2);
104    plot(f,20*log10(P3)) ;hold on;
105    xlabel('frequency (Hz)', FontSize= 20);
106    ylabel('Magnitude (dB)', FontSize= 20);
107    xlim([0,4500000]);
108    title('Double Side Band-Suppressed Carrier FFT (frequency domain)', FontSize= 24);
109    grid on;

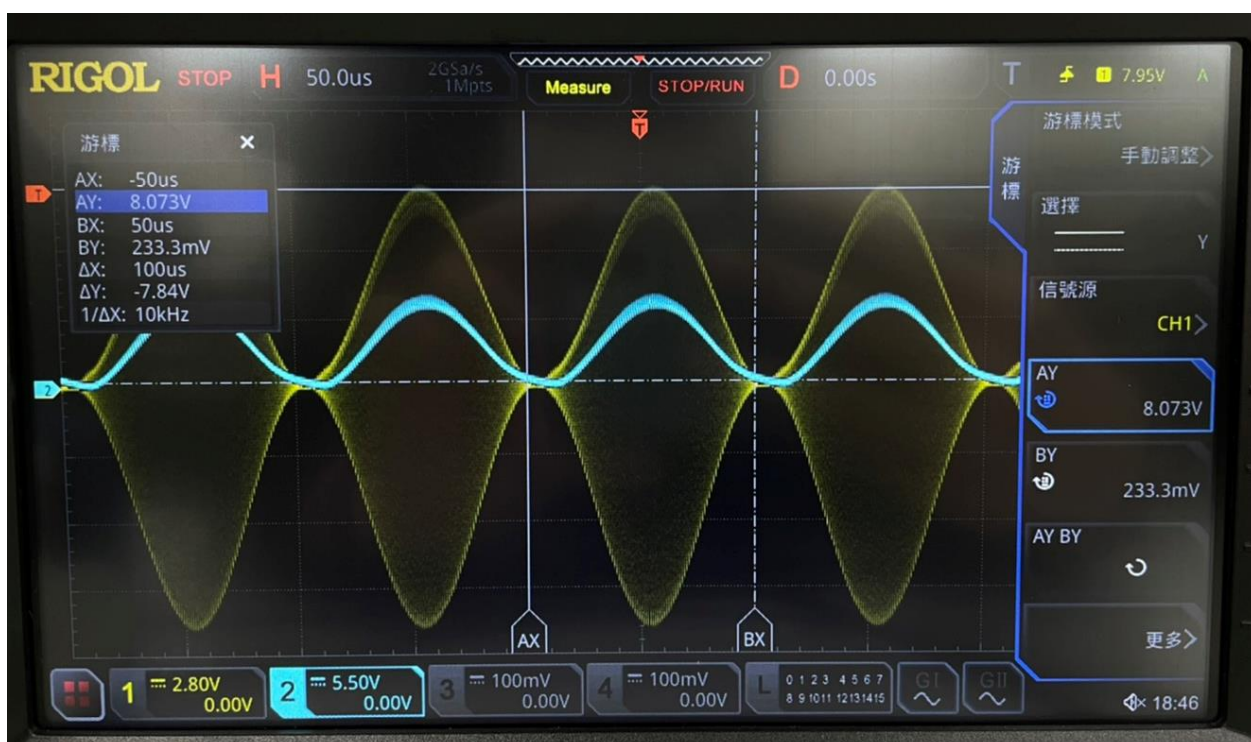
```

Experiment 2: The Envelope Detector

這個電路可以視為先半波整流之後再通過一個低通的濾波器，將低頻的訊號過濾出來，如此一來便可以得到 modulation wave 了。

2.

Input and output waveforms in DC coupling (AM depth 100%)



3.

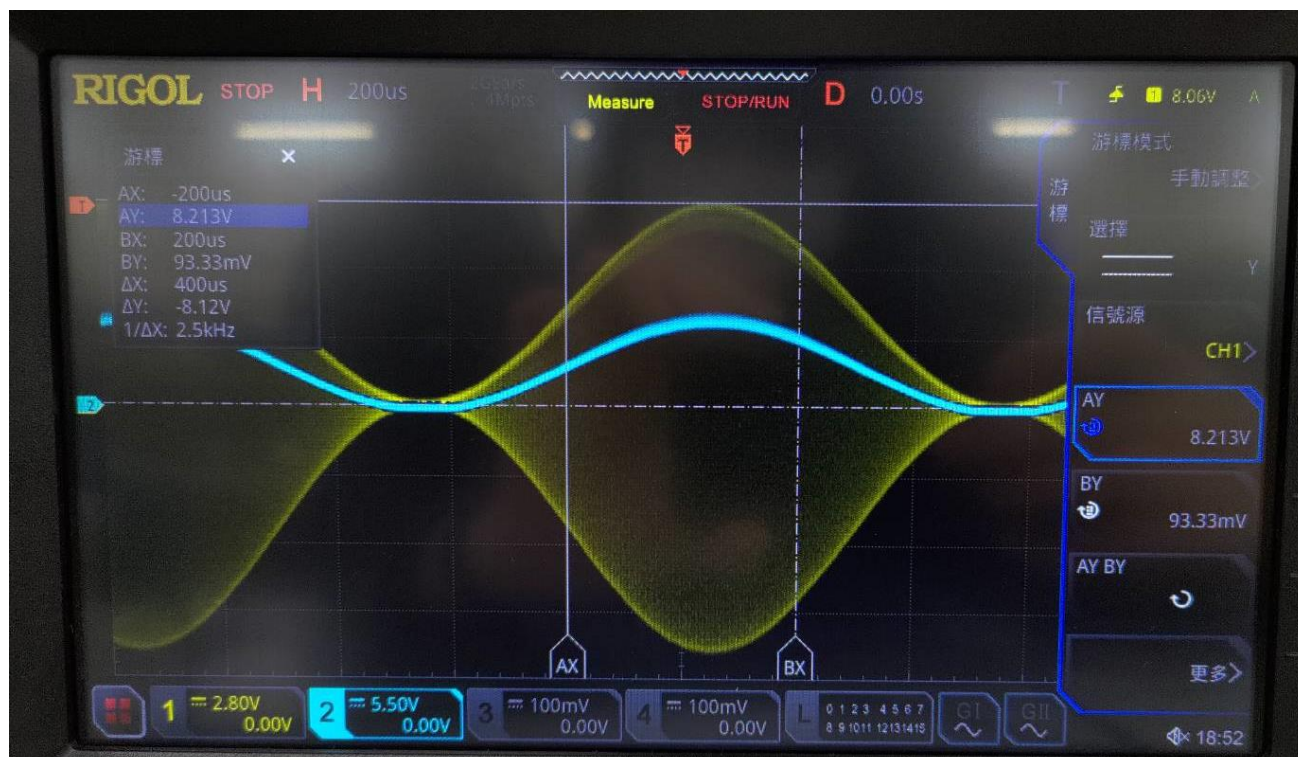
Input and output waveforms in DC coupling (AM depth 50%)



Theoretical value	Vmax	Vmin	Measured AM modulation index
100%	8.07V	0.233V	0.943
50%	6.206V	1.913	0.528

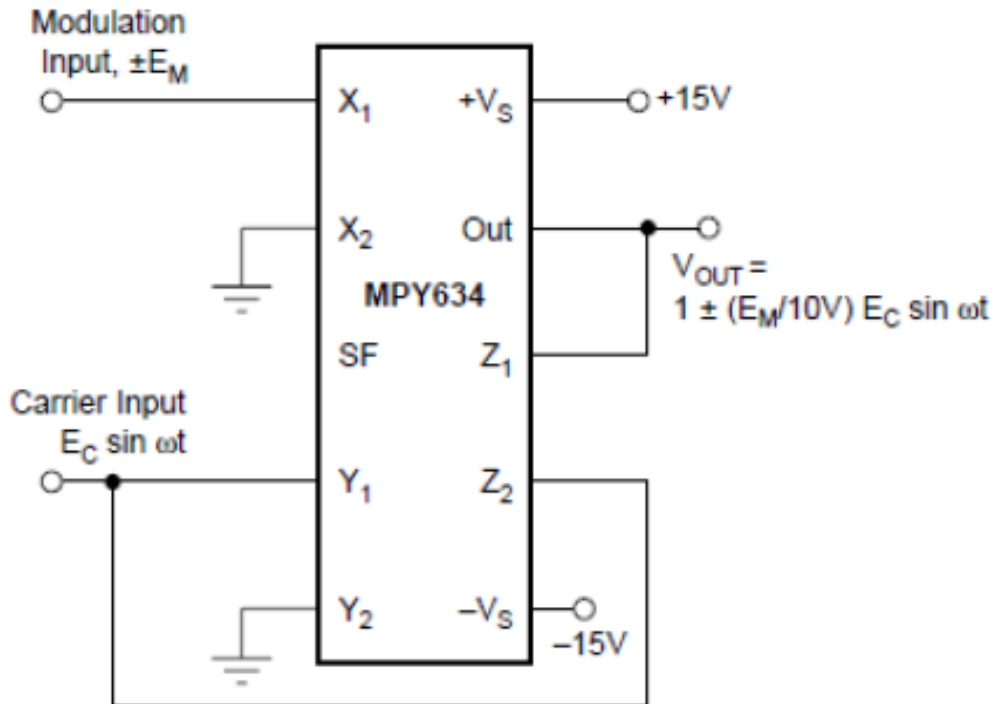
4.

Input and output waveforms in DC coupling (fm=1KHz, AM depth 100%)



Experiment 3: Linear AM Modulator and Demodulation

這邊講義的推導其實也有錯誤。



若照著上圖這樣接，實際上的 V_{out} 可以由下式推得：

由(4)式的 transfer function 開始：

$$V_{out} = A \left[\frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{SF} - (Z_1 - Z_2) \right]$$

$$\left[\frac{(V_m \cos(2\pi f_m t) - 0)(V_c \cos(2\pi f_c t) - 0)}{SF} - (V_{out} - V_c \cos(2\pi f_c t)) \right] = \frac{V_{out}}{A} \sim 0 \quad (9)$$

移向整理後：

$$V_{out} = \left[\frac{(V_m \cos(2\pi f_m t))(V_c \cos(2\pi f_c t))}{SF} + V_c \cos(2\pi f_c t) \right] \quad (10)$$

將(10)積化和差之後可得：

$$V_{out} = \left[\frac{V_m V_c}{2SF} [\cos(2\pi(f_c + f_m)t) + \cos(2\pi(f_c - f_m)t)] + V_c \cos(2\pi f_c t) \right] \quad (11)$$

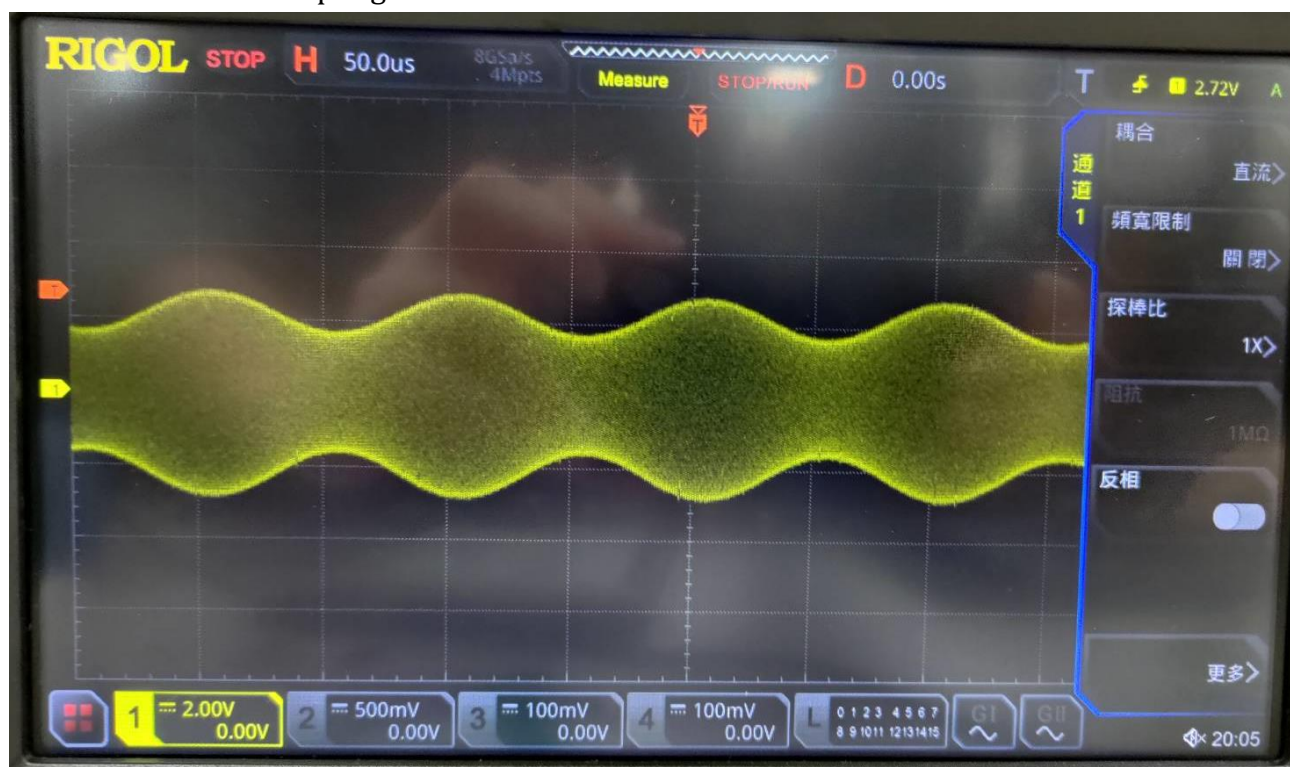
由(11)可以得知以下幾件事：

〈a〉頻率由三種成分所組成，分別是 $(f_c, f_c - f_m, f_c + f_m)$

〈b〉倘若 $\frac{V_m}{2SF} < 1$ ，才能推論頻率為 f_c 的成分會比較大，反之。

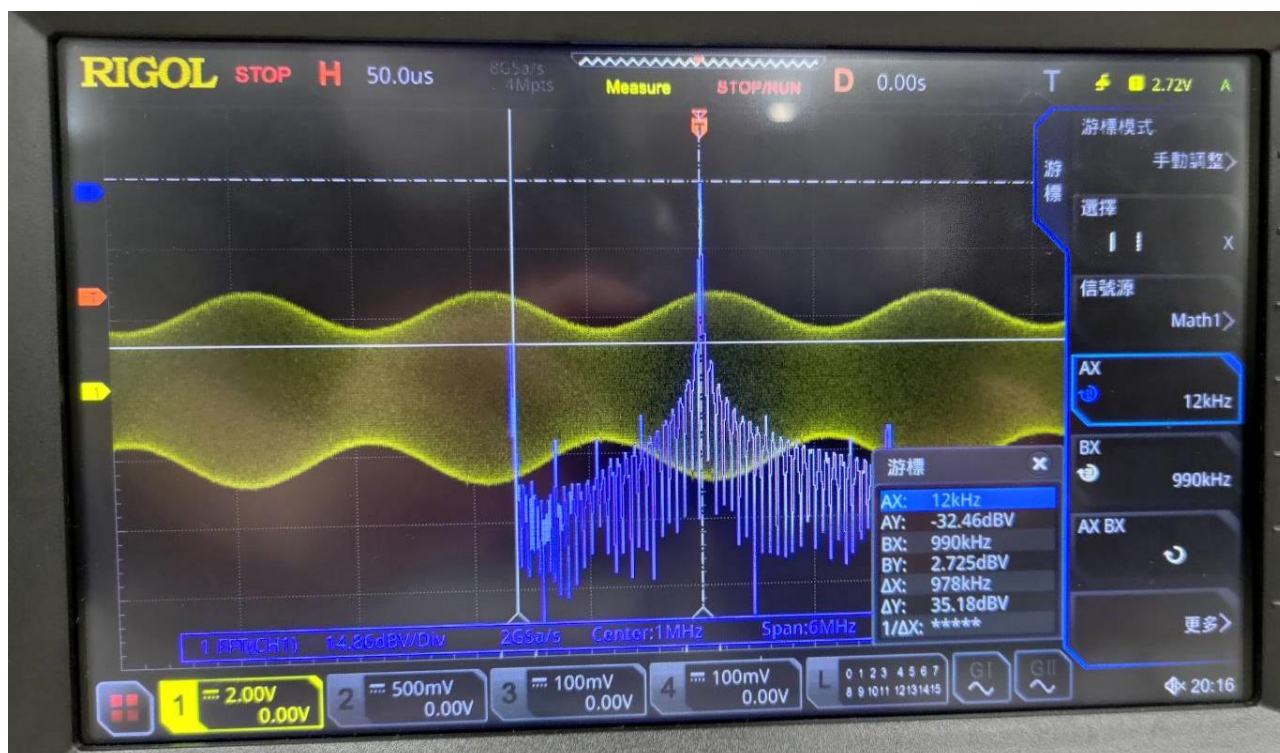
2.

Vout1 waveform in DC coupling



3.

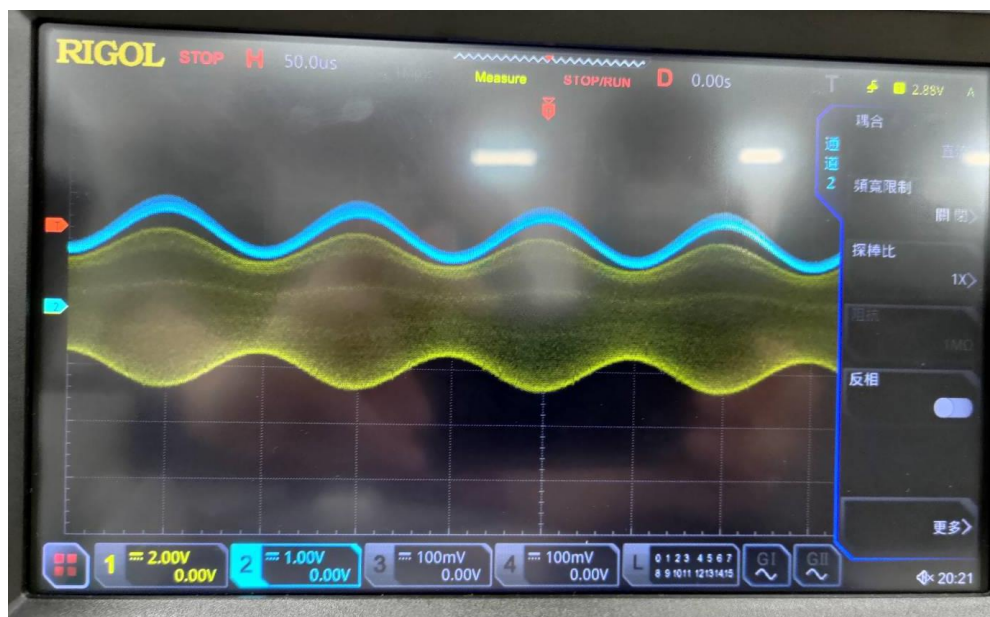
Vout1 FFT waveform with data



	Modulation(Signal)		Carrier	
	10k	Hz	1M	Hz
Magnitude (dB)	-32.46	dB	2.725	dB

5.

Vout1 and Vout2 waveform in DC coupling



6.

Vout2 FFT waveform with data



	Modulation(Signal)		Carrier	
	10k	Hz	1M	Hz
Magnitude (dB)	-9.416	dB	-28	dB

在經過 envelope detector 之後，可以發現他將波的外型擷取出來，並且因為他有低通濾波器的特性，因此高頻的訊號的成分就減少了許多。

Question:

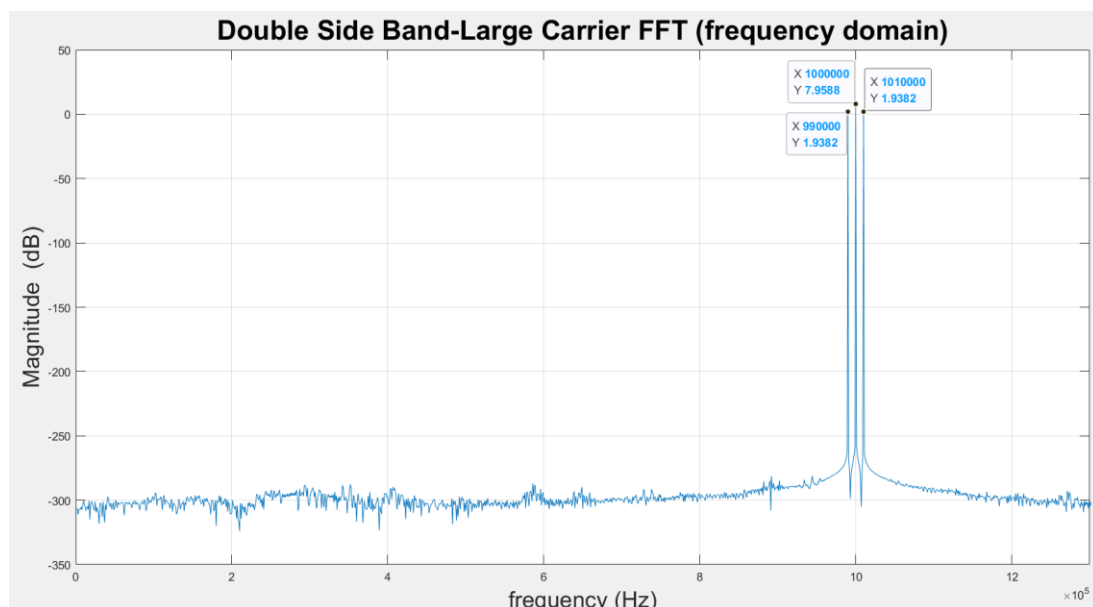
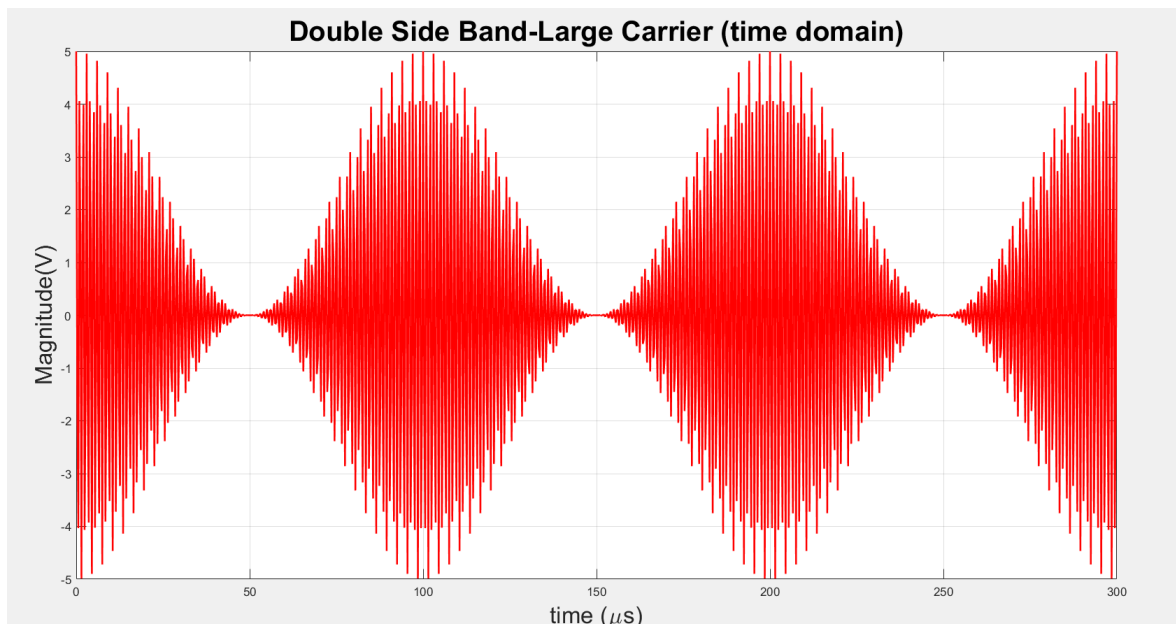
Compare with exp1 (DSB-SC), do you find any difference?

其實蠻難比較的，因為 MPY634 的缺陷，若要照實驗值去比較恐怕有點困難。

就理論值來說，DSB-SC 的這種 AM signal，在做 FFT 時理論上只會有兩條 side band，頻率分別為 $(f_c - f_m, f_c + f_m)$ ，而對於 DSB-LC 的這種 AM signal，在做 FFT 時理論上會有三條 side band，頻率分別為 $(f_c, f_c - f_m, f_c + f_m)$ 。

Matlab Simulation(不考慮 IC 造成的 SF 效應)

Modulation index = 1



在這邊可以看到頻率為 f_c 的值比另外兩根高了 6dB，與理論值相同。

心得

這次的實驗撇除 IC 的缺陷，內容對我來說蠻新奇的，瞭解到了訊號是如何被傳輸及加解密。這次因為實驗結果與我的理想解答有著蠻大的落差，所以我便花了一點時間學了 Matlab 如何模擬 FFT 的功能，並且實際將實驗的流程操作一次，對我來說真的獲益良多。在這中間卡最久的是調整 FFT 解析度的時候，在取樣的頻率及時間這兩個參數我都調了許久才能夠如願畫出理想的結果。