

主動低通濾波器

Low-pass filter

研 究 生：許少璜

Student：Shao Huang Hsu

指導教授：張忠誠

Advisor：Chung-Cheng Chang

國立臺灣海洋大學
電機工程學系

National Taiwan Ocean University
Electrical Engineering
February 2023
Keelung, Taiwan, Republic of China

中華民國 112 年 1 月

Abstract

This study primarily explores the principles and design of active filters. Numerous scholars, both domestically and internationally, have conducted extensive research on filter design. Filter design can be categorized into two main types: "traditional filters, composed of passive components, and "active filters, operational amplifiers, resistors, and capacitors. The relatively large size of passive components, such as inductors and capacitors, complicates the design and manufacturing of integrated circuits (ICs), making them extremely complex and economically unfeasible.

Keywords: low-pass filtering, low-pass filter, filter, filter circuit simulation.

目次

摘要	I
Abstract	II
目次	III
圖目次	IV
表目次	VI
詞彙或特殊符號說明	VII
第一章 緒論	1
1.1 發展背景	1
1.2 研究動機與目的	1
1.3 章節介紹	1
第二章 低通濾波器演算法	2
2.1 二階低通 Butterworth 濾波器	2
2.2 二階低通 Bessel 濾波器	2
2.3 二階低通 Chebyshev 濾波器	3
第三章 低通濾波器電路	4
3.1 前言	4
3.2 濾波器型態	4
3.2.1 高通濾波器種類與特性	4
3.2.2 低通濾波器種類與特性	4
3.2.3 帶通濾波器種類與特性	5
3-3 濾波器電路結構	5
3.3.1 濾波器電路簡介	5
3.3.2 濾波器電路應用	6
3.3.3 電阻、電容設計值	6
3-4 提出的低通電路	7
3.4.1 運算放大器簡介	7
3.4.2 低通濾波器電路之性能與架構	7
3.4.3 低通濾波器電路設計	8
3-5 電腦模擬	8

3.5.1 AC sweep 模擬分析.....	9
3.5.2 時域分析方波輸入模擬分析.....	14
第四章 實驗實作結果與分析.....	30
4.1 實驗儀器.....	30
4.1.1 訊號產生器.....	30
4.1.2 示波器.....	30
4.1.3 實驗儀器配置.....	30
4.2 實驗測試與調整.....	31
4.2.1 實驗說明.....	31
4.2.2 實驗設定.....	32
4.2.3 實驗結果.....	32
4.3 實驗綜合討論與分析.....	39
第五章 結論與未來研究方向.....	40
5.1 結論.....	40
5.2 未來研究與發展方向.....	40
參考文獻.....	41

圖目次

圖2-1：Butterworth 濾波器增益響應.....	2
圖2-2：Besself 濾波器增益響應.....	3
圖2-3：Chebyshev 濾波器增益響應	3
圖3-1: 電路模型	8
圖3-2：ORCAD 模擬電路(一).....	8
圖3-3：ORCAD 模擬電路(二)	9
圖3-4：ORCAD 模擬電路結果圖(一)	10
圖3-5：ORCAD 模擬電路(三)	10
圖3-6：ORCAD 模擬電路結果圖(二).....	11
圖3-7：ORCAD 模擬電路(四)	11
圖3-8：ORCAD 模擬電路結果圖(三)	12
圖3-9：ORCAD 模擬電路(五)	13
圖3-10：ORCAD 模擬電路結果圖(四)	13
圖3-11：ORCAD 模擬電路(六)	14
圖3-12：ORCAD 模擬電路結果圖(五)	15
圖3-13：ORCAD 模擬電路結果圖(六)	15
圖3-14：ORCAD 模擬電路(七)	16
圖3-15：ORCAD 模擬電路結果圖(七)	16
圖3-16：ORCAD 模擬電路結果圖(八)	17
圖3-17：ORCAD 模擬電路(八)	18
圖3-18：ORCAD 模擬電路結果圖(九)	18
圖3-19：ORCAD 模擬電路結果圖(十)	19
圖3-20：ORCAD 模擬電路(九)	20
圖3-21：ORCAD 模擬電路結果圖(十一)	20
圖3-22：ORCAD 模擬電路結果圖(十二)	21
圖3-23：ORCAD 模擬電路(十)	22
圖3-24：ORCAD 模擬電路結果圖(十三)	22
圖3-25：ORCAD 模擬電路結果圖(十四)	23
圖3-26：ORCAD 模擬電路(十一)	24
圖3-27：ORCAD 模擬電路結果圖(十五)	24
圖3-28：ORCAD 模擬電路結果圖(十六)	25
圖3-29：ORCAD 模擬電路(十二)	26
圖3-30：ORCAD 模擬電路結果圖(十七)	26
圖3-31：ORCAD 模擬電路結果圖(十八)	27

圖3-32：ORCAD 模擬電路(十三)	28
圖 3-33：模擬電路結果圖(十九)	28
圖3-34：ORCAD 模擬電路結果圖(二十)	29
圖4-1：電路板模型	31
圖4-2：頻帶內測試增益圖	33
圖 4-3：頻率對增益圖	34
圖 4-4：頻率對相位圖	35
圖 4-5：實作頻率波型結果圖(一).....	35
圖 4-6：實作頻率波型結果圖(二).....	36
圖 4-7：實作頻率波型結果圖(三).....	36
圖 4-8：實作頻率波型結果圖(四).....	37
圖 4-9：實作頻率波型結果圖(五).....	37
圖 4-10：實作頻率波型結果圖(六).....	38
圖 4-11：實作頻率波型結果圖(七).....	38
圖 4-12：實作頻率波型結果圖(八).....	39

表次

表 3-1：元件(電阻值)計算值	6
表3-2 元件(電容值)測量值.....	6
表3-3：VPLUSE 之設定	8
表4-1記錄濾波器輸出振幅	32
表4-2頻率響應圖測試記錄	34

專有名詞縮寫表
(依英文字母順序排列)

- 1.ADC(Analog to Digital Conversion)，類比對數位轉換。
- 2.AGC(Automatic Gain Control)，自動增益控制。

第一章 緒論

1.1 發展背景

在近代電信設備和各類控制系統中，濾波器應用極為廣泛。在所有的電子部件中，使用最多，技術最為複雜的要算濾波器了。濾波器的優劣直接決定產品的優劣，所以，對濾波器的研究和生產歷來為各國所重視，導致 RC 有源濾波器、數字濾波器、開關電容濾波器和電荷轉移器等各種濾波器的飛速發展，到 70 年代後期，上述幾種濾波器的單片集成已被研製出來並得到應用。80 年代，致力於各類新型濾波器的研究，努力提高性能並逐漸擴大應用範圍。90 年代至現在主要致力於把各類濾波器應用於各類產品的開發和研製。當然，對濾波器本身的研究仍在不斷進行。

1.2 研究動機與目的

由於近來通訊技術快速發展，通訊相關產品已經成為人們不可或缺的一部分。在眾多不同的通訊系統裡，射頻被動元件被廣泛的運用，以智慧型手機為例，被動電路和被動元件使用就占了該裝置的 30% 以上，其中濾波器與天線都是重要性極高的零組件。然而為了符合各種不同的通訊系統應用的需求，多種不同的射頻元件已經廣泛利用於無線通訊系統中，其中濾波器、天線、衰減器、相移器、混波器等等，皆為高頻電路裡必須運用的基本元件和電路。本專題報告嘗試提出使低通濾波器能消除電路中的混疊效應，從而使電路工作平穩。且低通濾波器具有成本效益，因此可以輕鬆使用。

1.3 章節簡介

第一章 發展背景及研究動機與目的及章節簡介。

第二章 低通濾波器演算法

第三章 低通濾波器電路

第四章 實驗結果與分析

第五章 結論及未來研究方向。

第二章 低通濾波器演算法

2.1 二階低通Butterworth 濾波器

Butterworth 濾波器特點是通頻帶內的頻率響應曲線最大限度平坦，沒有漣波。因此，Butterworth 低通特性經常用作資料轉換器應用程式中的 antialiasing 濾波器，因數據轉換需要在整個通頻帶有精確信號位元準位。圖 2-1 為 Butterworth 低通濾波器的歸一化的頻率軸 $\Omega(\Omega = f/f_c)$ 與不同階次的增益響應，越高階的濾波器，有較長的通帶平坦。

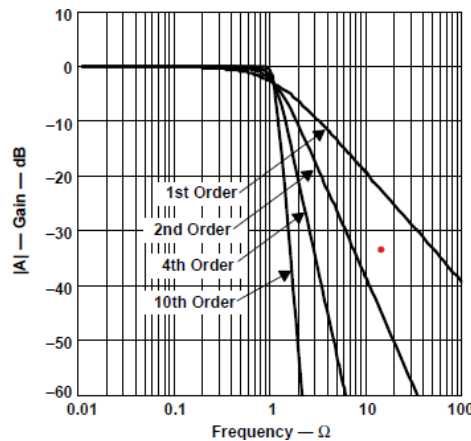


圖2-1Butterworth 濾波器增益響應

Butterworth 低通濾波器的轉移函數可以下列二次多項次來表示：

$$H(s) = \frac{H_0}{B(s)} \quad , \text{ 其中 } B(s) \text{ 為巴特沃斯多項次，其大小為} \quad (2-1)$$

$$B^2(w) = 1 + \left(\frac{w}{w_0}\right)^2 \quad (2-2)$$

2.2 二階低通Bessel 濾波器

在電子學和信號處理領域，Besself 濾波器是具有最大平坦的群延遲的線性濾波器。因此 Besself 低通濾波器提供最佳的方波傳輸特性。然而 Besself 低通濾波器的通帶增益是不如 Butterworth 濾波器的平坦，通頻帶至停止帶的衰減區也不如 Tschebyscheff 低通濾波器一樣陡峭。

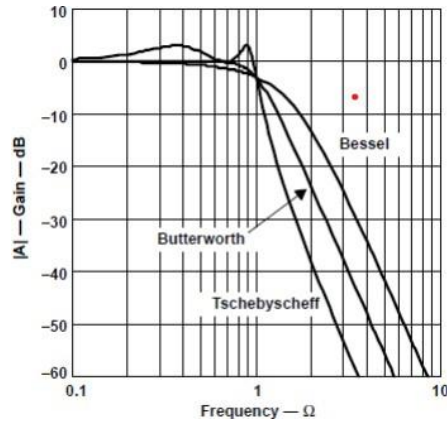


圖2-2Besself 濾波器增益響應

Bessel 低通濾波器的響應可以下列二次多項式來表示：

$$H(s) = \frac{w_0^2}{s^2 + s\left(\frac{w_0}{Q}\right) + w_0^2} \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rg}\right) \quad (2-3)$$

2.3 二階低通Chebyshev 濾波器

Chebyshev 低通濾波器提供更高增益在滾降(roll-off)以上。如圖 2-3 所示，通頻帶的增益不是單調，而是包含有常數大小的漣波量存在。若給定的濾波器階數，越高的通頻帶漣波，則有較高的濾波器滾降(roll-off)。Chebyshev 低通濾波器在過渡帶比 Butterworth 濾波器的衰減快，但頻率響應的幅頻特性不如後者平坦。Chebyshev 濾波器和理想濾波器的頻率響應曲線之間的誤差最小，但是在通頻帶內存在幅度波動。

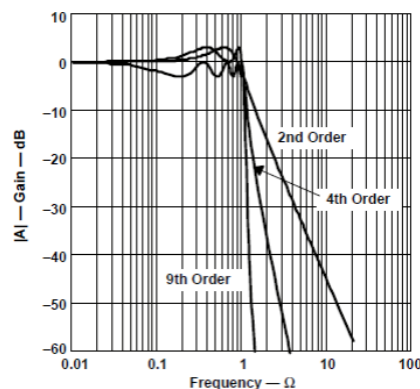


圖2-3 Chebyshev 濾波器增益響應

第三章 低通濾波器電路

3.1 前言

在低通濾波器系統中，頻率會因為受到可變電阻的影響，因此干擾了原本的頻率，這種現象導致波型無法被正確輸出。因此在這裡先介紹濾波器型態以及濾波器的特性。

3.2 濾波器型態

3.2.1 高通濾波器種類與特性

高通濾波器按照採用的器件不同分為有源高通濾波器、無源高通濾波器。有源高通濾波器，由無源元件和有源器件組成。無源高通濾波器，僅由無源元件組成的濾波器，它是利用電容和電感元件的電抗隨頻率的變化而變化的原理構成的。也可以按照數學特性分為一階高通濾波器以及二階高通濾波器。而高通濾波器是一種讓某一頻率以上的信號分量通過，而對該頻率以下的信號分量大大抑制的電容、電感與電阻等器件的組合裝置。其特性在時域及頻域中可分別用衝激回響及頻率回響描述。後者是用以頻率為自變數的函式表示，一般情況下它是一個以復變數 $j\omega$ 為自變數的的複變函數，以 $H(j\omega)$ 表示。它的模 $H(\omega)$ 和幅角 $\varphi(\omega)$ 為角頻率 ω 的函式，分別稱為系統的“幅頻回響”和“相頻回響”，它分別代表激勵源中不同頻率的信號成分通過該系統時所遇到的幅度變化和相位變化。可以證明，系統的“頻率回響”就是該系統“衝激回響”的傅立葉變換。當線性無源系統可以用一個 N 階線性微分方程表示時，頻率回響 $H(j\omega)$ 為一個有理分式，它的分子和分母分別與微分方程的右邊和左邊相對應。

3.2.2 低通濾波器種類與特性

低通濾波器有很多種，其中最通用的就是 Butterworth、Tschebyscheff 以及 Bessel。低通濾波器允許從直流到某個截止頻率的信號通過。將通用濾波器二階傳遞函式的高通和帶通係數均設為零，即得到一個二階低通濾波器傳遞公式：一個典型低通濾波器的曲線，此曲線表

明低於 f_0 的頻率其回響相對平坦。對於高於 f_0 的頻率，信號按該頻率平方的速率下降。在頻率 f_0 處，阻尼值使輸出信號衰減。您可以級聯多個這樣的濾波器部分來得到一個更高階的濾波器。假定設計要求一個截止頻率為 10KHz 的四階 Bessel 低通濾波器。根據參考文獻，每部分的轉降頻率分別為 16.13 及 18.19KHz，阻尼值分別為 1.775 及 0.821，並且這兩個濾波器分區的高通、帶通和低通係數分別為 0、0 與 1。您可以使用這兩個帶有上述參數的濾波器部分來實現所要求的濾波器。截止頻率為輸出信號衰減 3dB 的頻率點。

3.2.3 帶通濾波器種類與特性

帶通濾波器可以分為寬帶通濾波器和窄帶通濾波器兩種類型。寬帶濾波器可以通過丟棄低通段和高通段來形成，這通常是用於簡單設計和操作的不同電路。窄帶通濾波器使用多個反饋，這個帶通濾波器使用一個運算放大器，該濾波器特點主要有兩個反饋通道與運算放大器用於反向模式。一個理想的濾波器應該有一個完全平坦的通帶，例如在通帶內沒有增益或者衰減，並且在通帶之外所有頻率都被完全衰減掉，另外，通帶外的轉換在極小的頻率範圍完成。實際上，並不存在理想的帶通濾波器。濾波器並不能夠將期望頻率範圍外的所有頻率完全衰減掉，尤其是在所要的通帶外還有一個被衰減但是沒有被隔離的範圍。這通常稱為濾波器的滾降現象，並且使用每十倍頻的衰減幅度 dB 來表示。通常，濾波器的設計儘量保證滾降範圍越窄越好，這樣濾波器的性能就與設計更加接近。然而，隨著滾降範圍越來越小，通帶就變得不再平坦——開始出現「波紋」。這種現象在通帶的邊緣處尤其明顯，這種效應稱為吉布斯現象。

3.3 濾波器電路結構

3.3.1 濾波器電路簡介

在不同應用的濾波器電路，帶通濾波器用於音訊頻率範圍(0 KHz 至 20 KHz)數據機和語音處理。高頻率帶通濾波器用於通道選擇的電話交換中心處。資料獲取系統通常需要抗鋸齒低通濾波器，以及低雜訊濾波器在他們前面的信號處理階段。系統電源往往使用帶拒絕濾波器抑制 60 Hz 線和高頻瞬變。在高頻率所有這些濾波器通常由被動組件，如電感器、電

阻器和電容器組成，他們被稱為 LRC 濾波器。然而在更低的頻率範圍(1 Hz 到 1 MHz)，電感值成為非常大和電感器本身獲取相當笨重，使經濟的生產困難。在這些情況下，有源濾波器變得重要。有源濾波器是使用運算放大器作為電路的主動元件與一些電阻和電容所組成，以提供在低頻率下與電感電阻電容濾波器有相同的濾波性能。

3.3.2 濾波器電路應用

濾波器電路通常用於電子、通信電路、儀表和控制系統以及生物醫學領域，以消除 50/60 Hz 電力線干擾。以及抑制不需要的頻帶並允許以最小損耗傳輸其他頻率。交流和直流電機驅動器、轉換器和逆變器的開關類型會在線路頻率的某些諧波處引起正弦干擾。濾波器的使用消除了這種不需要的干擾並實現了準確的測量。再音頻信號處理，用於去除特定範圍的不需要的頻率，即噪聲或嗡嗡聲。在電話技術、DSL 和其他互聯網服務中用作線路降噪器，以減少不需要的干擾。音樂方面用於吉他放大器、樂器放大器、原聲吉他、曼陀林、貝斯樂器放大器和 PA 系統，以減少樂器插入後可能產生的特定嗡嗡聲。也可以用於醫療領域應用，即 ECG 測量，以消除直流分量。

3.3.3 電阻、電容設計值

表3-1 元件(電阻值)計算值

	第二級	第三級	第四級
電阻值	R21= 5.174 K Ω	R31= 7.36K Ω	R41= 12.73K Ω
電阻值	R22= 4.764 K Ω R23= 500 Ω	R32= 4.86 K Ω R33= 2.5 K	R42= 7.73 K Ω R43= 5K

表3-2 元件(電容值)測量值

	第二級	第三級	第四級
電容值	C21= 0.01013 uF	C31= 0.00974 uF	C41= 0.0105 uF
電容值	C22= 0.01015 uF	C32= 0.0098 uF	C42= 0.00988 uF

電容平均值	C23= 0.01014 uF	C33= 0.00977 uF	C43= 0.01019 uF
-------	-----------------	-----------------	-----------------

3.4 提出的低通電路

3.4.1 運算放大器簡介

運算放大器(Operational Amplifier)有高輸入電阻、低輸出電阻與高開放增益，可將 +輸入端子與 -輸入端子間的差電壓放大的差分放大器。每個電路由正電源端、負電源端、+輸入端子、-輸入端子與輸出端的 5 個端子組成。主要是做為訊號放大之用，商用型的運算放大器放大頻率範圍在 10KHz 以內，當頻率愈高時，放大率會往下降，其使用的上限為 100KHz。

3.4.2 低通濾波器電路之性能與架構

低通濾波電路，每個頻率的信號的強弱程度不同。當使用在音頻套用時，它有時被稱為高頻剪下濾波器,或高音消除濾波器。低通濾波器概念有許多不同的形式，其中包括電子線路、圖像模糊處理等等，這兩個工具都通過剔除短期波動、保留長期發展趨勢提供了信號的平滑形式。低通濾波器在信號處理中的作用等同於其它領域如金融領域中移動平均數所起的作用。

3.4.3 低通濾波器電路設計

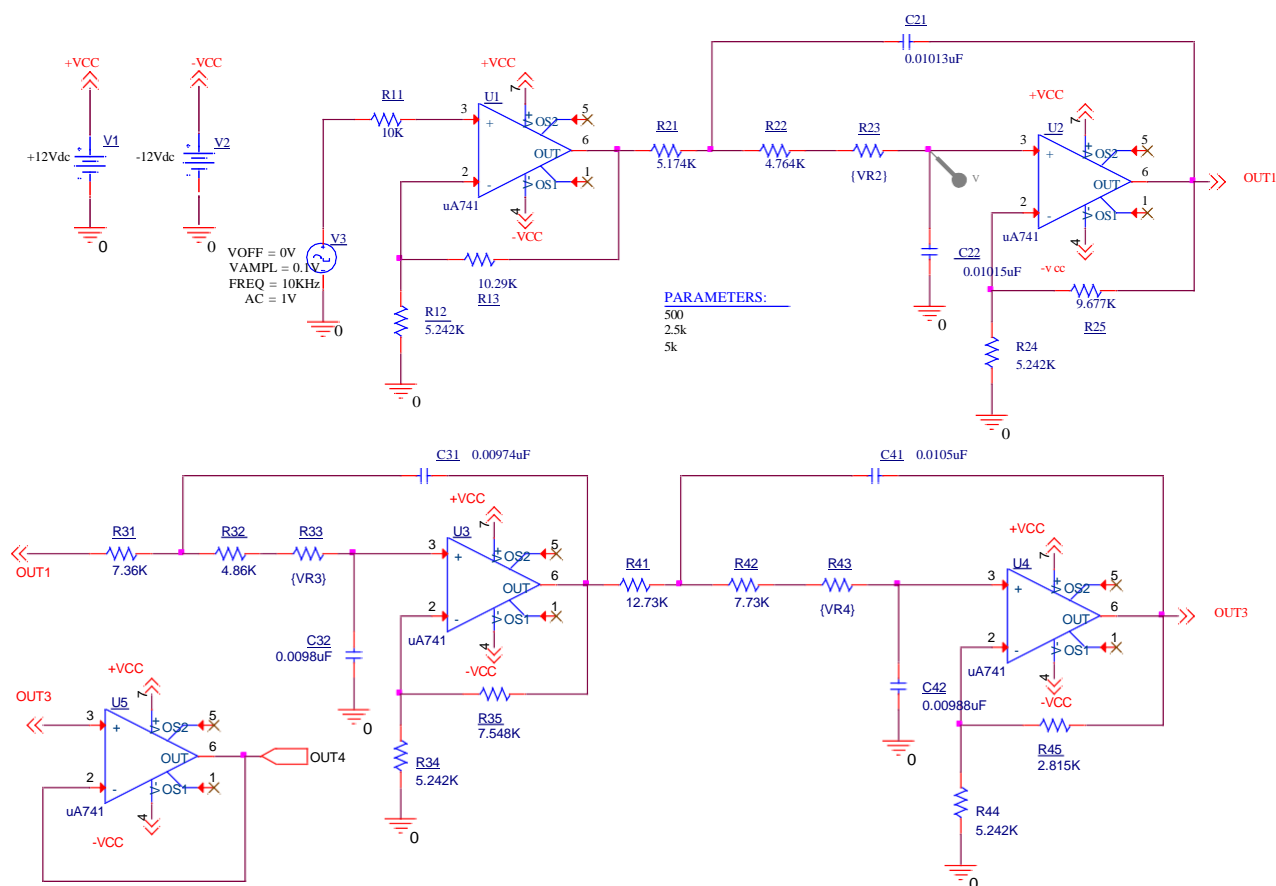


圖 3-1 電路模型

3.5 電腦模擬

模擬設定：

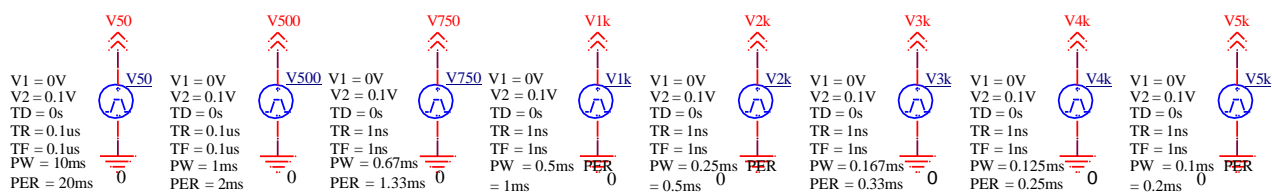


圖3-2 ORCAD 模擬電路(一)

表3-3：VPLUSE 之設定

輸入波形	輸入參數	名稱	設定值
VPULSE	V1	起始電壓	0V
	V2	波峰電壓	0.1V
	TD	延遲時間	0s
輸入波形	輸入參數	名稱	設定值

	TR	上升時間	0.1us 或1ns
	TF	下降時間	0.1us 或1ns
	PW	脈波寬度	半週期
	PER	週期	輸入訊號之週期

3.5.1 AC sweep 模擬分析

3.5.1.1 實驗模擬項目(一)：

- (1)模擬目的：參數變動下，低通濾波器輸出振幅與頻率之關係。
- (2)模擬說明：模擬可變電阻對低通濾波器電路特性的影響。
- (3)模擬設定：

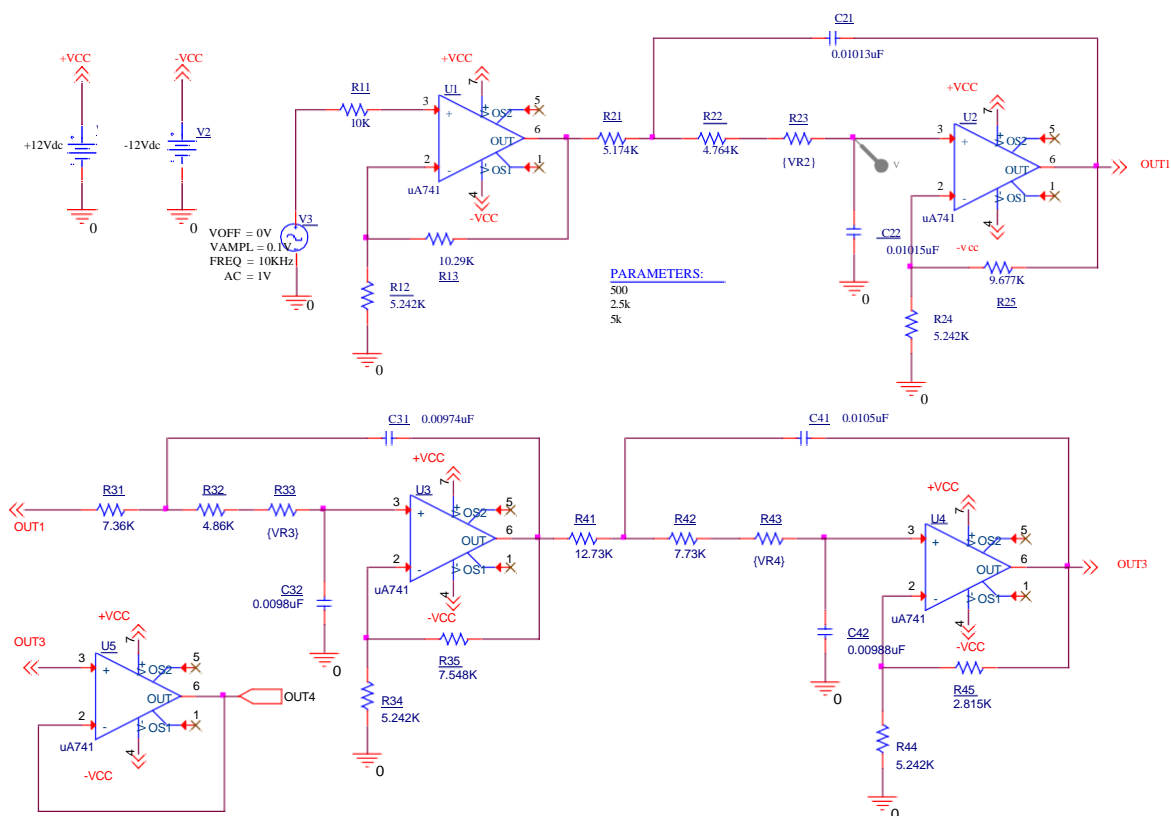


圖3-3 ORCAD 模擬電路(二)

(4)結果與分析：

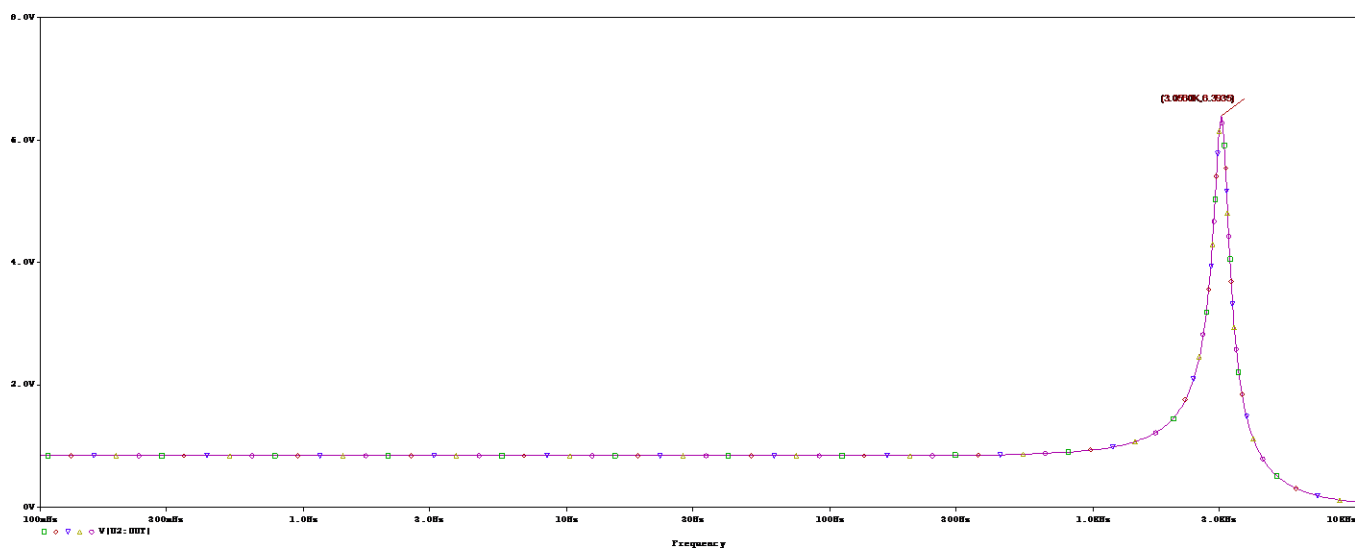


圖3-4 ORCAD 模擬電路結果圖(一)

3.5.1.2.實驗模擬項目(二)：

(1)模擬目的：參數變動下，低通濾波器輸出振幅與頻率之關係。

(2)模擬說明：模擬可變電阻對低通濾波器電路特性的影響。

(3)模擬設定：

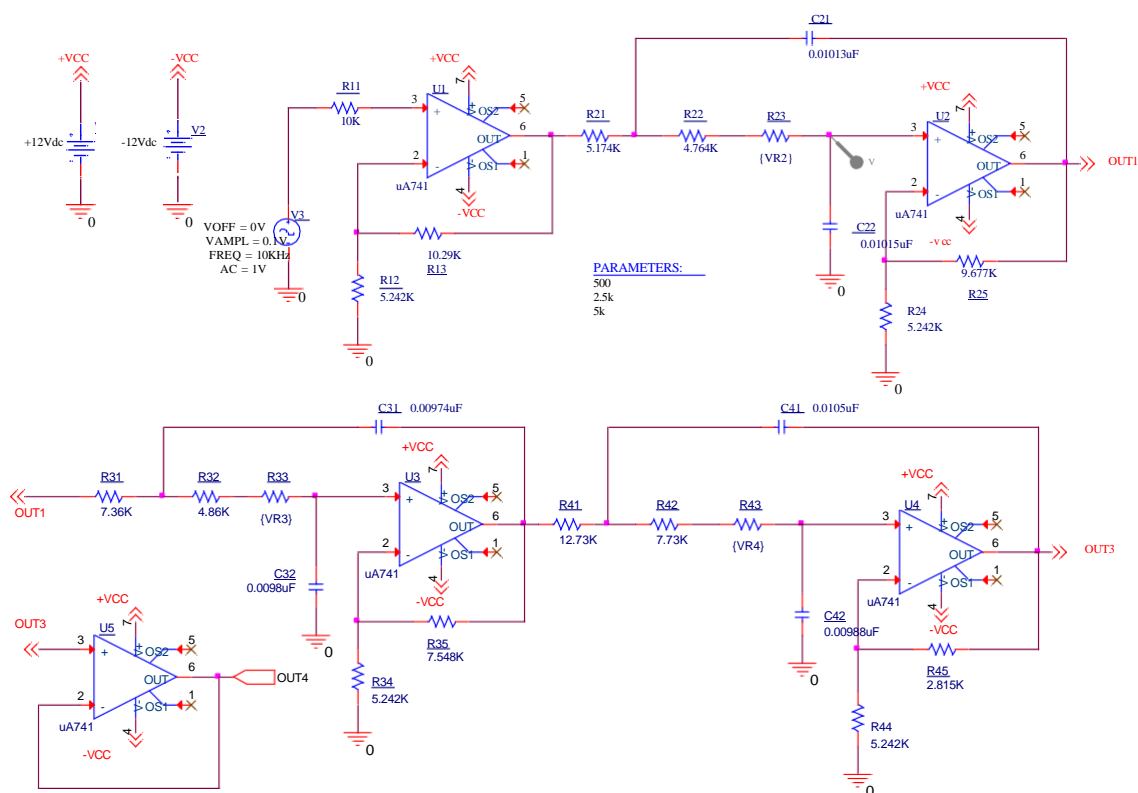


圖3-5 ORCAD 模擬電路(三)

(4)結果與分析：

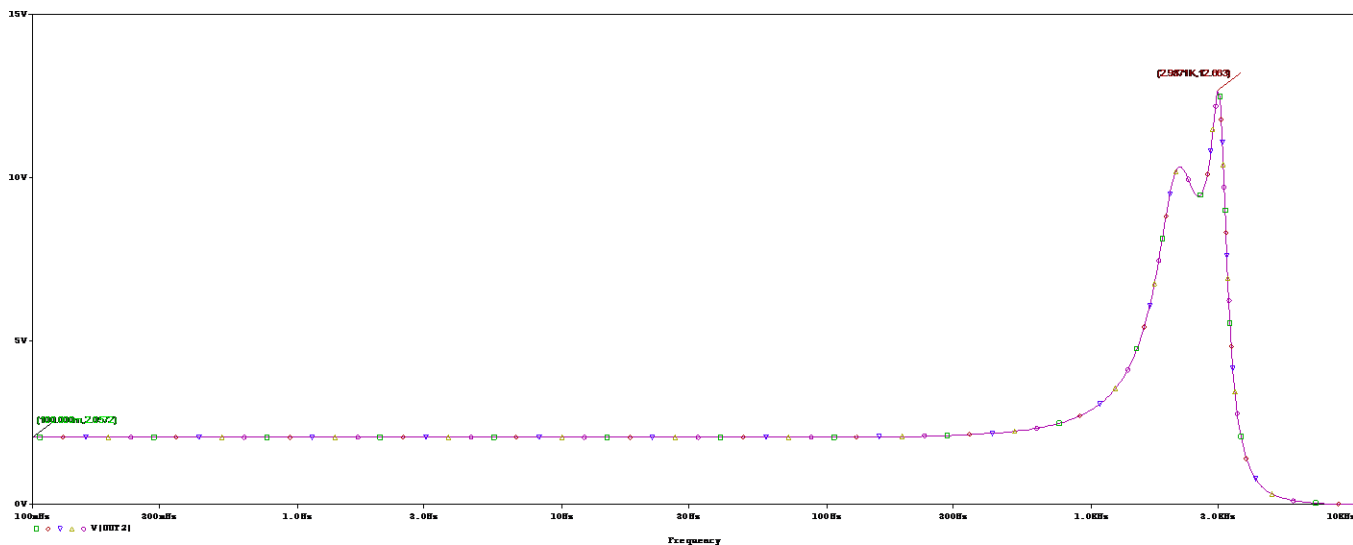


圖3-6 ORCAD 模擬電路結果圖(二)

3.5.1.3 實驗模擬項目(三):

(1)模擬目的：參數變動下，低通濾波器輸出振幅與頻率之關係。

(2)模擬說明：模擬可變電阻對低通濾波器電路特性的影響。

(3)模擬設定：

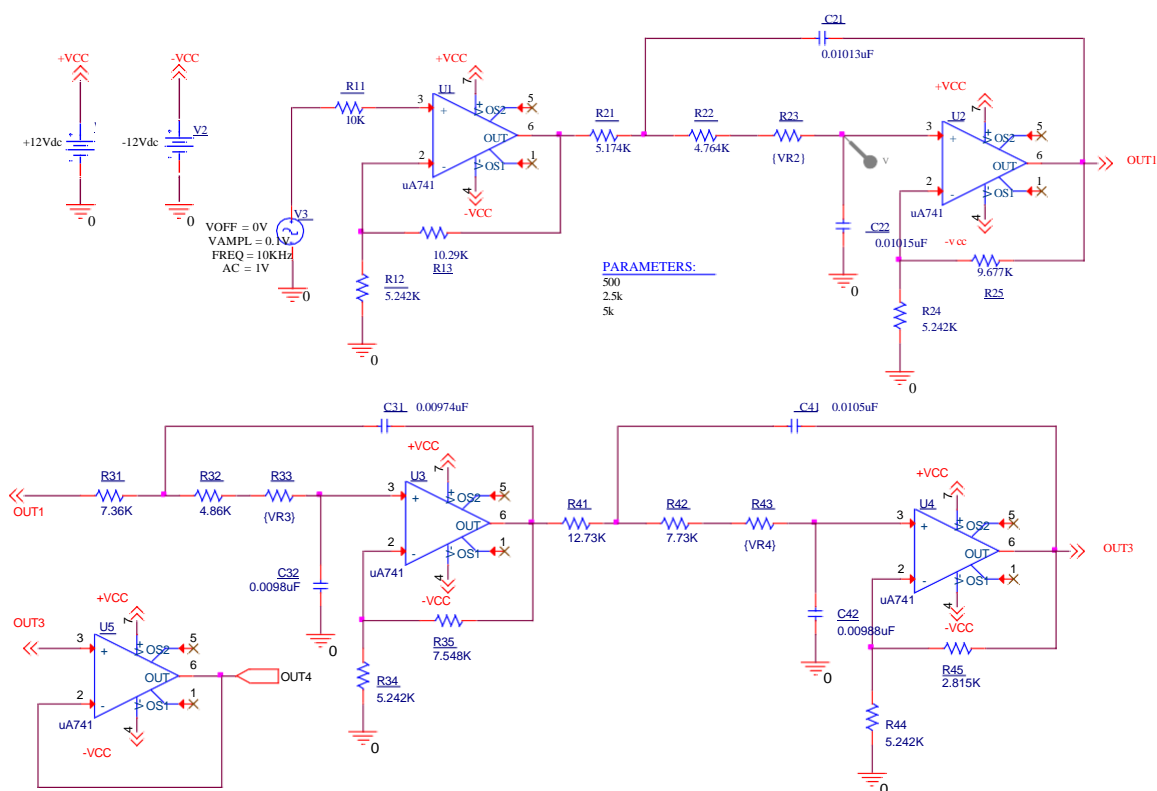


圖3-7 ORCAD 模擬電路(四)

(4)結果與分析：

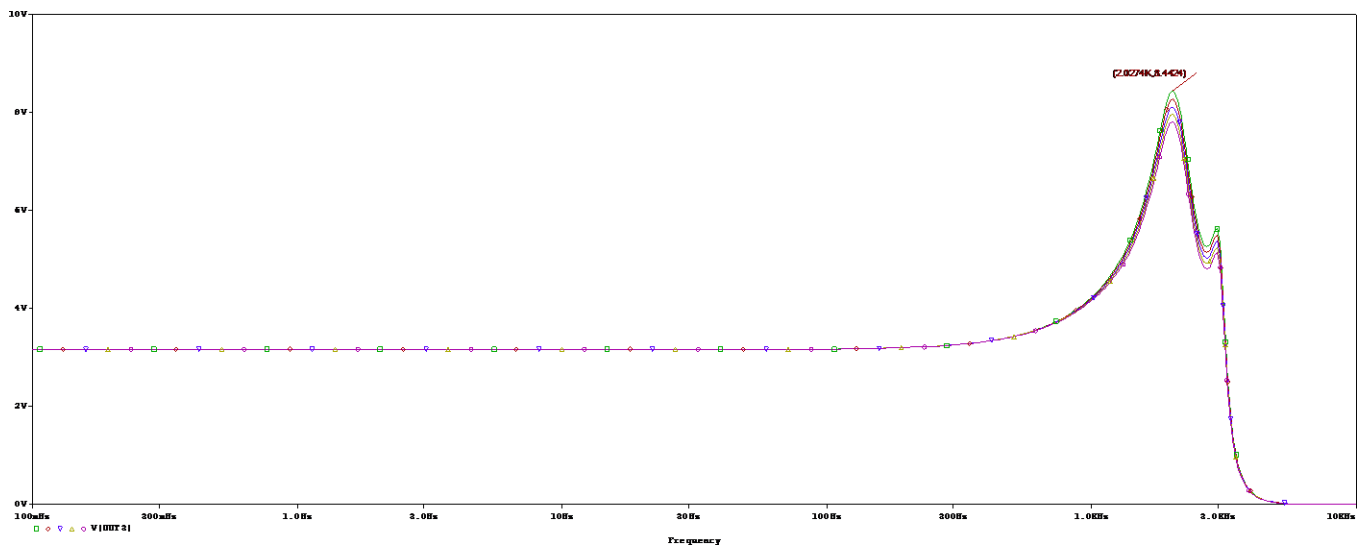


圖3-8 ORCAD 模擬電路結果圖(三)

3.5.1.4 實驗模擬項目(四)：

- (1) 模擬目的：低通濾波器輸出振幅對頻率的特性關係。
- (2) 模擬說明：由計算所得的電阻值來模擬實驗電路的低通特性，這是模擬完成調整可變電阻後，輸出級[OUT4]電壓振幅對頻率的特性。
- (3) 模擬設定：

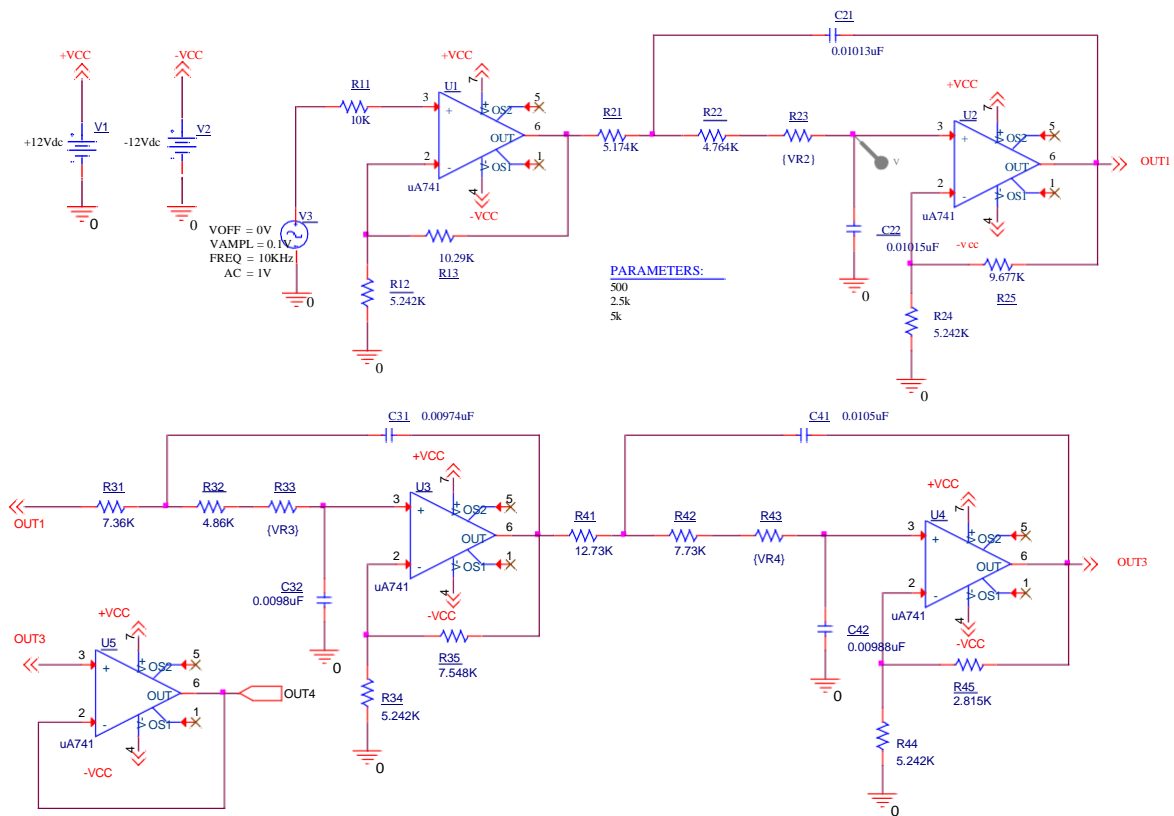


圖3-9 ORCAD 模擬電路(五)

(4) 結果與分析：

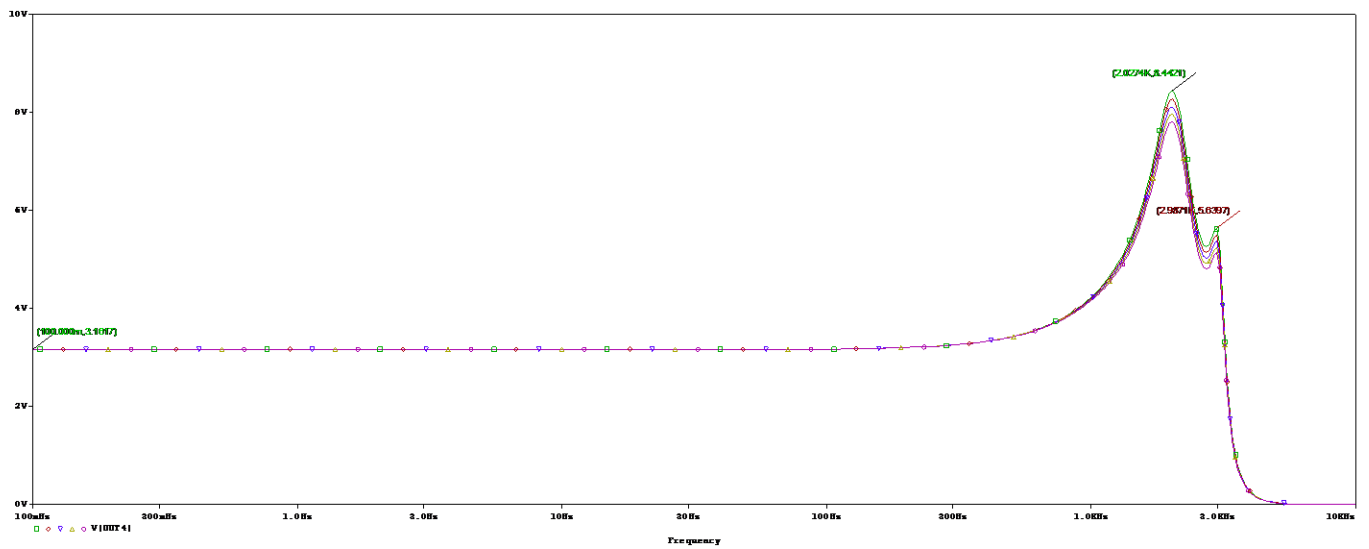


圖3-10 ORCAD 模擬電路結果圖(四)

3.5.2 時域分析方波輸入模擬分析

3.5.2.1 實驗模擬項目(一)：

- (1) 模擬目的：低通濾波器輸入方波之特性(輸入脈波)。
- (2) 模擬說明：Time-Domain 分析，輸出節點為[OUT4]，並使用 FFT 轉換，需標示出各諧波分量頻率值，印出 50Hz 時域及頻譜功能之結果。
- (3) 模擬設定：

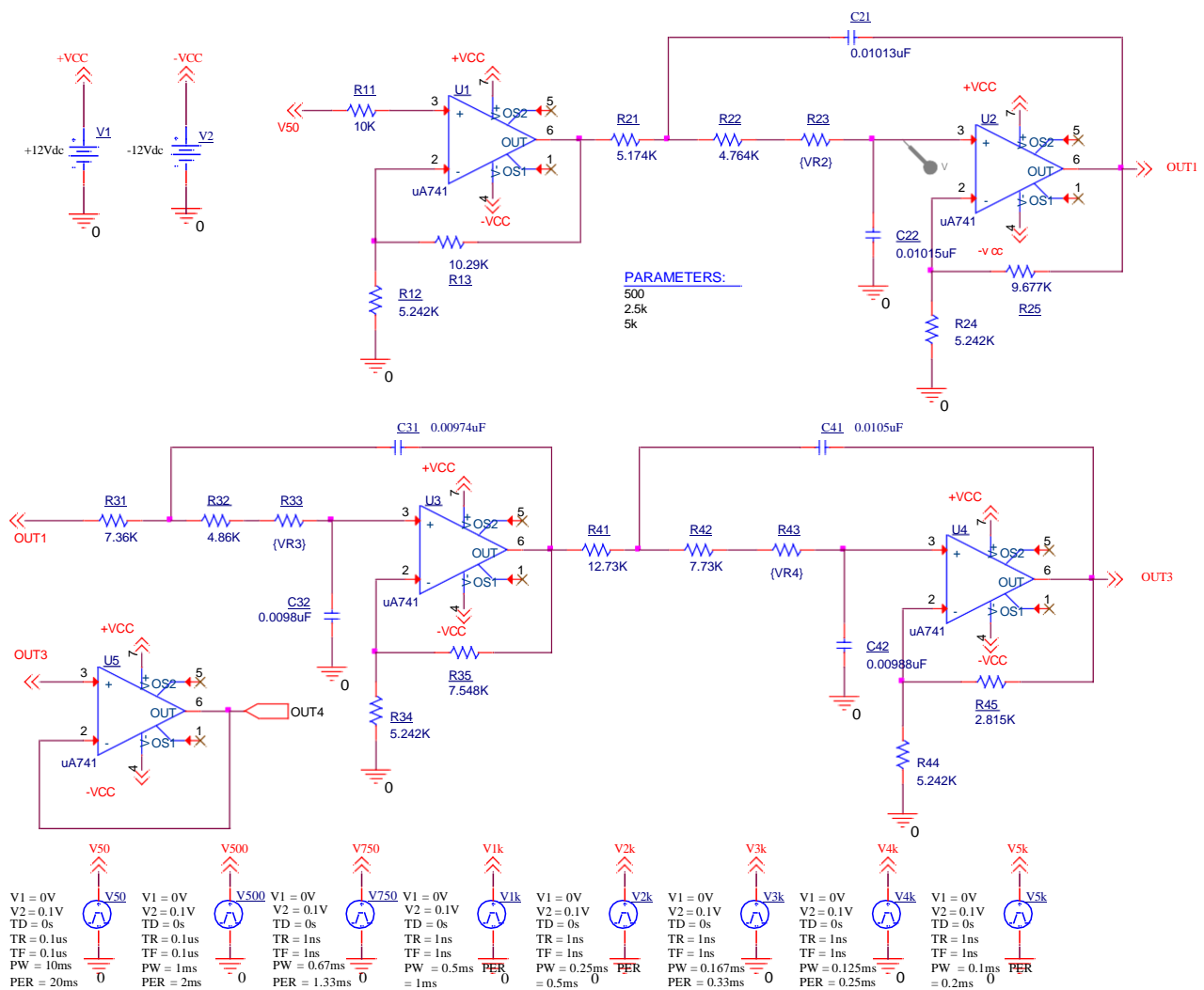


圖3-11 ORCAD 模擬電路(六)

(4) 結果與分析：

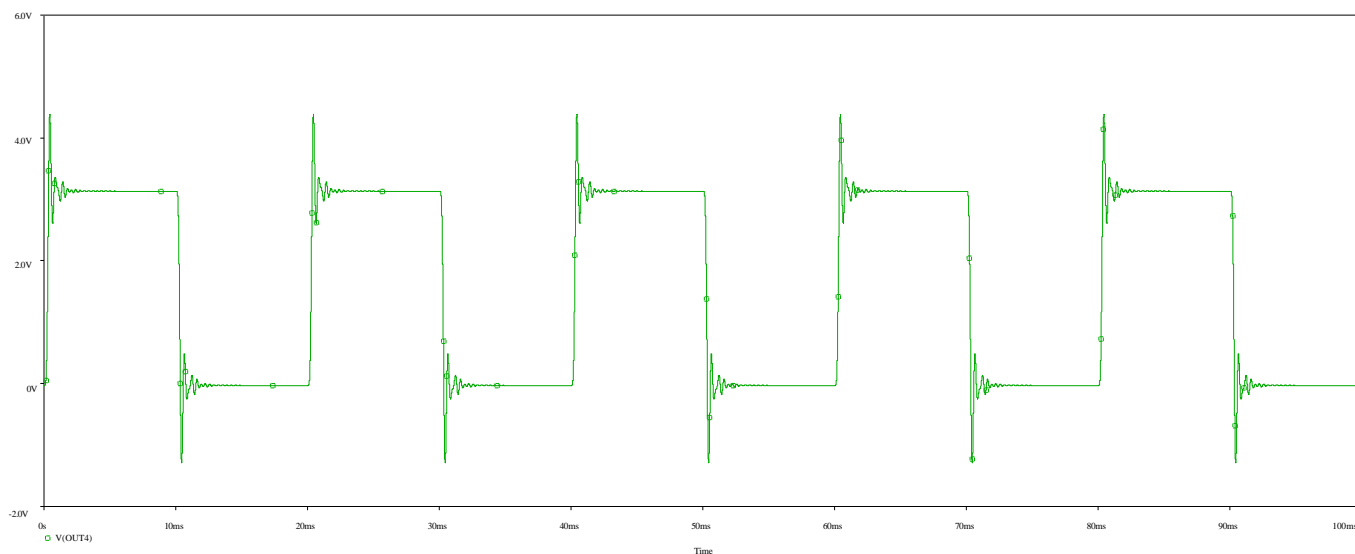


圖3-12 ORCAD 模擬電路結果圖(五)

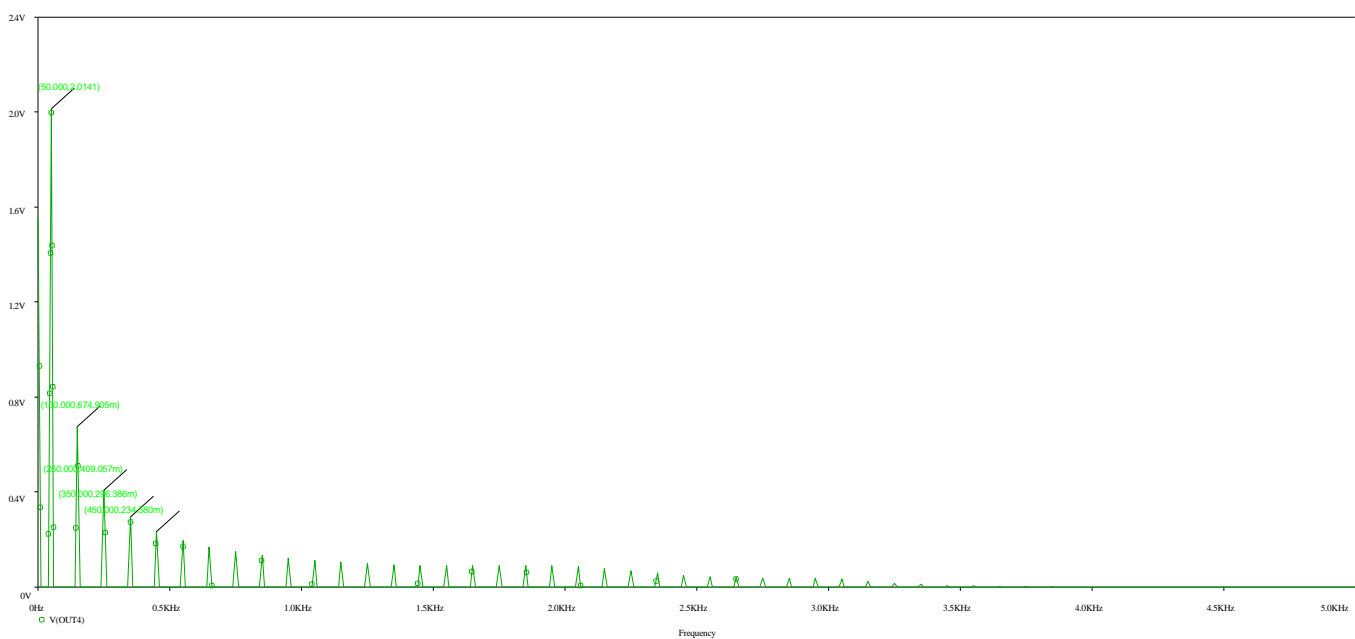


圖3-13 ORCAD 模擬電路結果圖(六)

3.5.2.2 實驗模擬項目(二)：

- (1) 模擬目的：低通濾波器輸入方波之特性(輸入脈波)。
- (2) 模擬說明：Time-Domain 分析，輸出節點為[OUT4]，並使用 FFT 轉換，需標示出各諧波分量頻率值，印出 500Hz 時域及頻譜功能之結果。
- (3) 模擬設定：

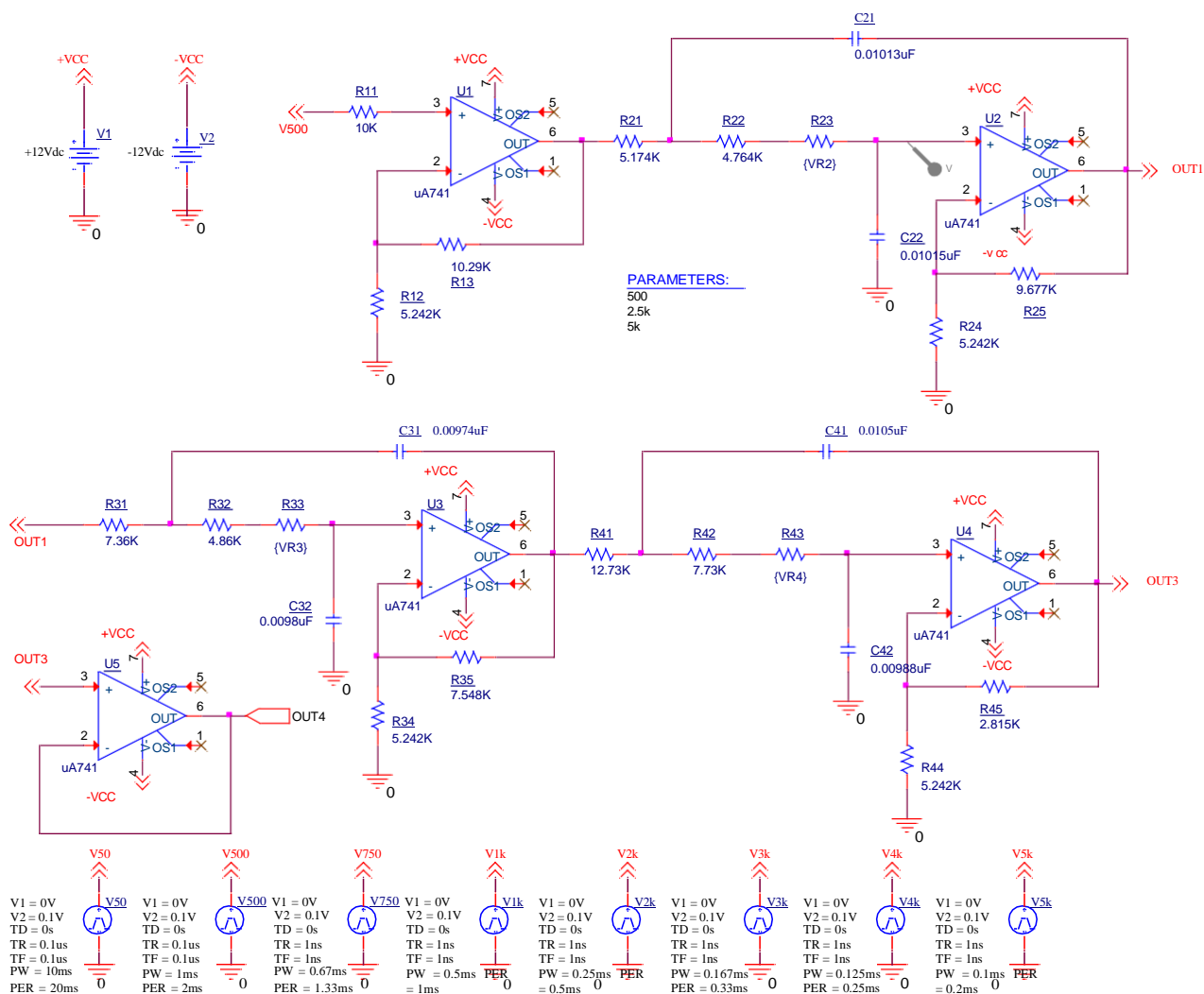


圖3-14 ORCAD 模擬電路(七)

(4) 結果與分析：

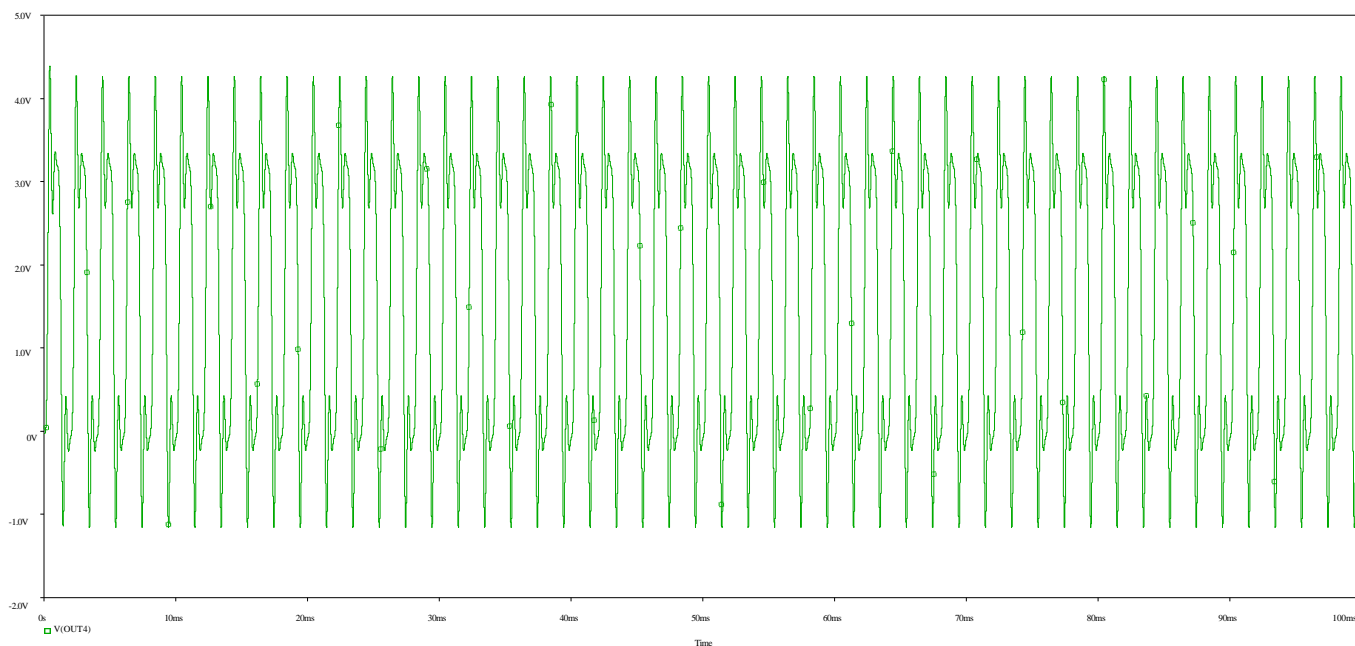


圖3-15 ORCAD 模擬電路結果圖(七)

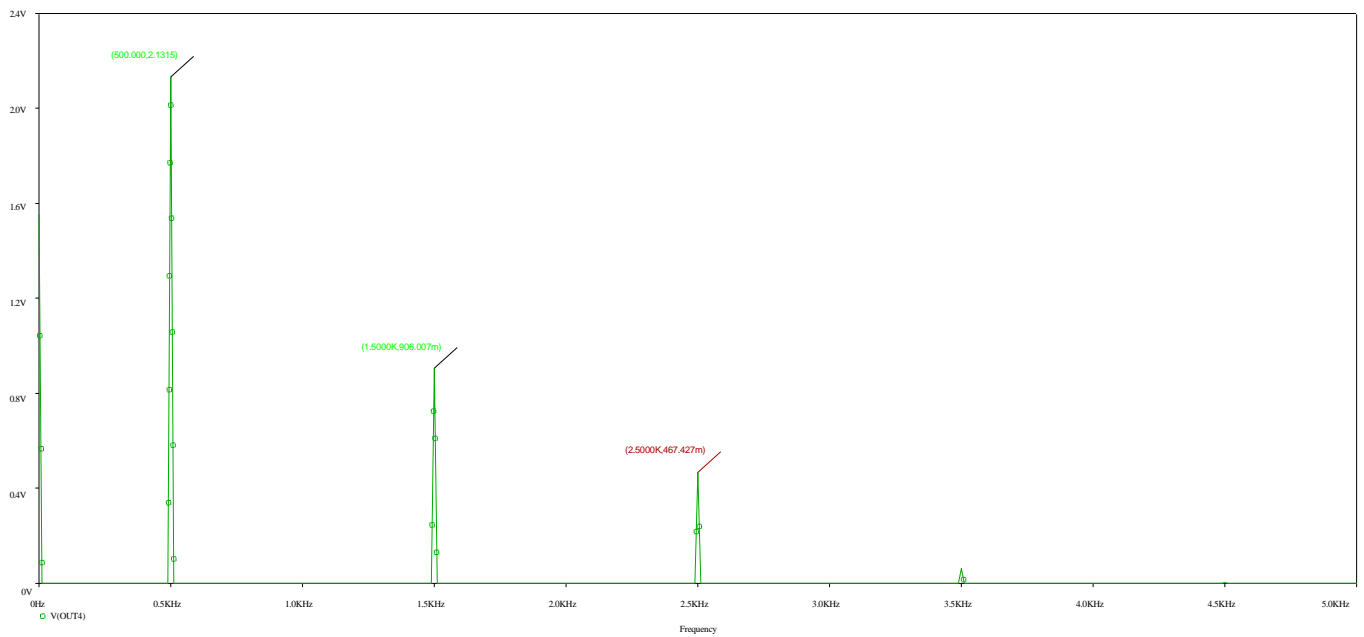


圖3-16 ORCAD 模擬電路結果圖(八)

3.5.2.3 實驗模擬項目(三)：

- (1) 模擬目的：低通濾波器輸入方波之特性(輸入脈波)。
- (2) 模擬說明：Time-Domain 分析，輸出節點為[OUT4]，並使用 FFT 轉換，需標示出各諧波分量頻率值，印出 750Hz 時域及頻譜功能之結果。
- (3) 模擬設定：



圖3-18 ORCAD 模擬電路結果圖(九)

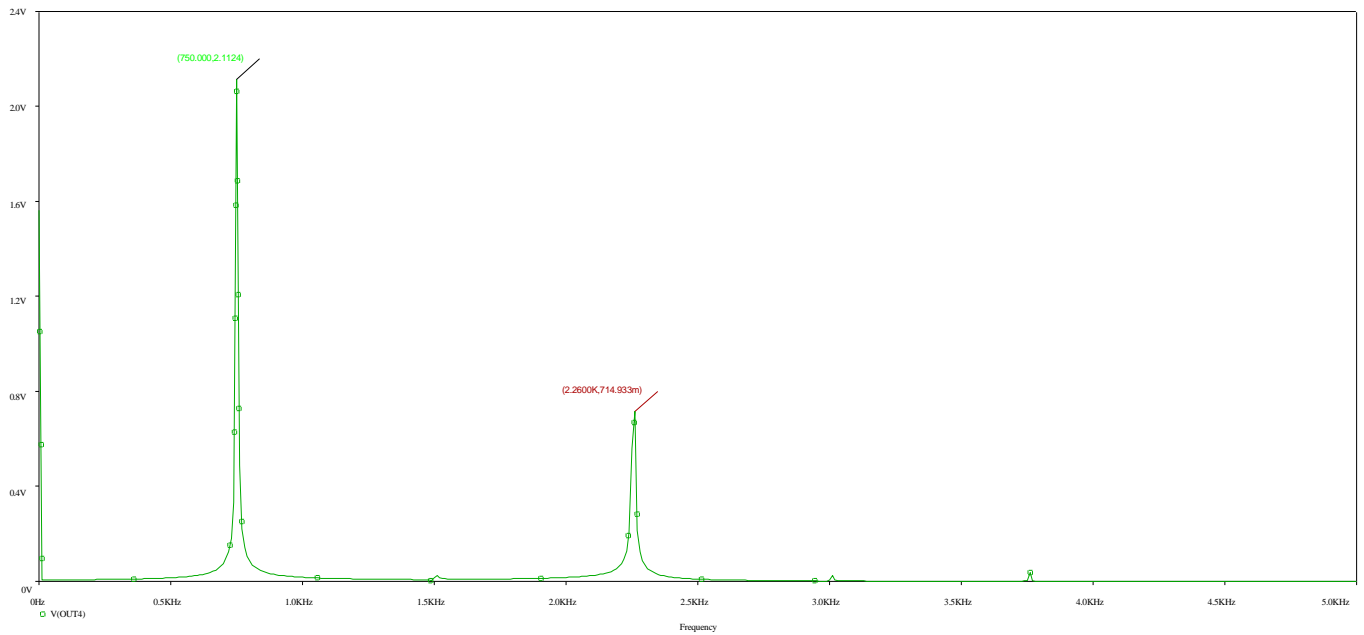


圖3-19 ORCAD 模擬電路結果圖(十)

3.5.2.4 實驗模擬項目(四)：

- (1) 模擬目的：低通濾波器輸入方波之特性(輸入脈波)。
- (2) 模擬說明：Time-Domain 分析，輸出節點為[OUT4]，並使用 FFT 轉換，需標示出各諧波分量頻率值，印出 1KHz 時域及頻譜功能之結果。
- (3) 模擬設定：

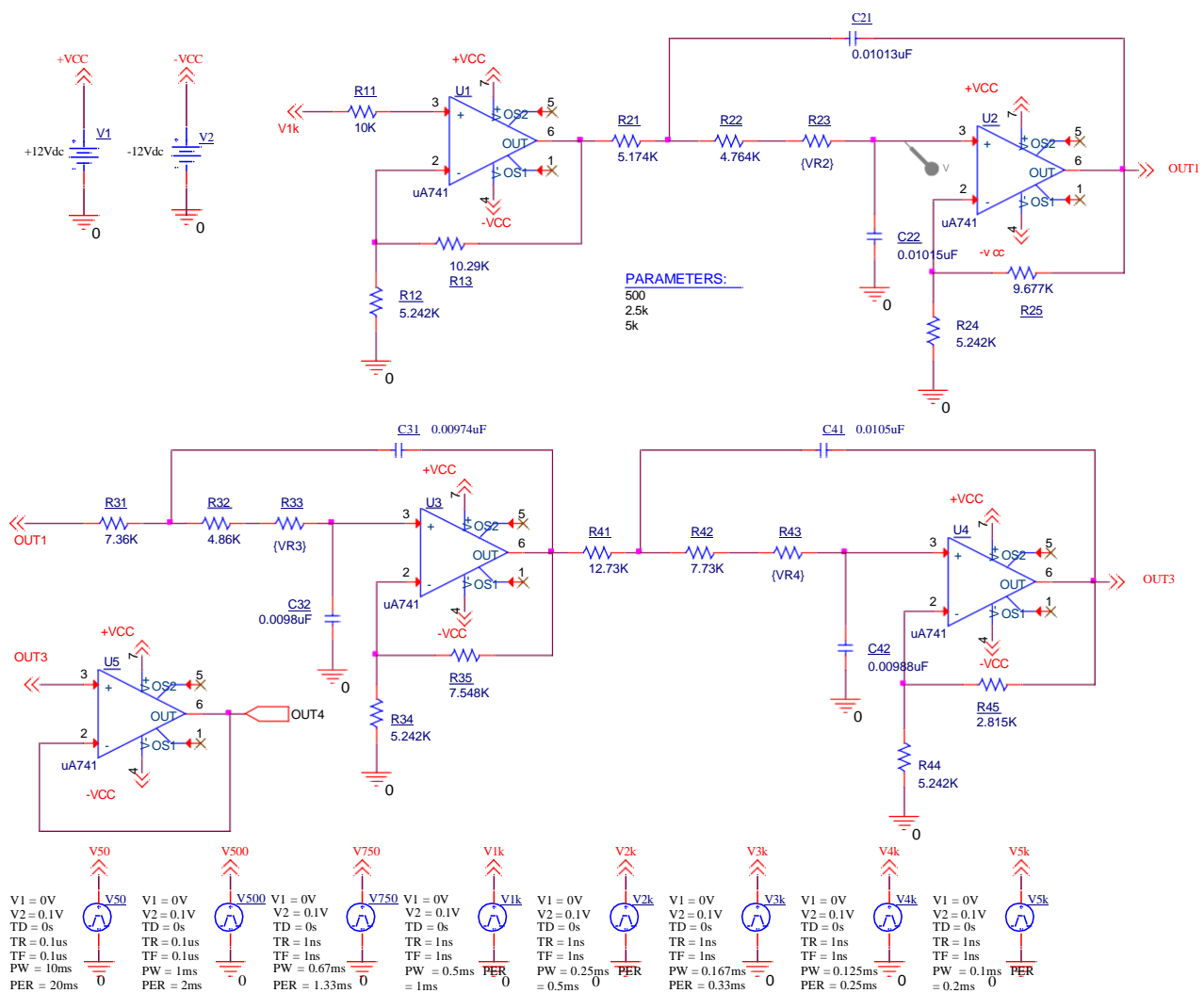


圖3-20 ORCAD 模擬電路(九)

(4) 結果與分析：

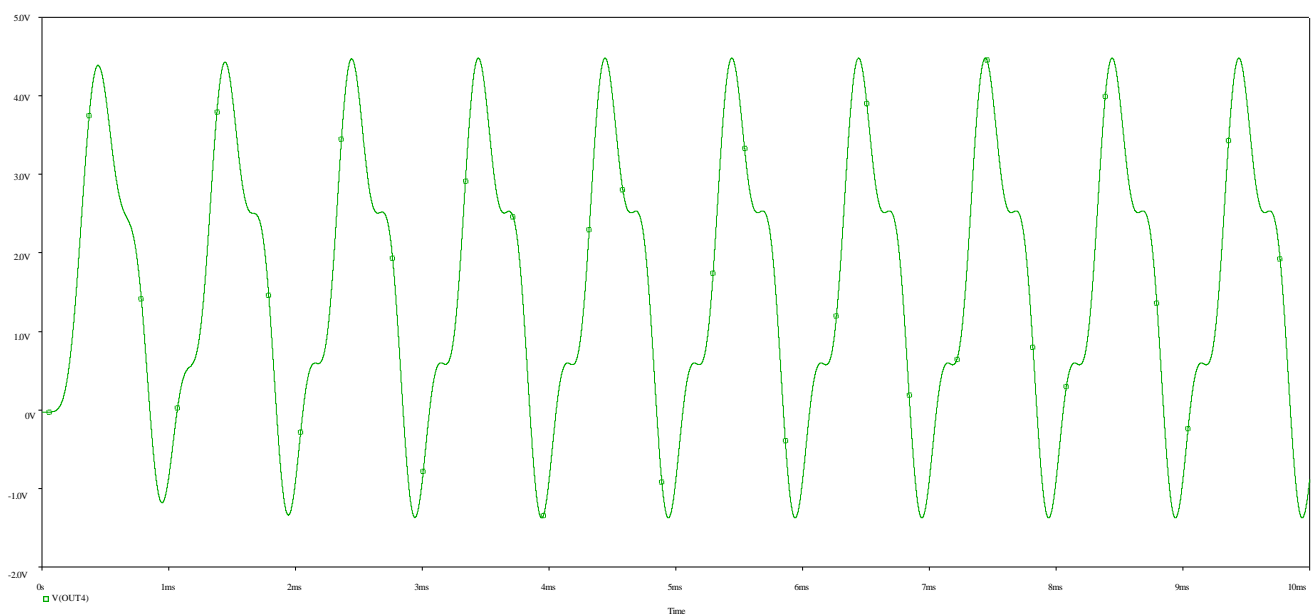


圖3-21 ORCAD 模擬電路結果圖(十一)

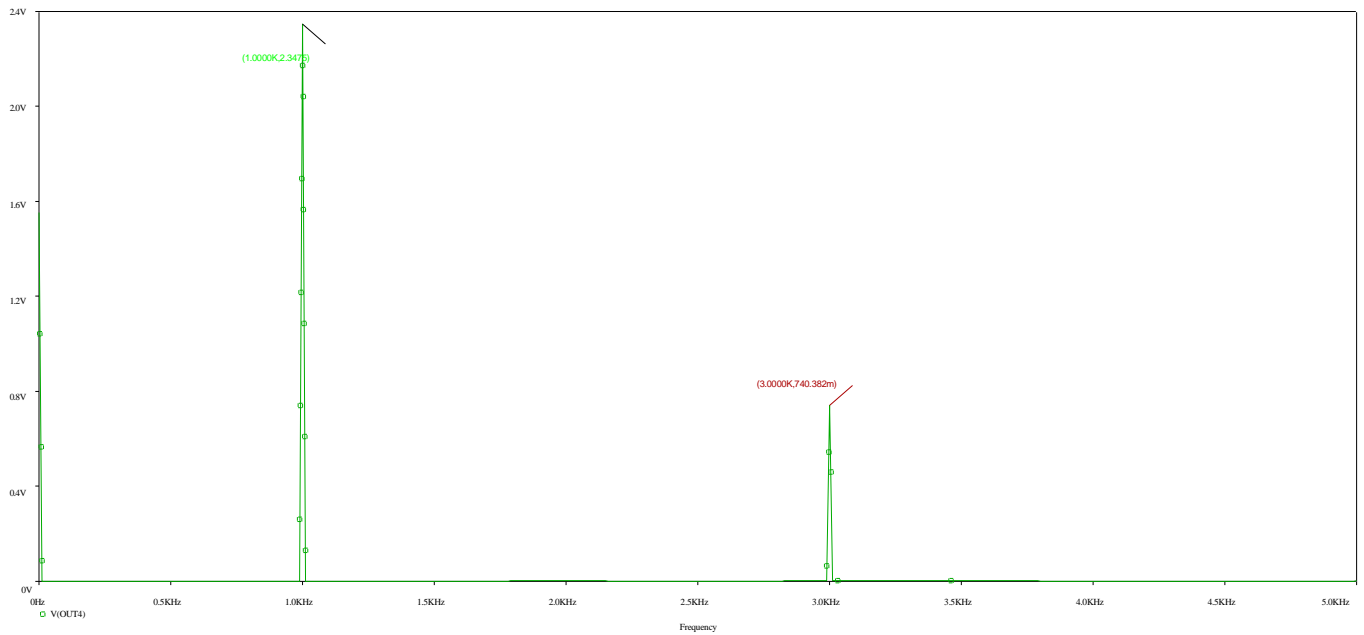


圖3-22 ORCAD 模擬電路結果圖(十二)

3.5.2.5 實驗模擬項目(五)：

- (1) 模擬目的：低通濾波器輸入方波之特性(輸入脈波)。
- (2) 模擬說明：Time-Domain 分析，輸出節點為[OUT4]，並使用 FFT 轉換，需標示出各諧波分量頻率值，印出 2KHz 時域及頻譜功能之結果。
- (3) 模擬設定：



圖3-24 ORCAD 模擬電路結果圖(十三)

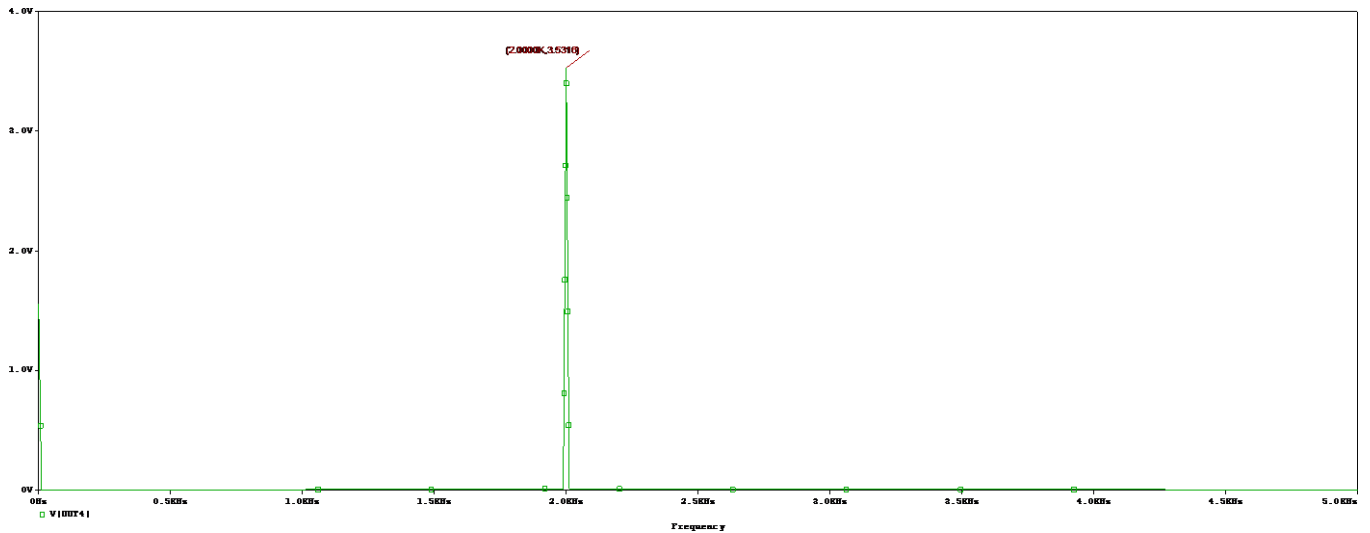


圖3-25 ORCAD 模擬電路結果圖(十四)

3.5.2.6 實驗模擬項目(六)：

- (1) 模擬目的：低通濾波器輸入方波之特性(輸入脈波)。
- (2) 模擬說明：Time-Domain 分析，輸出節點為[OUT4]，並使用 FFT 轉換，需標示出各諧波分量頻率值，印出 3KHz 時域及頻譜功能之結果。
- (3) 模擬設定：

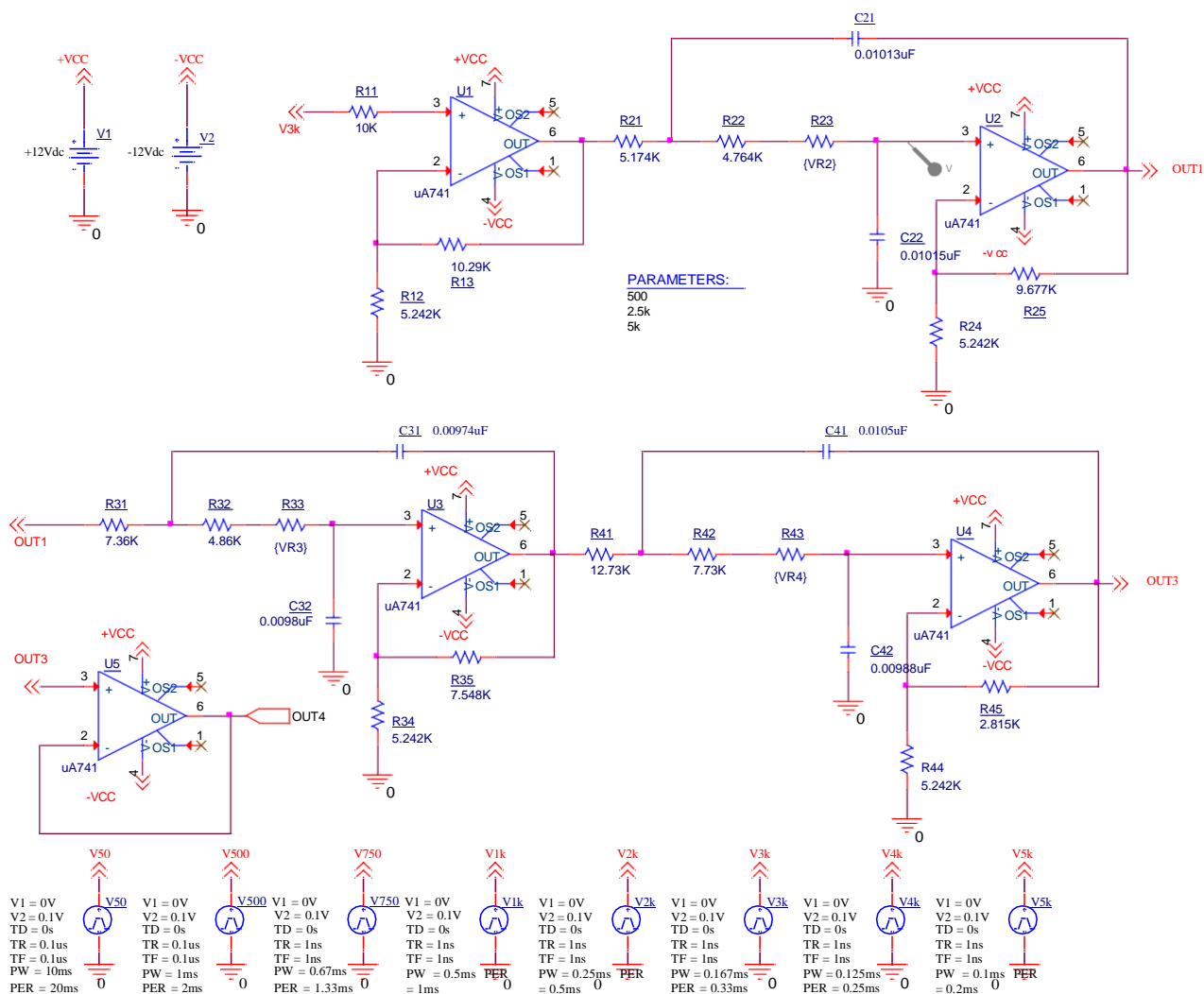


圖3-26 ORCAD 模擬電路(十一)

(4) 結果與分析：

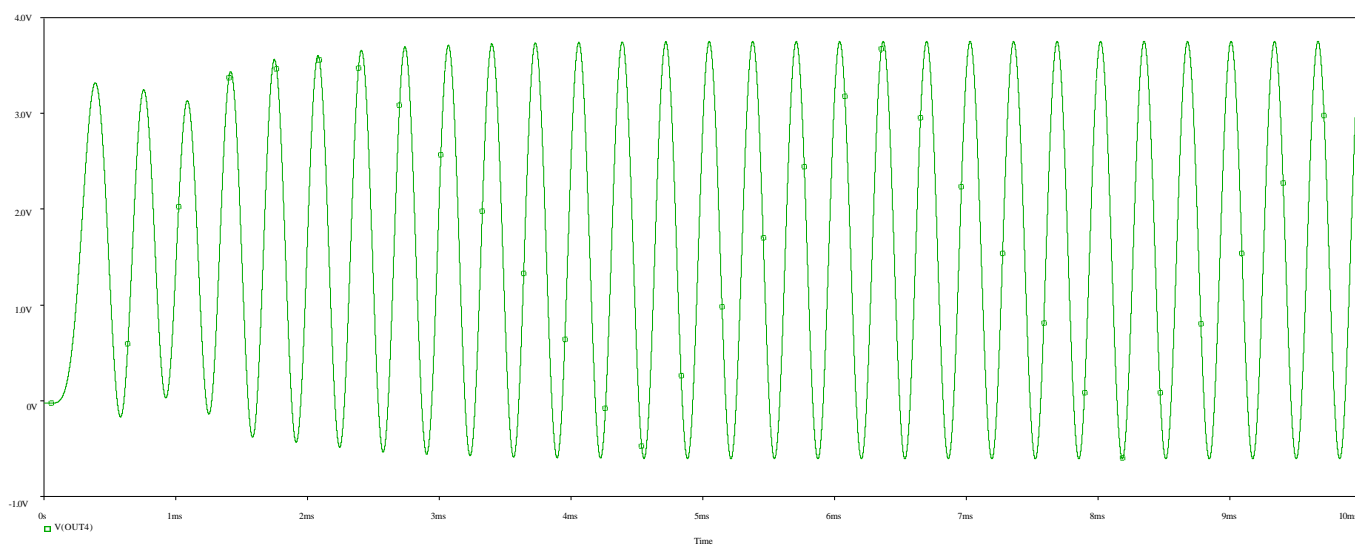


圖3-27 ORCAD 模擬電路結果圖(十五)

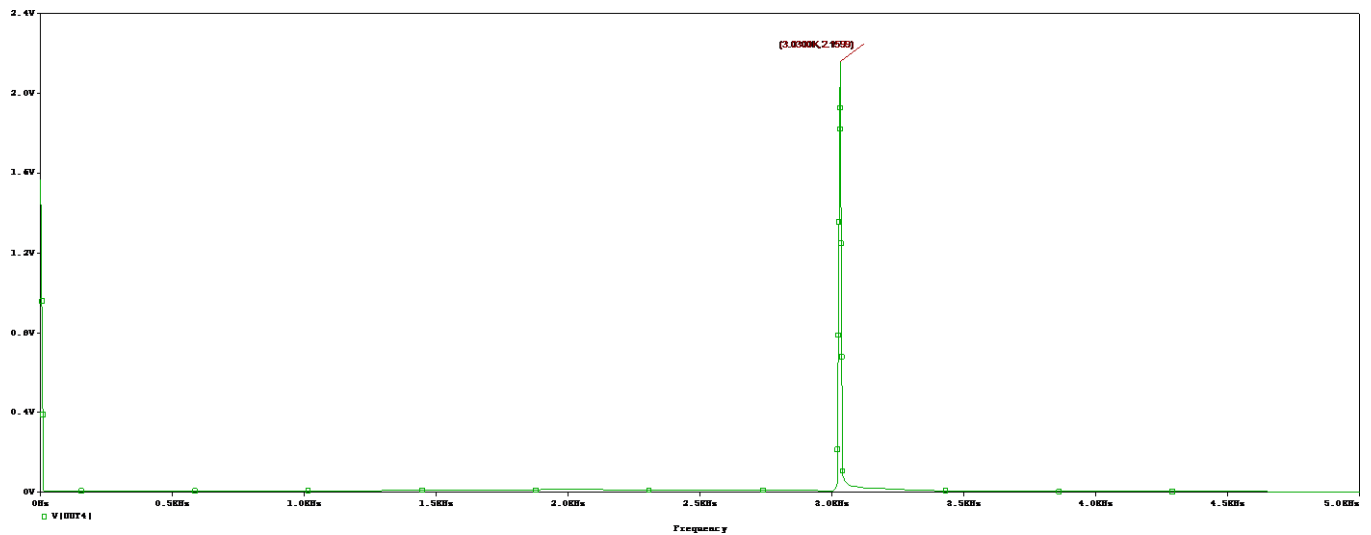


圖3-28 ORCAD 模擬電路結果圖(十六)

3.5.2.7 實驗模擬項目(七)：

- (1) 模擬目的：低通濾波器輸入方波之特性(輸入脈波)。
- (2) 模擬說明：Time-Domain 分析，輸出節點為[OUT4]，並使用 FFT 轉換，需標示出各諧波分量頻率值，印出 4KHz 時域及頻譜功能之結果。
- (3) 模擬設定：

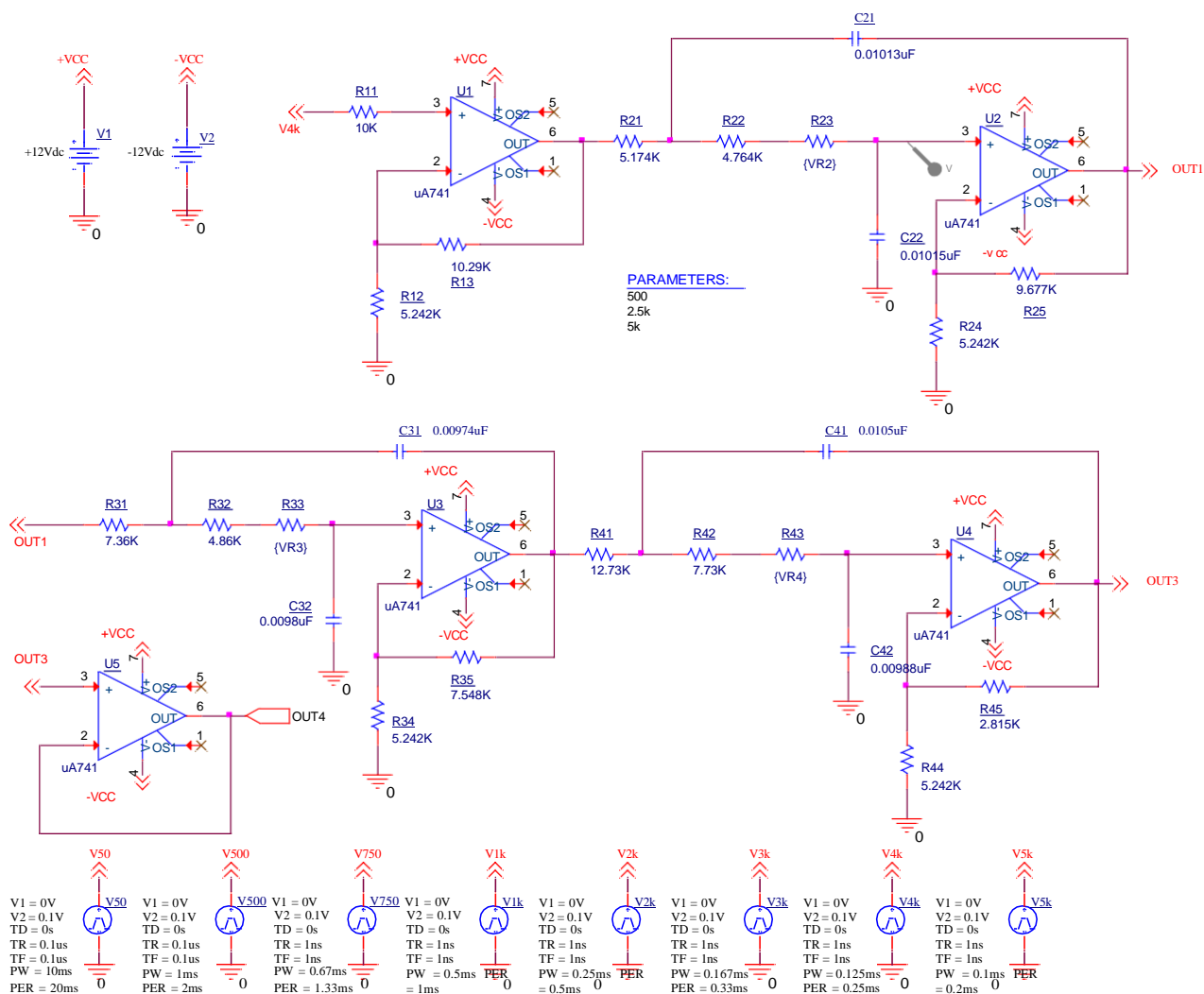


圖3-29 ORCAD 模擬電路(十二)

(4) 結果與分析：

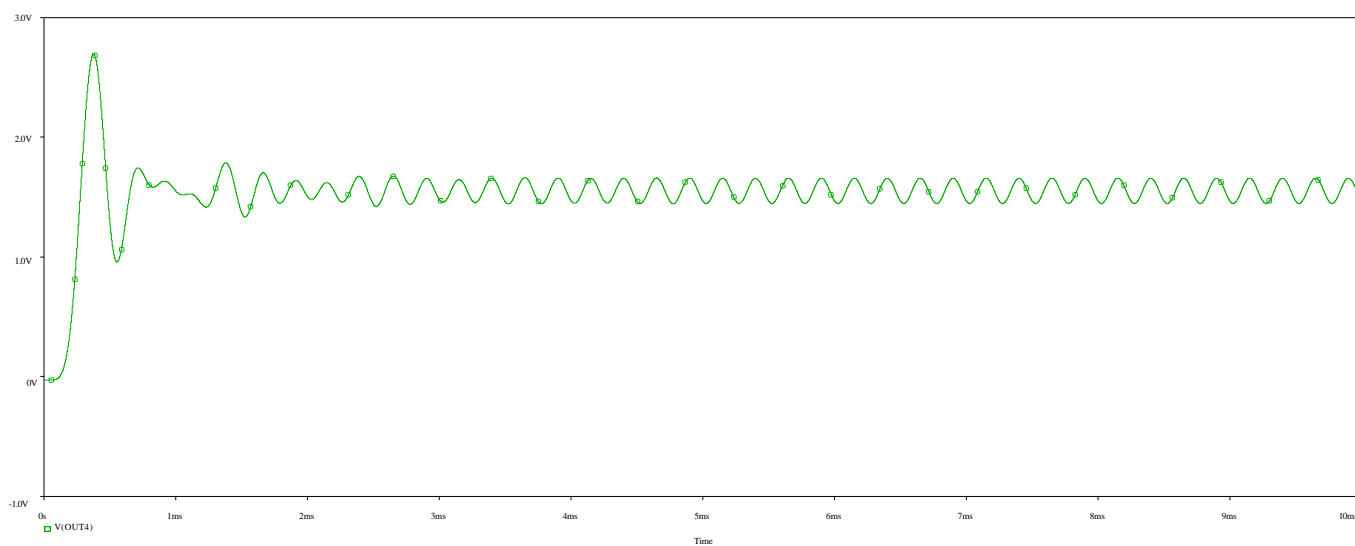


圖3-30 ORCAD 模擬電路結果圖(十七)

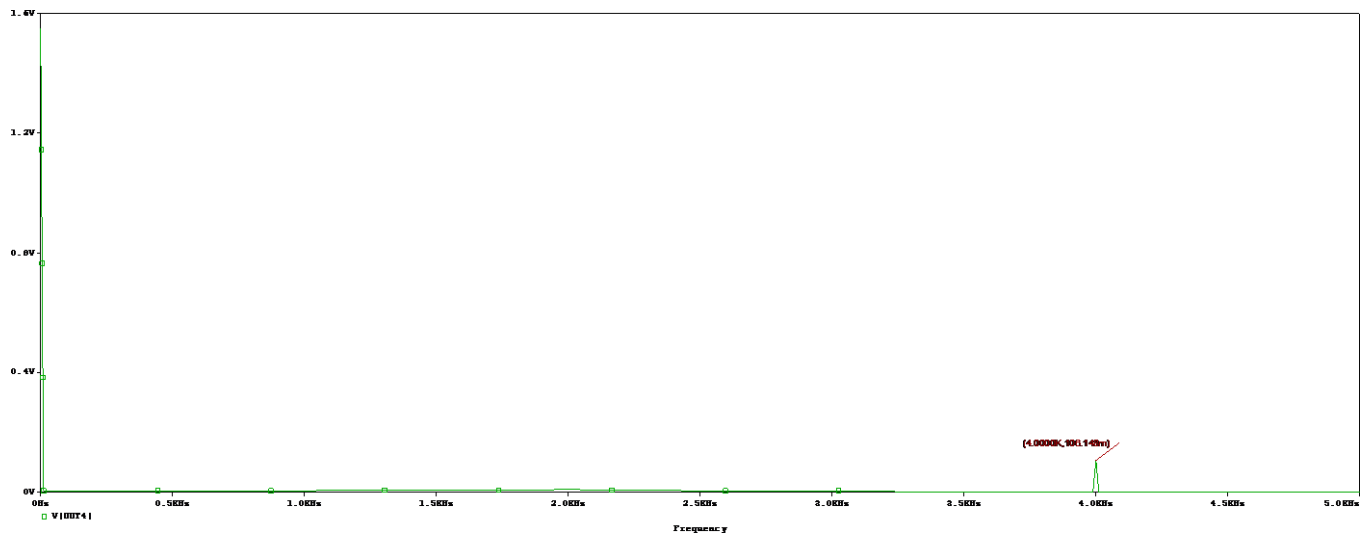


圖3-31 ORCAD 模擬電路結果圖(十八)

3.5.2.8 實驗模擬項目(八)：

- (1) 模擬目的：低通濾波器輸入方波之特性(輸入脈波)。
- (2) 模擬說明：Time-Domain 分析，輸出節點為[OUT4]，並使用 FFT 轉換，需標示出各諧波分量頻率值，印出 5KHz 時域及頻譜功能之結果。
- (3) 模擬設定：

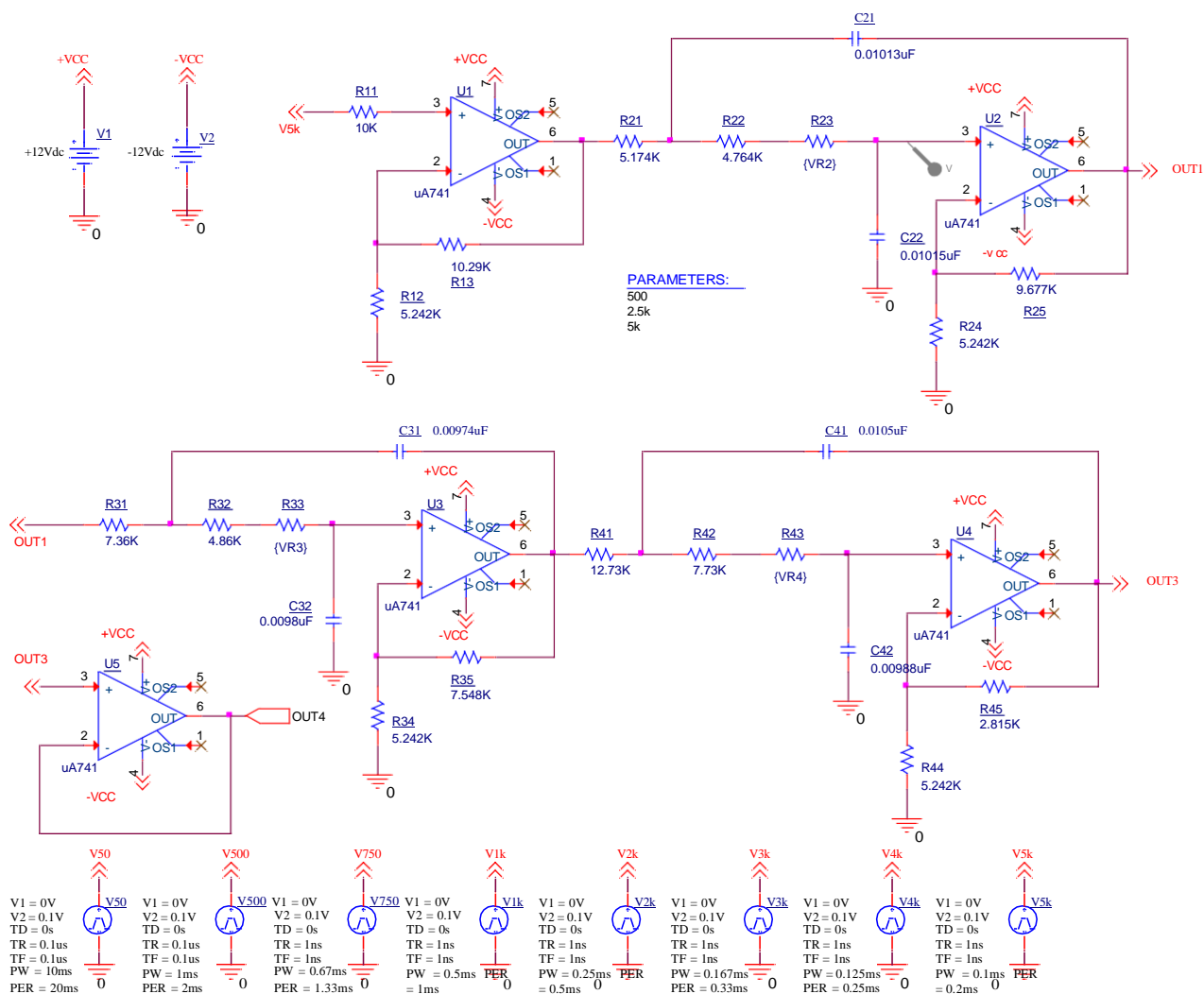


圖3-32 ORCAD 模擬電路(十三)

(4) 結果與分析：

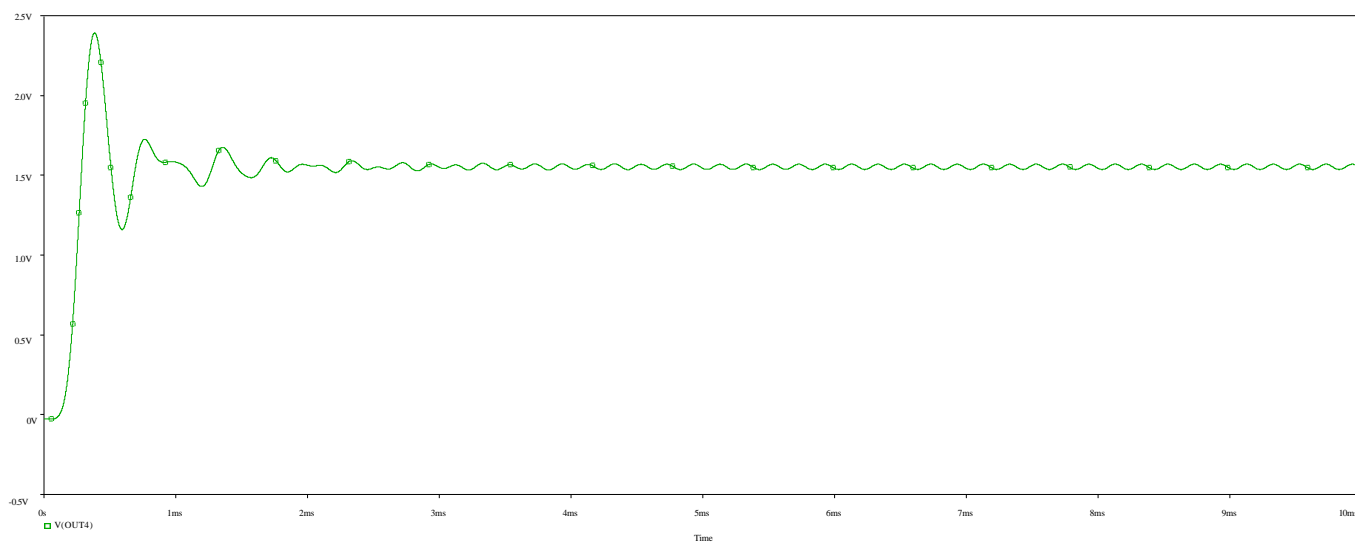


圖3-33 模擬電路結果圖(十九)

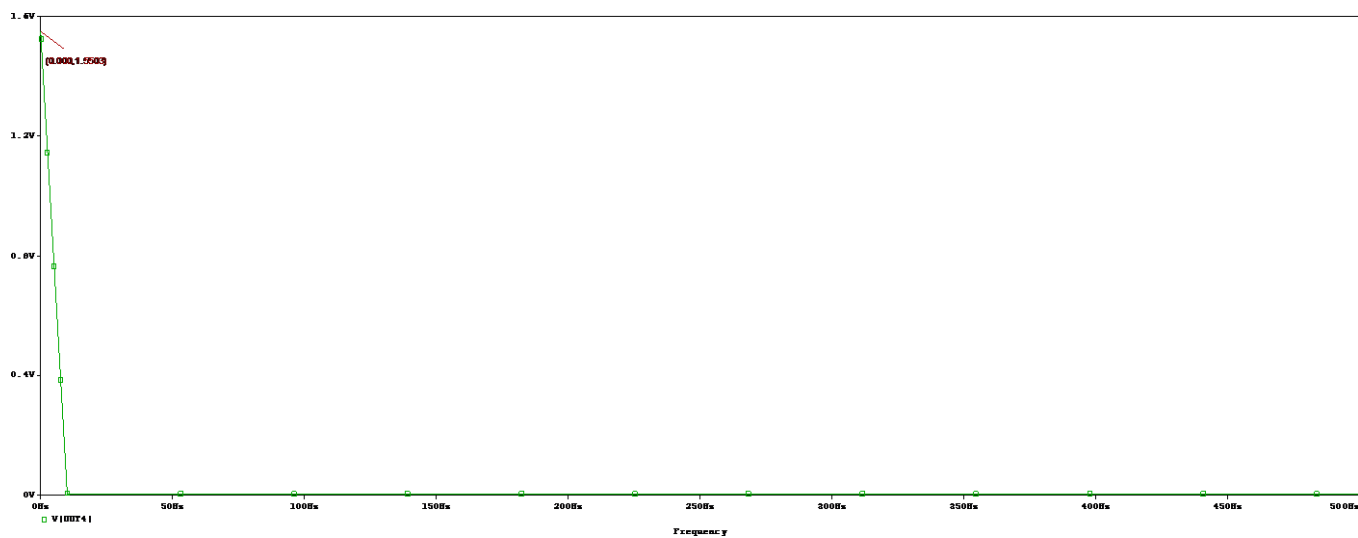


圖3-34 ORCAD 模擬電路結果圖(二十)

第四章 實驗實作結果與分析

本章節將結合第二章節所介紹的演算法及第四章節所介紹的AGC 電路分別以TIMS 模擬及海域實驗等驗證方式，以了解 AGC 電路應用於水下方位估測性能改善問題。

4.1 實驗儀器

4.1.1 訊號產生器

訊號產生器是作為電子量測激勵源的訊號來源。大多數電路要求某種振幅隨時間變化的輸入訊號。訊號可以是真實的雙極 AC 訊號 (峰值在接地參考點上下振盪)，也可以在 DC 偏置 (可正或負) 範圍內變化。他可以是正弦波或其他類比函數、數位脈衝、二進位碼型或純任意波形。訊號產生器可以提供「理想」的波形，他可以在其提供的訊號中增加已知的、數量和類型可重複的失真 (或誤差)。這一特點是訊號產生器最大的特點，因為通常不可能只使用電路本身在所需的時間和地點建立可以預測的失真。在存在這些失真的訊號時，DUT 回應可以揭示其處理落在正常效能條件外的極限情況。

4.1.2 示波器

是一種能夠顯示電壓訊號動態波形的電子測量儀器。它能夠將時變的電壓訊號，轉換為時間域上的曲線，原來不可見的電氣訊號，就此轉換為在二維平面上直觀可見光訊號，因此能夠分析電氣訊號的時域性質。更進階的示波器，甚至能夠對輸入的時間訊號，進行頻譜分析，反映輸入訊號的頻域特性。

4.1.3 實驗儀器配置

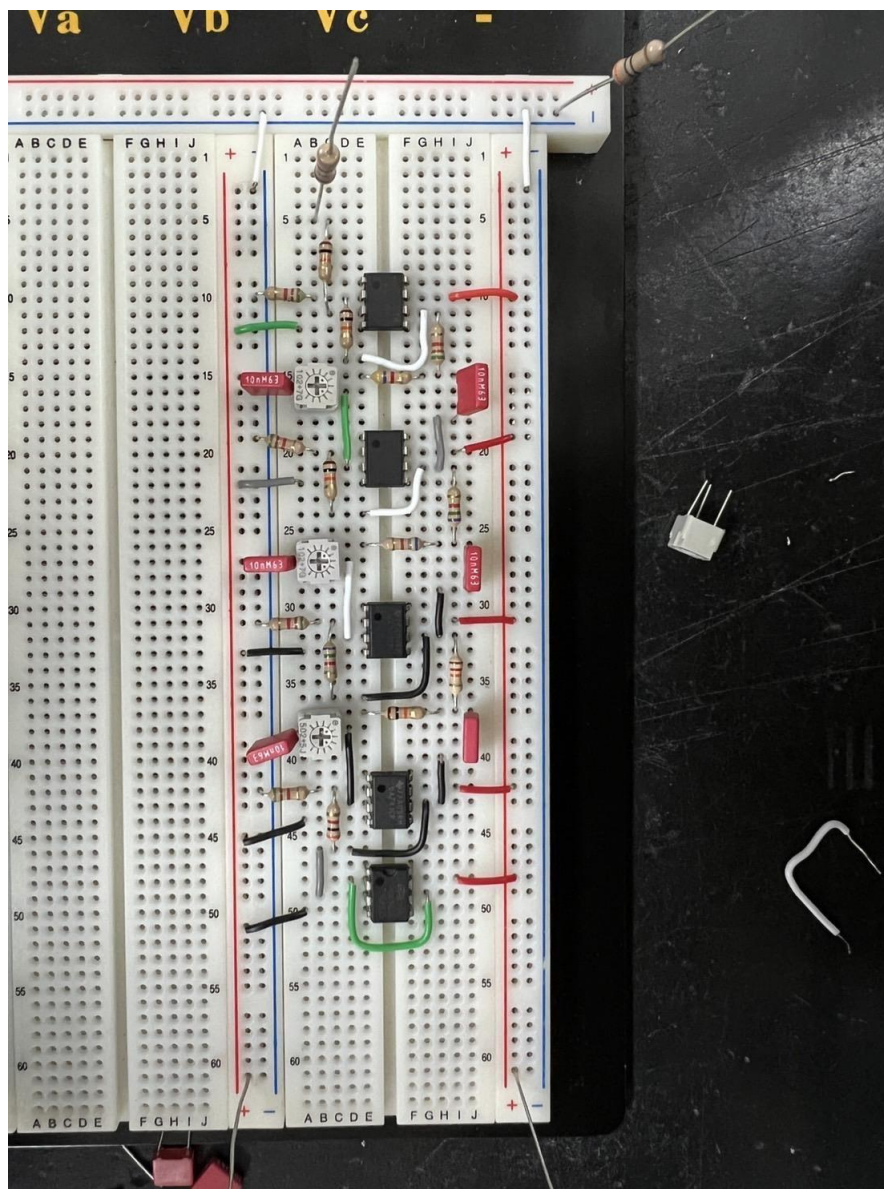


圖4-1 電路板模型

4.2 實驗測試與調整

4.2.1 實驗說明

1. 測試項目[一]:第一級電壓放大級
 - a. 擷取U1 電壓放大率的輸出波型
 - b. 確認U1 級正常電壓放大功能
2. 測試項目[二]:第二級 Sallen & Key L.P.F.Network(一)
 - a.[實驗要求]:改變電阻 VR2 使得CH2 波形變化的情形(即為改變頻率值，弦波訊號經低通濾波器的作用，會由示波器觀測出振幅大小變化情形，其中在某一頻率值時會有最大

振幅出現)，能接近前面 ORCAD 模擬輸出節點[OUT1]的結果，指在頻率值=2.95KHz 時有最大輸出振幅。若過度調整可變電阻 VR2，會產生振盪現象，應避免振盪現象產生。3.

測試項目[三]:第三級 Sallen & Key L.P.F.Network(二)

a.[實驗要求]: 改變可變電阻 VR3，使得 CH2 波形變化的情形(即為改變頻率值，弦波訊號經低通濾波器的作用，會由示波器觀測出振幅大小變化情形，其中在某一頻率值時會有最大振幅出現)，能接近前面 ORCAD 模擬輸出節點[OUT2]的結果，指在頻率值=2.95KHz 時有最大輸出振幅。

4. 測試項目[四]: 第四級 Sallen & Key L.P.F.Network(三)及第五級 Buffer & AMP

a.[實驗要求]:改變可變電阻 VR4，先觀測 TP4 波形振幅變化情形，觀測出此電阻對電路的影響。

5. 測試項目[五]:實驗微調整與實驗規格

a. 為在頻帶內波幅不致於變化太大,故要求 3KHz 內平坦度問題。示波器 CH2 連接 OUT 節點，再次微調可變電阻 VR1、VR2、VR3、VR4，使得輸出振幅能有較好的平坦度。

b. 所謂平坦度：指改變訊號產生器的頻率變化，由示波器所觀測的波形變化情形，依實驗規格在[2Hz~3KHz]頻帶內輸出振幅變化需維持在容許的誤差範圍內。

c. 最後應合乎實驗規格之要求:[增益、平坦度、 $f_c=3\text{KHz}$ 、ripple]

4.2.2 實驗設定

1.輸入訊號 = 3KHz

4.2.3 實驗結果

表4-1 記錄濾波器輸出振幅

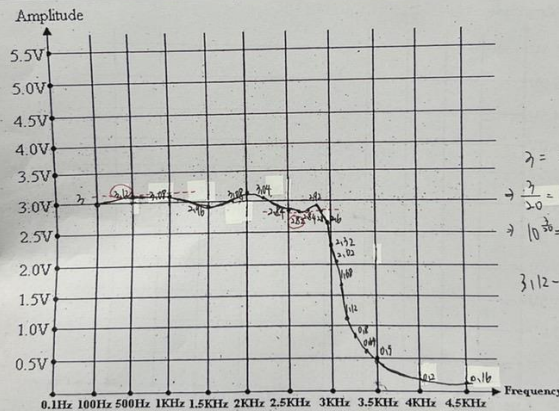
頻率	振幅	頻率	振幅	頻率	振幅
100Hz	3.00V	2.6KHz	2.82V	3.1KHz	1.68V
500Hz	3.12V	2.7 KHz	2.84V	3.2KHz	1.12V
1KHz	3.08V	2.8 KHz	2.92V	3.3KHz	0.8V
1.5KHz	2.96V	2.9KHz	2.8V	3.4KHz	0.64V
2KHz	3.08V	2.95KHz	2.6V	3.5KHz	0.5V
2.2KHz	3.04V	3KHz	2.32V	4.0KHz	0.2V
2.5KHz	2.84V	3.05KHz	2.02V	4.5KHz	0.16V

低通濾波器檢查記錄單

實驗單元：濾波器電路 班別：☒3A、☐3B、組別：19、姓名：吳福祿
 檢查人員：謝維傑、電路檢查日期：111年12月19日 評少環

■濾波器輸出振幅記錄—畫出 4.5KHz 頻帶內振幅之變化情形。

頻率	振幅	頻率	振幅	頻率	振幅
100Hz	3.00V	2.6KHz	2.82V	3.1KHz	1.68V
500Hz	2.12V	2.7KHz	2.84V	3.2KHz	1.12V
1KHz	2.08V	2.8KHz	2.92V	3.3KHz	0.8V
1.5KHz	2.96V	2.9KHz	2.8V	3.4KHz	0.64V
2KHz	2.08V	2.95KHz	2.6V	3.5KHz	0.5V
2.2KHz	2.04V	3KHz	2.72V	4.0KHz	0.2V
2.5KHz	2.84V	3.05KHz	2.02V	4.5KHz	0.16V



■繪製頻率響應圖

a.輸出圖表：☐內容 OK、☐未附上圖表、☐其他。

b.記錄： $(f_L) = 7.1$ KHz， $(f_H) = 2.9$ KHz。

c.通帶電壓增益 = $2V / 0.0014V(V/V) = 1428.57$ dB。

■方波測試，實驗波形之擷取：

a.測量功能選項：☐內容 OK、☐測量不完整（時間週期或頻率）、☐探棒錯誤、☐其他。

■麵包板配線：

1.元件排列方式—☐平面，整齊、☐腳線未剪除架高、☐跨接在元件上面、☐元件配置凌亂。

2.接線、配線情形—☐整齊及簡潔、☐跨接在元件上面、☐高架接線、☐配線凌亂。

※LPF 電路特性評量：100分

圖4-2 頻帶內測試增益圖

表4-2 頻率響應圖測試記錄

輸入頻率 (Hz)	輸入振幅 約0.1V	記錄 輸出振幅(V)	計算增益 (dB)	測量 相位差(θ)
2	0.116V	3V	25.86dB	-11
10	0.118V	3V	25.42 dB	-174
100	0.116	3V	25.86 dB	-18
500	0.112V	3.12V	27.86 dB	-57
1K	0.114V	3.08V	27.02 dB	-116
1.5K	0.110V	2.92V	26.55 dB	-167
2K	0.112V	3.08V	27.5 dB	-18
2.2K	0.112V	3.04V	27.14 dB	113
2.5K	0.110V	2.8V	25.45 dB	-86
2.6K	0.110V	2.76V	25.09 dB	45
2.7K	0.116V	2.76V	23.79 dB	28
2.8K	0.110V	2.8V	25.45 dB	23
2.9K	0.114V	2.72V	23.86 dB	-11
3K	0.112V	2.28V	20.36 dB	-41
3.1K	0.110V	1.68V	15.27 dB	-62
3.5K	0.114V	0.44V	3.86 dB	-99
4K	0.110V	0.14V	1.27 dB	-120
5K	0.110V	0.056V	0.51 dB	162
7K	0.110V	0.08V	0.73 dB	-155
9K	0.110V	0.04V	0.36 dB	-132

ㄇ. 畫出 $Gain(dB)$ vs. 頻率輸出

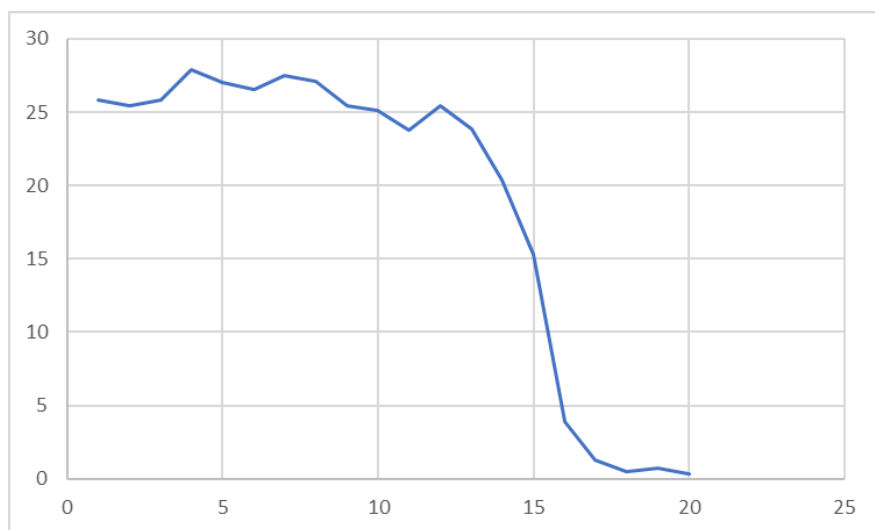


圖 4-3 頻率對增益圖

2. 畫出 $Phase(dB)$ vs. 頻率輸出圖：

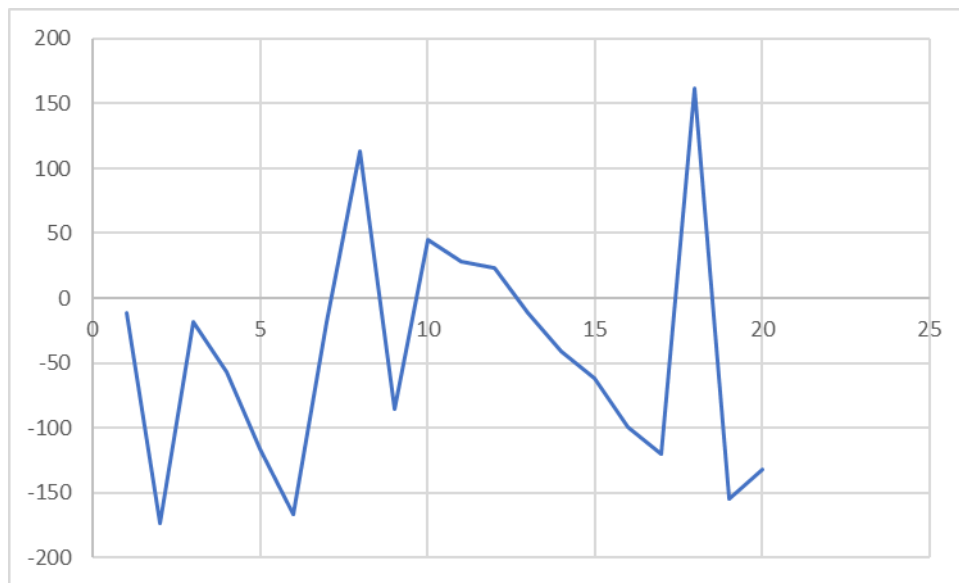


圖 4-4 頻率對相位圖

a. 0Hz.

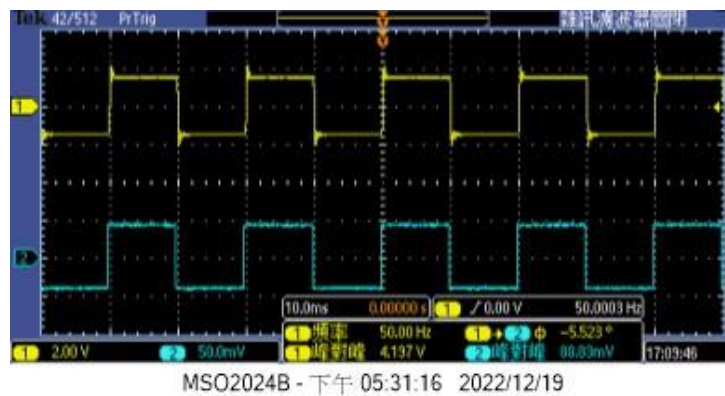


圖 4-5 實作頻率波型結果圖(一)

b. 0Hz.

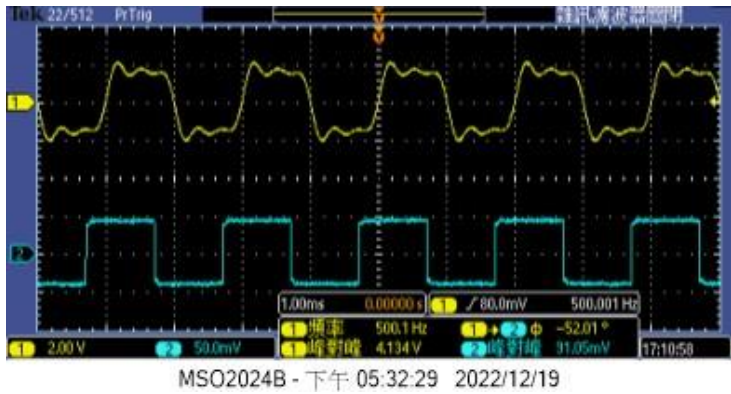


圖 4-6 實作頻率波型結果圖(二)

c. 0Hz.

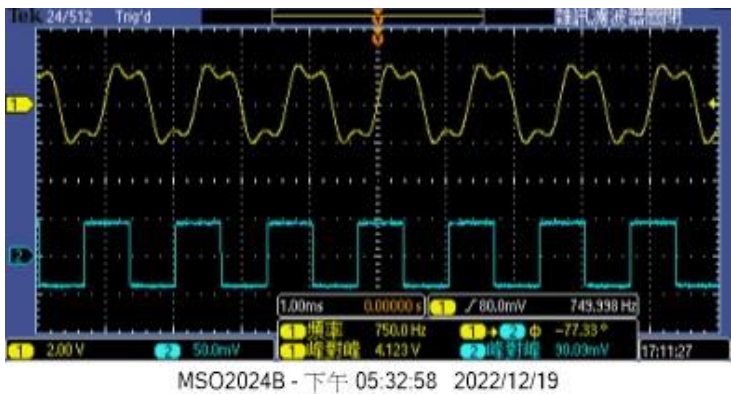


圖 4-7 實作頻率波型結果圖(三)

d.1KHz.

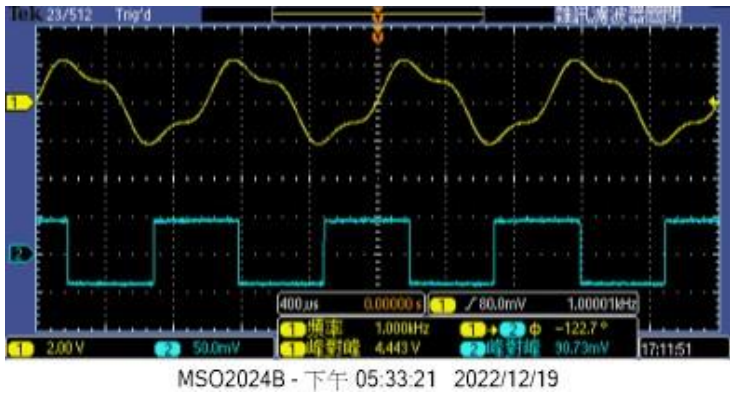


圖 4-8 實作頻率波型結果圖(四)

e.2KHz.

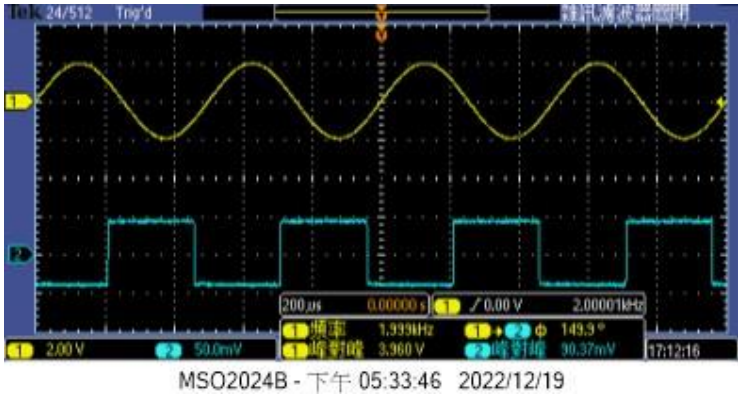


圖 4-9 實作頻率波型結果圖(五)

f.3KHz.

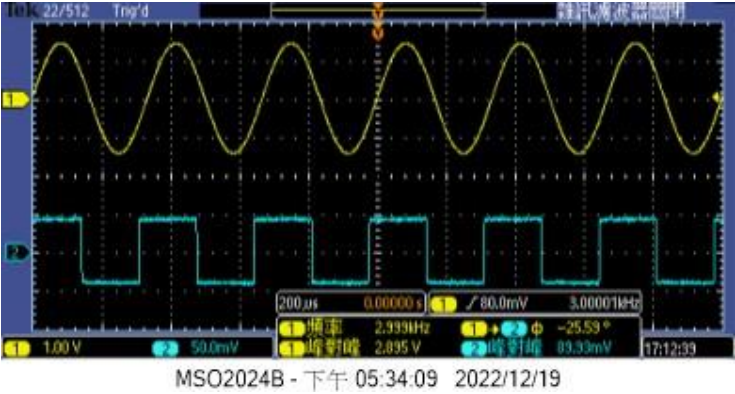


圖 4-10 實作頻率波型結果圖(六)

g.4KHz.

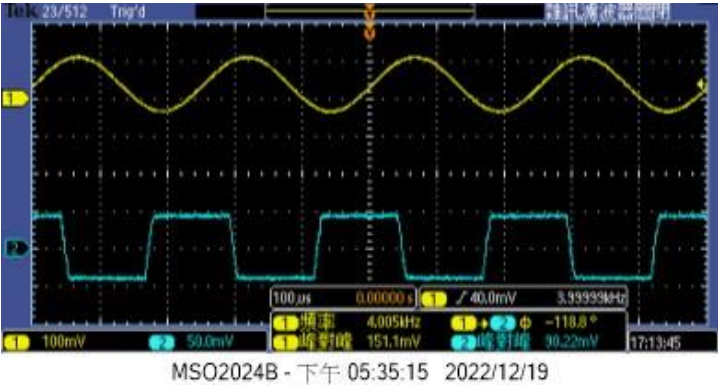


圖 4-11 實作頻率波型結果圖(七)

h.5KHz.

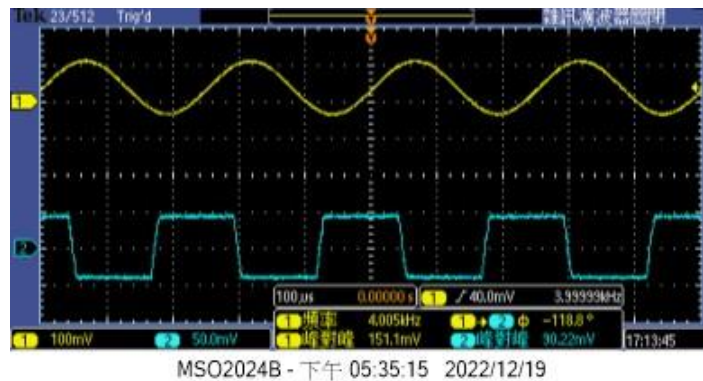


圖 4-12 實作頻率波型結果圖(八)

4.3 實驗綜合討論與分析

這次低通濾波器實驗及研究成果可以得出，在整體濾波器模擬與實作上的一些結論及小問題，尤其是透過可變電阻對頻率增高或壓低進行影響，是整體實驗過程當中相當重要的一環，不可疏忽。我們在模擬項目(一)中，當選用值越小，波峰會越陡峭，且波型只會有一個高點，但當把選用值直接選到 $5K\Omega$ ，我們可以看到，波型反而沒那麼陡，且出現了兩個高峰。而在模擬項目(二)裡，因為 $0.1V$ 的輸入下，而波型跟項目一的二和三很相像。最後的模擬項目(三)，我們可以看出，當輸入頻率越低，輸出波型會是越完美的方波，一但把輸入頻率調高，會逐漸從原本的方波變成正弦波，但到了一定的值，一樣會形成完美正弦波。在實作上因為上電阻的選用不同，輸出波型的高低會不一樣，在調整可變電阻上，我們可以看出，當把可變電阻條大時，波也會一起變大，反之調小時，波也會跟著變小。在頻率響應圖上，看到當輸入頻率調整至 $3.5K$ ，輸出值會像溜滑梯一樣下墜，但在 $3.5K$ ，前後都是呈現較為平整的狀況。在最後一項實驗裡，跟模擬的一樣，當輸入值越小，波會呈現一個完美方波，但當把值調大，會從原本的方波變成正弦波，但到了一定值，就會出現完美正弦波。

第五章 結論與未來研究方向

5.1 結論

本實驗之低通濾波器不同於以往的設計方式，以往的設計方式係透過針對單一頻率的低通特性。本文將電路串聯元件值以變動頻率之中心偏低頻率為設計基礎，並利用選用電容、電阻，使其達到頻率可調動之效果，並透過調整可變電阻時，觀察是否影響電路上的一些參數，以致會很容易產生震盪現象。再透過改變電阻 VR2、VR3、VR4 時，觀察測試節點正弦振幅大小變化情形。最後再透過改變輸入頻率來觀察輸出波型的特性，並了解造成此波型特性的一些原因。更了解對於任何的 Butterworth 濾波器，如果向右延長水平線並且向左上延伸斜線函數的漸近線，它們將相交在「截止頻率」。一階濾波器在截止頻率的頻率響應是水平線下-3dB。不同類型的濾波器——Butterworth 濾波器、Besself 濾波器、Chebyshev 通濾波器都有不同形狀的「knee curves」。許多二階濾波器設計成有「峰值」或者諧振以得到截止頻率處的頻率響應處在水平線之上。

5.2 未來研究與發展方向

無線通訊產品多功能化及小型化已成為市場趨勢，順應無線通訊元件的發展將 朝向高頻化、小型化及模組化的方向發展。近年來無線通訊蓬勃發展，無論是在行動電話、無線區域網路、全球定位系統、藍芽、物聯網與穿戴裝置等主流應用都呈現高度成長，然而相對於國際大廠，我們在無線通訊高頻元件及模組化技術的發展卻仍屬薄弱。目前全球整合元件大廠以日、美、歐為首，如日本的 Murata、Kyocera、TDK；美國的 CTS 及歐洲的 Bosch、CMAC 等大廠，反觀國內廠商，由於起步較晚，目前我們在全球市佔率中相對產值仍低。有鑑於無線通訊的應用將是未來市場成長的核心，因積極開發具有前瞻性及創新的高頻元件及模組化尖端技術，以期掌握未來無線通訊成長的契機。

參考文獻

- [1] R. O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, Artech House, Boston, Inc., Norwood, MA, 1991.
- [2] 呂宏基, 最小平方解根演算法於聲源方位估測器之研製, 國立臺灣海洋大學電機工程學系碩士論文, 2000 年6 月.
- [4] 黃佳政, 頻寬可調制之微波低通濾波器, 元智大學 通訊工程學系碩士論文, 西元 2012 年 6 月
- [5] 鍾其穎, 應用於第五代行動通訊之超級源極隨耦器的低通濾波器 國立台灣科技大學 電機工程系 碩士論文 2018 年 1 月
- [6] 廖寶華, 應用於低通濾波器之新型全差動低壓運算轉導放大器設計, 國立台北科技大學 電子工程學系 碩士論文 2021 年 1 月
- [7] 陳建宏, 一個自動時脈振顫校正之延遲鎖定迴路, 國立臺灣師範大學應用電子科技學系 碩士論文 2011 年 6 月

