

臺灣二〇〇八年國際科學展覽會

科 別：物理與太空科學

作品名稱：調幅超聲波解調高指向可聽音之研究

得獎獎項：佳作

學校 / 作者：臺北市立麗山高級中學

蕭丞瑋

摘要

可聽聲有向四周擴散繞射特性，而超聲波具有指向性，改以超聲波載送可聽音訊後，其載波與旁頻帶均在超聲波範圍，實驗中人耳卻可聽到高度指向性聲音，且調幅解調後的可聽聲衰減率比純超聲波來的低。

那為什麼超聲波會解調可聽音？我們以非線性的數學轉換概念，成功以數學推導解釋實驗中所聽到的可聽聲，是由旁頻帶經由非線性轉換而來的。

爲了證實空氣中的超聲波有非線性現象，以發射 40KHz 單頻訊號，除了接收到 40KHz 訊號外還可接收 80KHz 訊號，而 80KHz 訊號振幅，會隨著發射強度而遞增，也會隨著傳輸距離增加至穩定狀態，這所我們從文獻中的非線性理論所吻合。

接下來進行調幅超聲波實驗，我們經理論計算旁頻帶強度爲頻率響應與調變率乘積的一半，而解調可聽聲的強度爲調變率、頻率響應與非線性係數三者乘積，我們也由實驗數據證實理論計算結果，在實驗中，換能器在 40KHz 有最佳的頻率響應，其非線性係數與所載送可聽聲頻率高低約略成正相關，並且與換能器距離遞增而越遠而增加。

此外在提高高指向可聽音輸出功率方面，除製作專屬的放大器、運用方波取代正弦波來載波、配合陣列換能器輸出；在改善音質方面，利用等化器調整訊源頻譜分佈，降低低頻振幅，增強高頻振幅，讓各頻率的原始訊號都能有適當的調變，達到最佳的音質。

Abstract

The audible sound has the characteristics of spreading and diffracting. And ultrasonic is directive. We modulate sound into ultrasonic signal. The carrier and sideband are ultrasonic frequency bands. But in the experiment, human can hear highly directive sound. In terms of attenuation rate, AM demodulation sound is lower than pure ultrasonic wave.

Why can human hear the directive sound? By using the nonlinear mathematical transform, we managed to explain the audible sound which is transformed from sideband with nonlinear effect in the experiment.

In order to confirm that nonlinear phenomena in the air ultrasonic, we launch 40KHz single tone ultrasonic signal. Besides the 40KHz signal, we also received 80KHz signal. The amplitude of 80KHz signal will increase with the emission intensity, and also with the transmission distance to increase its stability. These are consistent with nonlinear theory in the literature.

Next we began AM ultrasonic experiment. We calculated the sideband intensity that is the product of frequency response and modulation index. The demodulation sound intensity is the product of modulation index, frequency response, and nonlinear coefficient. We also proved the calculated consequence through the experiment. In the experiment, the ultrasonic transducer has a best frequency response in 40KHz. The nonlinear coefficient has positive correlation with the modulation frequency, and increases transmission distance.

To boost the power of directive audible sound, we made an amplifier, using square wave to replace sine wave of carrier, and in conjunction with array transducer output. To improve the sound quality, We use the spectrum-Equalizer to adjust the frequency distribution of the origin signal. The EQ reduces the low-frequency amplitude, and boost high-frequency amplitude, which enables every frequency of the original signal to be properly modulated, achieving the best sound quality.

作者簡介



蕭丞瑋

從小對自然科學有濃厚的興趣，在高中開始接觸科學研究，在這研究過程中，學到了有關物理學、電子學、通訊學的相關知識，以及更多的實作、報告的經驗，雖然參與科展才一年多，但我希望能在每項活動與競賽中學到更多，並且深深的感謝老師們對我的教導，以及曾支持過我的師長、同學們。

目錄

壹、	前言.....	1
一、	研究動機.....	1
二、	研究目的.....	2
三、	符號與名詞表.....	3
貳、	研究方法及過程.....	4
一、	原理與文獻探討.....	4
(一)	聲源直徑與波長關係對聲場指向的分布之影響.....	4
(二)	振幅調變(Amplitude Modulation).....	5
(三)	聲音在空氣中的非線性現象.....	10
(四)	線性與非線性響應.....	11
二、	研究設備.....	13
(一)	頻譜、波形、衰減性質量測.....	13
(二)	Mathematica 數學運算軟體.....	14
(三)	半自動化聲場方位角分佈量測裝置.....	14
(四)	訊號處理設備.....	15
三、	超聲波振幅與傳輸距離對非線性效應之影響.....	16
四、	發展 AM 訊號之非線性轉換數學模型.....	18
五、	換能器的頻率響應對旁波帶強度影響.....	20
六、	非線性係數與 AM 載送頻率關係探討.....	22
七、	超聲波與 AM 可聽音聲場指向特性分析.....	23
(一)	超聲波陣列聲場.....	23

(二)	AM 產生可聽音聲場.....	24
(三)	40KHz 超聲波與解調可聽音隨距離衰減性質	25
八、	不同載波波形對解調可聽音之強度探討	26
九、	建構出高效能指向性揚聲系統	28
(一)	等化器(Equalizer)	28
二、	自製放大器.....	29
參、	研究結果與討論.....	31
一、	超聲波振幅與傳輸距離對非線性效應之影響	31
(一)	超聲波振幅對非線性效應之影響.....	32
(二)	40KHz 超聲波訊號傳送距離與非線性效應產生 80KHz 諧波關係	33
三、	換能器的頻率響應對旁波帶強度影響	36
四、	非線性係數與 AM 載送頻率關係探討.....	37
五、	超聲波與 AM 可聽音聲場指向特性分析.....	38
六、	不同載波波形對解調可聽音之強度探討	40
肆、	結論.....	41
伍、	參考資料.....	42
陸、	附錄.....	43

壹、 前言

一、 研究動機

可聽聲有向四周擴散繞射特性，如果聲音要傳得遠就必須用大音量，因此人們一直希望可聽聲波能夠像光束一樣，集中能量傳送，除了方便和別人講悄悄話，又不會被旁人聽到之外，也減少噪音干擾其它不相關的人，也可應用於博物館、舞池、車上、等等.....。

由文獻得知在 1999 年，第一家專門研究及製作聲束喇叭的公司 Holosonic Research Labs,Inc 成立，實現將聲音像光束一樣傳送，於是我們也想解釋此物理現象並開發出這種喇叭。



Fig 1-1- 1 聲束的應用

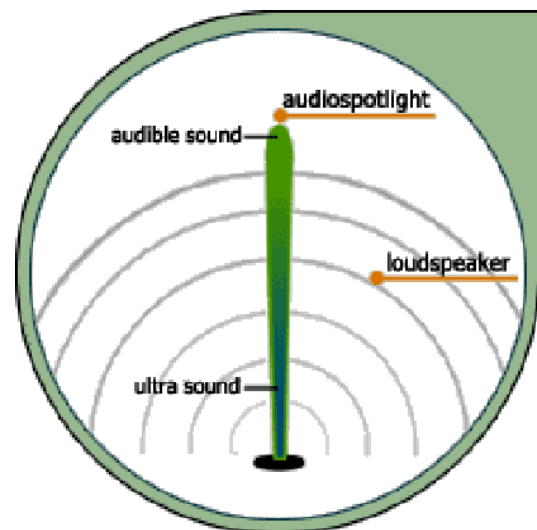


Fig 1-1- 2 聲束與一般喇叭聲場

二、研究目的

- (一) 超聲波振幅與傳輸距離對非線性效應之影響
- (二) 發展 AM 訊號之非線性轉換數學模型
- (三) 換能器的頻率響應對旁波帶強度影響
- (四) 非線性係數與 AM 載送頻率關係探討
- (五) 超聲波與 AM 可聽音聲場指向特性分析
- (六) 不同載波波形對解調可聽音之強度探討
- (七) 建構出高效能指向性揚聲系統

三、符號與名詞表

AM	振幅調變
$v_c(t)$	載波訊號
$v_m(t)$	聲頻訊號
$v_{AM}(t)$	振幅調變訊號
ω_c	角頻率(載波)
ω_m	角頻率(聲頻)
V_c	振幅(載波)
V_m	振幅(聲頻)
V_{DC}	直流訊號
f_c	頻率(載波)
f_m	頻率(聲頻)
m	調變指數
π	圓周率
t	時間
$x_{\text{輸入}}(t)$	輸入訊號
$x_{\text{輸出}}(t)$	輸出訊號
ε	二次項係數
K	常數(放大倍率)
A	波長
λ	振幅
$k/k_1/k_2$	頻率響應因素

貳、 研究方法及過程

一、 原理與文獻探討

(一) 聲源直徑與波長關係對聲場指向的分布之影響

如果喇叭發出聲波的波長遠大於喇叭的直徑時，此時喇叭可視為點聲源，則聲波（視為球面波）無指向性，各方位角強度都相同；如果喇叭發出聲波的波長大小遠小於喇叭的直徑時，此時喇叭視為面聲源，聲波（視為平面波）有強烈指向性，聲波會集中正前方。

以下是以 **Crocodile Physics** 物理模擬軟體進行聲場模擬，其中兩聲源直徑相等，只改變聲源的頻率。

所以當一個喇叭的直徑越大、發出聲音的頻率越高(波長越短)，波長和聲源直徑比值也就會越小，指向性就會越強。



低頻可聽聲，波長遠大於聲源直徑，聲音向四周擴散。



高頻超聲波，波長遠短於聲源直徑，聲場具有強烈指向性。

Fig 2-2-1 低/高頻線聲源聲場模擬圖

根據上述物理定律，若要發出有方向性的聲波，發射器尺寸必須超過聲波波長許多倍，但普通的喇叭頂多 50 公分寬，可聞聲波的波長範圍在 1.7 公分到 17 公尺之間，兩者的比例很難符合發出指向聲波的條件；而本研究所使用的 40KHz 超聲波，波長為 8.5 公釐，發射器的尺寸不須很大，就會發出具有高度指向的聲場。

(二) 振幅調變(Amplitude Modulation)

1、 無線電的 AM 調變

AM 調變這項技術在無線電通訊已經有廣泛的應用，利用無線電高頻載波訊號載送低頻無線電訊號，例如警廣台南台 1314 千赫，其 1314 千赫為無線電載波訊號，能傳送低頻聲音無線電訊號，只不過要注意：在此的載波訊號及所傳送的聲音訊號都是透過無線電來傳送，如要收聽電台訊號，需要天線與解調器放大特定無線電頻率，再經過喇叭放出聲音，才能聽見警廣台南台。

2、 超聲波的 AM 調變

而本研究的超聲波 AM 調變，不是利用無線電來傳送，是利用高度指向性高頻的超聲波作為載波來傳送可聽聲音，並利用空氣作為介質來傳送聲音，那為什麼要用超聲波 AM 調變？因為我們希望能不透過天線與解調器，能直接以耳朵接收聲音，也希望所聽到的解調聲音能像超聲波一樣有高度指向性，但是超聲波載送可聽音訊號，接在超聲波範圍內，人耳應該聽不到，需要透過非線性理論解釋，我們將在下一單元加以詳細說明。

3、 振幅調變原理

使載波振幅按照調變信號而改變的調變方式叫振幅調變，是將高頻訊號(載波)之振幅大小，依音頻訊號之振幅大小而一起變化，即音頻正電壓越大，AM 波振幅越大，音頻負電壓越大，AM 波振幅越小，經過調幅的電波叫調幅波。它保持著高頻載波的頻率特性，但包跡(envelope)的形狀則和信號波形相似。由此可知，調幅波包的包跡就是所要傳送的聲頻訊號。

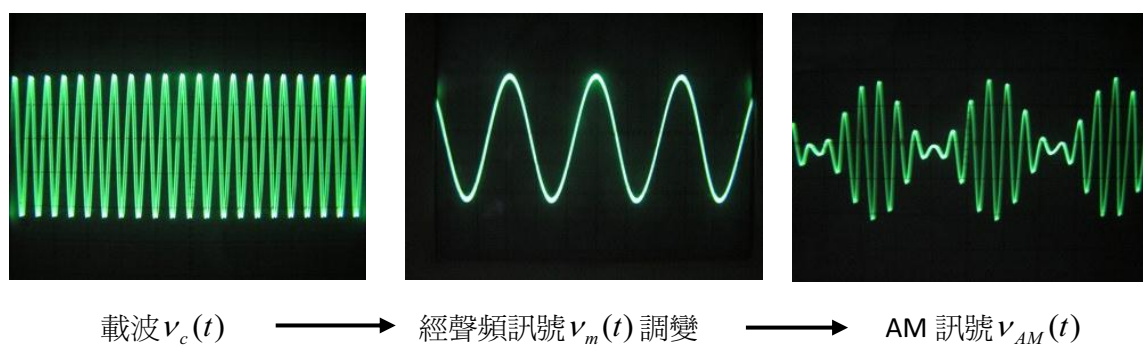


Fig 2-2-2 AM 調變示意圖

右圖是以單一頻率的弦波信號(即單音信號, single-tone)作為基頻信號的振幅調變架構圖，標準

AM 訊號其實是：

(音頻訊號加上直流訊號) × 載波訊號，其關係式如下。

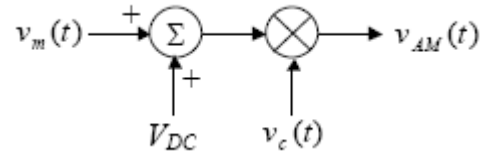


Fig 2-2-3 AM 調變架構圖

$$\text{載波： } v_c(t) = V_c \cos(\omega_c t) \quad (2.1)$$

$$\text{聲頻訊號： } v_m(t) = V_m \cos(\omega_m t) \quad (2.2)$$

$$\text{AM訊號： } v_{AM}(t) = [V_{DC} + V_m \cos(\omega_m t)] \times V_c \cos(\omega_c t) \quad (2.3)$$

4、 旁頻帶(Sideband)

在 AM 中，旁頻帶指的是高於或低於載波頻率的頻帶，旁頻帶在 AM 訊號的解調具有重大意義，旁頻帶的頻率與強度會直接影響解調後的訊號。

今利用三角函數關係： $\cos A \cos B = \frac{1}{2} \cos(A+B) + \frac{1}{2} \cos(A-B)$ ，將 AM 關係式(2.3)式展開可得：

$$\text{AM訊號： } v_{AM}(t) = \frac{1}{2} m V_{DC} V_c [\cos(\omega_m t + \omega_c t) + \cos(\omega_m t - \omega_c t)] + V_{DC} V_c \cos(\omega_c t) \quad (2.4)$$

$$\text{或表示為： } v_{AM}(t) = \frac{1}{2} m V_{DC} V_c \left[\underbrace{\cos(2\pi(f_c + f_m)t)}_{\text{上旁頻帶}} + \underbrace{\cos(2\pi(f_c - f_m)t)}_{\text{下旁頻帶}} \right] + \underbrace{V_{DC} V_c \cos(2\pi f_c t)}_{\text{載波}} \quad (2.5)$$

由展開式可知，AM 調變信號包含三種頻率成份：載波(Carrier)頻率 f_c 及旁頻帶 $f_c \pm f_m$ ，後兩者為 AM 調變後所產生知新的頻率成份， $f_c + f_m$ 稱為上旁頻帶(Upper sideband)頻率， $f_c - f_m$ 而為下旁頻帶(Lower sideband)頻率，因載波信號本身不包含所要傳送信息（即音頻信號）的成份，由此可知所要傳送之音頻信號成份是隱含在兩個旁頻帶中，而且旁頻帶的強度會直接影響解調出訊號的強度。

另外，頻譜中最高的頻率成份為 $f_c + f_m$ ，最低頻率為 $f_c - f_m$ ，而兩個頻率的差就是傳輸 AM 訊號所須的通道頻寬，因此我們稱它是 AM 訊號的

傳輸頻寬 (transmission bandwidth)。綜合上述可知：一個頻寬的調變訊號，經振幅調變後的頻譜會同時含有上、下兩個旁頻帶，且傳輸頻寬正好是調變訊號頻寬的兩倍。

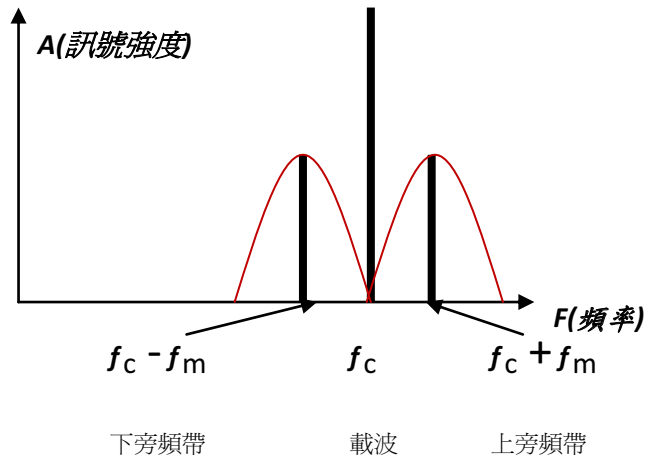


Fig 2-2-4 AM 訊號頻譜圖

5、 調變指數

調變指數 (Modulation Index, m) 或稱為調變深度 (Depth of Modulation) 通常以百分比來表示，所以又稱為調變率 (AM%)。在單一弦波為調變訊號的振幅調變中，其定義如下：

$$m(\text{調變指數}) = \frac{\text{基頻訊號振幅}}{\text{直流成分大小}} = \frac{A_m}{A_{DC}} \quad (2.6)$$

$$\text{AM}\%(\text{調變百分率}) = m \times 100\% \quad (2.6.1)$$

一般在電路中直流訊號大小不易量測，因此我們可以另一種形式來表示。觀察下圖

令 $A_{DC} = (E_{max} + E_{min}) / 2$ ，而 $A_m = (E_{max} - E_{min}) / 2$ ，所以可得：
$$m = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \quad (2.7)$$

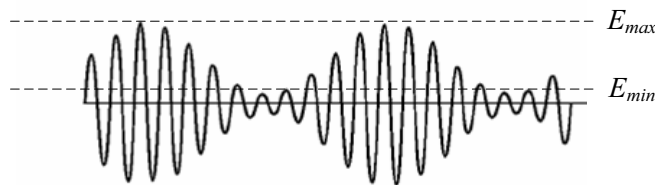


Fig 2-2-5 調變率測量(波型)

根據式(2.4)，展開後的載波部分係數為 $V_{DC}V_C$ ，旁頻帶係數為 $\frac{1}{2}mV_{DC}V_C$ ，所以我們也可以從展開式或頻譜分析中算出調變指數 m 。

$$m = \frac{\text{旁波帶振幅} \times 2}{\text{載波部分振幅}} \quad (2.8)$$

爲了了解調變指數的涵義，現在我們先來看不同調變指數(m)會對 AM 波形及訊號組成造成什麼樣的影響：

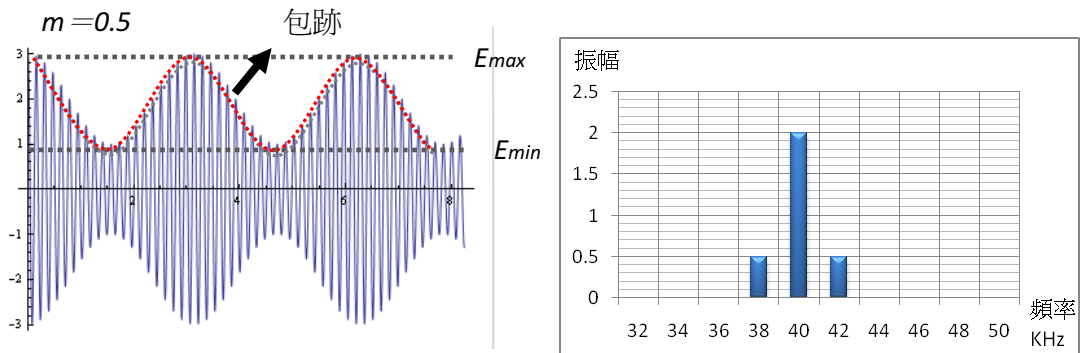
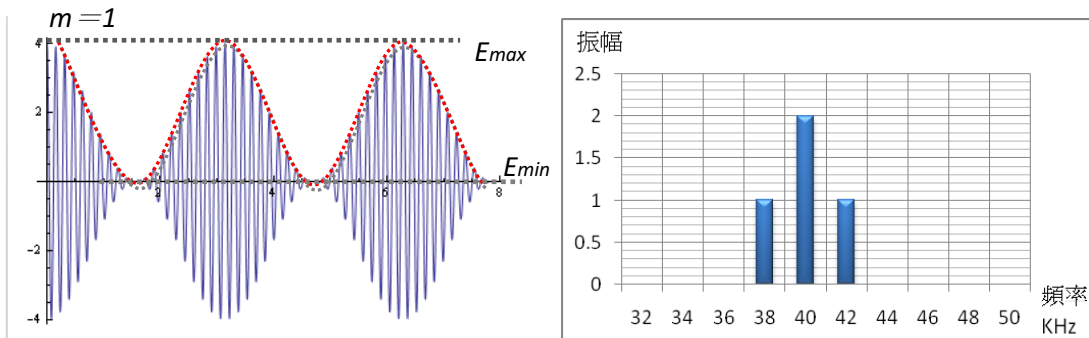


Fig 2-2-6 $m=0.5$ 時的 AM 波形/頻譜圖

令 $V_{DC} = 1$ 、 $V_m = 0$ 、 $V_C = 2$ 、 $f_m = 2 \times 10^3$ 、 $f_c = 4 \times 10^4$ 可得圖，由圖可以發現，因爲振幅調變是載波的振幅隨著調變訊號振幅而改變，所以 AM 波形的包線就是調變訊號（紅色虛線），在頻譜中，出現 40KHz 的載波、38KHz 的下旁頻帶、42KHz 的上旁頻帶。而由 (3.3) 或 (3.4) 均可求得此 AM 波形的調變指數爲 0.5，調變率爲 50%。



數剛好等於 1，而上包跡與下包跡剛好相交於一點，在頻譜中旁頻帶剛好爲載波振幅的一半。很明顯的，此時 AM 波形在包線上的變化量最大，也就是指的是此時 AM 波形所含的訊息量是最多的，因此，照道理而言當調變指數等於 1 時的解調效果會是最好的。

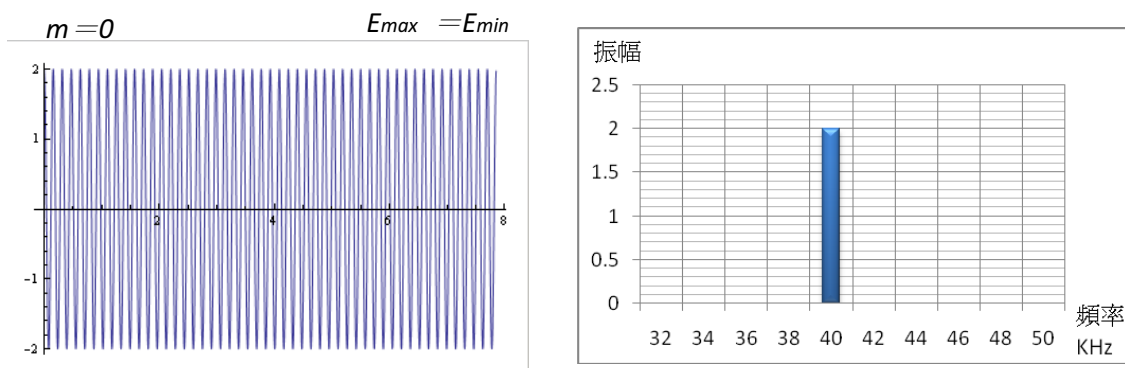


Fig 2-2-8 $m=0$ 時的 AM 波形/頻譜圖

令 $V_{DC}=1$ 、 $V_m=0$ 、 $V_C=2$ 、 $f_m=2\times 10^3$ 、 $f_c=4\times 10^4$ 可得圖()，此時調變指數為 0，載波的振幅沒有隨聲頻訊號變動，在頻譜中只有載波訊號出現。

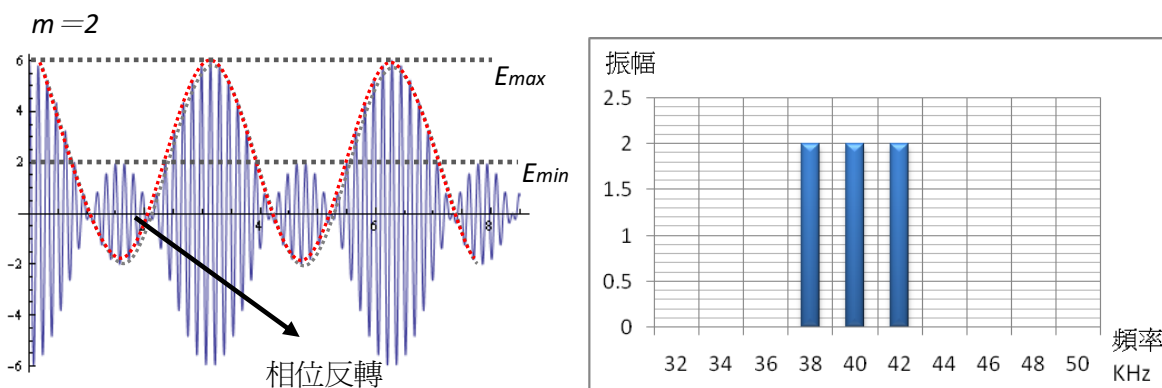


Fig 2-2-9 $m=2$ 時的 AM 波形/頻譜圖

令 $V_{DC}=1$ 、 $V_m=2$ 、 $V_C=2$ 、 $f_m=2\times 10^3$ 、 $f_c=4\times 10^4$ 可得圖(2-2-8)，我們可以看到此時 AM 波形的包跡並不等於調變訊號（紅色虛線），我們稱這種現象為「包跡失真（envelope distortion）」。而相較於調變指數小於 1 時的「非過度調變（undermodulation）」，我們稱這時候的振幅調變是處於「過度調變（overmodulation）」的狀態。另外，除了包跡失真的現象以外，我們也可以發現過度調變時，在 AM 波形通過零電位的地方會有相位反轉（phase reversal）的情形，此時如需解調訊號，不可從包跡解調，否則會有諧波失真，需要特別的解調方式：如同步解調。

(三) 聲音在空氣中的非線性現象

在描述式聲波的數學關係中，大都簡化成建立在符合虎克定律的一次線性關係，時常在這種近似下，聲波在流體中傳播的速度(聲速)與聲波的強度及頻率無關，而大振幅或高頻率的聲波在傳播時，就不能作線性近似，也就是說，非線性效應變得顯著，這時大振幅聲場中各點的傳播速度不一樣。

依 L.J.Black 的發現，同樣大小的正向及負向壓力加諸在定量空氣上時，此定量的空氣的容積變化並不相等，正壓造成的容積變化小於等值負壓造成的容積變化，如下圖。

聲音線性傳遞只存在於小信號傳遞時，小信號傳遞指的是當空氣粒子的位移 x 小於聲音波長 λ 時 ($x < \lambda$)，也就是當壓力變化較小時，容積變量與壓力變量是線性函數(下圖藍線)。

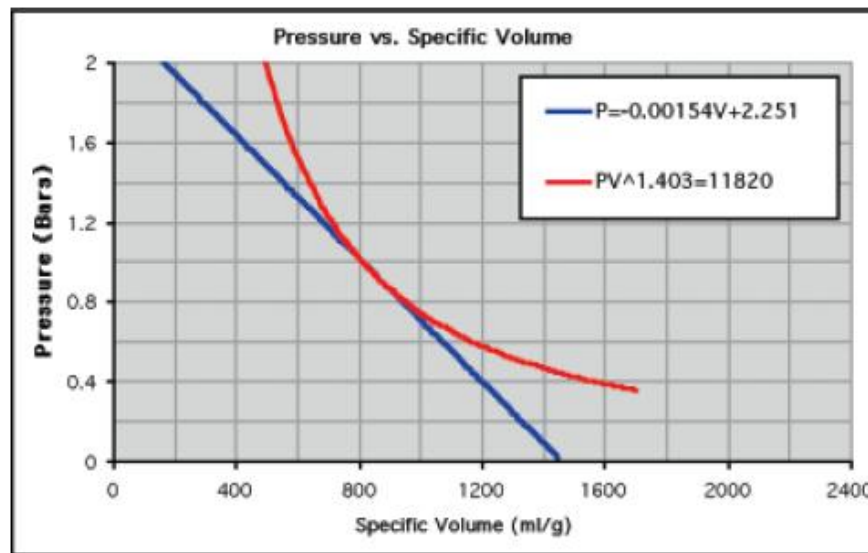


Fig 2-2-10 壓力與容積變化

在壓力變動值大時，容積變量與壓力變量就不為線性函數經過這樣的介質的波會變形，造成基頻衰減、失真隨著距離增加。

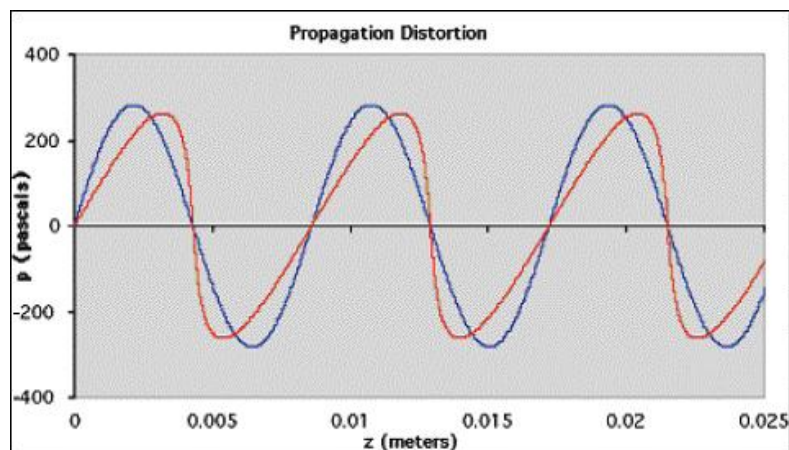


Fig 2-2-11 非線性現象對波形影響(頻率 40KHz 聲壓 120dB)

故大振幅波在傳播時，波形隨傳播距離增大而改變(上圖紅線)，原為正弦波的波形演變成鋸齒波；聲波振幅小時，由於這種差別非常小，故可把聲速取為常數，因此小振幅聲波在傳播時波形不變，波形隨著傳播距離增大而發生越來越大的變化是大振幅波的顯著特點之一。

當波形演變為鋸齒波時，波形變化的過程就是原為單頻的波逐漸增加高次諧波，在這過程中，基頻具有的能量隨著波的傳播漸漸轉變成高次諧波的能量。這個過程隨著傳遞距離持續地增加。

綜合以上的敘述，當聲音頻率越高或振幅越大，容積變量與壓力變量就越不為線性關係，非線性現象越明顯；而在本研究中以 40KHz 超聲波做為調變的媒介、音壓可達 120 分貝(高頻率、高振幅)，在短距離內即有非線性現象。

(四) 線性與非線性響應

在許多的物理性質中，我們所假設的系統是線性系統，也就是說位移或加速度與力成正比，或者是線路中的電流與電壓成正比等等。

在費因曼(Richard.P.Feynman)物理學的第一部一下中，提到了有關非線性響應，討論的情形是當其並不完全的成正比關係的響應，我們假想一裝置，其在時間 t 的輸入為 $x_{\text{輸入}}$ ，響應為 $x_{\text{輸出}}$ ， $x_{\text{輸出}}$ 是由 $x_{\text{輸入}}$ 來決定的，如果這個裝置為線性的，我們就有：
$$x_{\text{輸出}}(t) = kx_{\text{輸入}}(t) \quad (2.9)$$

此處的 K 為常數，與 t 和 $x_{\text{輸入}}$ 無關，純為放大倍率。假如這個裝置為非線性的，我們可以得到：

$$x_{\text{輸出}}(t) = k[x_{\text{輸入}}(t) + \varepsilon x_{\text{輸入}}^2(t)] \quad (2.10)$$

關係式中比一次項更高的項通稱為非線性係數，關係式中可有更高次項，這樣的線性與非線性響應如圖所示：

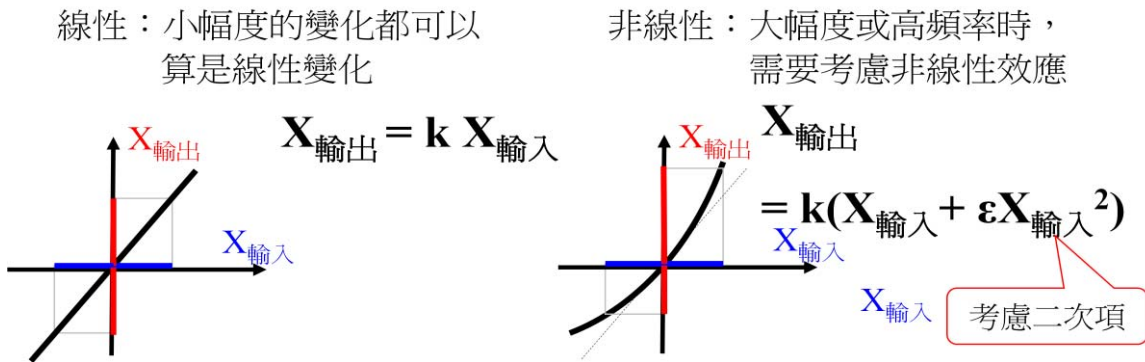


Fig 2-2-12 線性與非線性關係圖

非線性響應在本研究中有著關鍵性的影響，這跟當我們以 AM 超聲波發射至空氣中所聽見的可聽音有關係；首先我們考慮當一個純音輸入至非線性系統時會有什麼現象發生，我們令 $x_{\text{輸入}} = \cos \omega t$ ，以式(2.10)代入，就有

$$x_{\text{輸出}} = k\left(\cos \omega t + \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\varepsilon}{2} \cos 2\omega t\right) \quad (2.11)$$

輸出訊號不僅具有輸入的基頻，還有一個第二諧波的分量，此外尚有一個常數項 $K\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)$ ，這項使其平均值移動；一個非線性響應終將會有輸入頻率的諧波，雖然我們所假設的非線性關係只產生第二諧波，但是如果非線性關係中有比二次更高的項時，就會產生比第二諧波更高的諧波。

二次項係數 ε 在實際上會受到許多因素影響，如溫度、振幅、頻率、傳輸距離……等等，二項式係數越高，輸入與輸出之間的關係就越趨於非線性，非線性效應也就越強。

二、研究設備

(一) 頻譜、波形、衰減性質量測



- 1、超聲波換能器
- 2、Apple 電腦
- 3、滑軌
- 4、滑車
- 5、聲音感測器
- 6、數位量測裝置
- 7、訊號產生器(聲頻)
- 8、訊號產生器(AM 訊號)
- 9、示波器

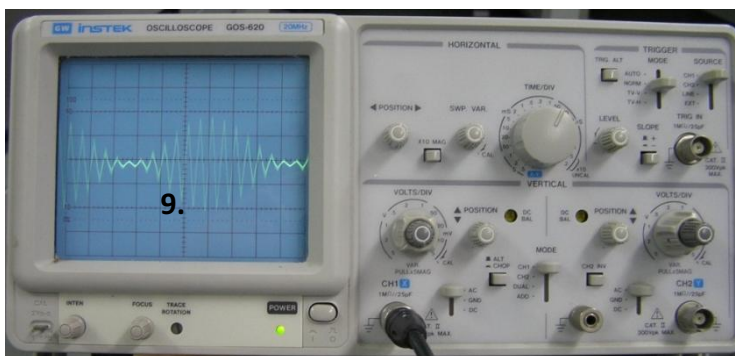


Fig 2-2- 13 實驗設備與裝置圖

(二) Mathematica 數學運算軟體

下列為 Mathematica 數學軟體輸入指令，Fc 為載波函數，其角頻率為 ω_c ，Fm 為被調變訊號的波函數，其角頻率為 ω_m ，AM 為調幅載波函數關係，其中 m 為調變指數，TrigReduce 與 Expand 為三角函數的展開指令。

```

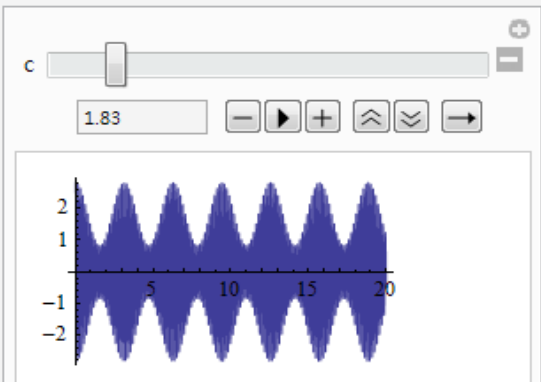
In[9]:= Fc = Cos[ $\omega_c$ ]; Fm = Cos[ $\omega_m$ ];
        AM = (1 + m * Fm) Fc // TrigReduce // Expand

Out[10]= Cos[ $\omega_c$ ] +  $\frac{1}{2}$  m Cos[ $\omega_c - \omega_m$ ] +  $\frac{1}{2}$  m Cos[ $\omega_c + \omega_m$ ]

In[13]:= GG = x +  $\epsilon$  x2 /. x  $\rightarrow$  AM // TrigReduce // Expand

Out[13]=  $\frac{\epsilon}{2}$  +  $\frac{m^2 \epsilon}{4}$  + Cos[ $\omega_c$ ] +  $\frac{1}{2}$   $\epsilon$  Cos[2  $\omega_c$ ] +  $\frac{1}{4}$  m2  $\epsilon$  Cos[2  $\omega_c$ ] +
 $\frac{1}{8}$  m2  $\epsilon$  Cos[2  $\omega_c - 2 \omega_m$ ] +  $\frac{1}{2}$  m Cos[ $\omega_c - \omega_m$ ] +
 $\frac{1}{2}$  m  $\epsilon$  Cos[2  $\omega_c - \omega_m$ ] + m  $\epsilon$  Cos[ $\omega_m$ ] +  $\frac{1}{4}$  m2  $\epsilon$  Cos[2  $\omega_m$ ] +
 $\frac{1}{2}$  m Cos[ $\omega_c + \omega_m$ ] +  $\frac{1}{2}$  m  $\epsilon$  Cos[2  $\omega_c + \omega_m$ ] +  $\frac{1}{8}$  m2  $\epsilon$  Cos[2  $\omega_c + 2 \omega_m$ ]

In[14]:= Manipulate[Plot[(c + Cos[2 x]) * Cos[40 x], {x, 0, 20}],
                    {c, 0.5, 10}]
    
```



左圖為 Mathematica 軟體經程式運算的 AM 波形

Fig 2-2-14 Mathematica 數學運算軟體

(三) 半自動化聲場方位角分佈量測裝置

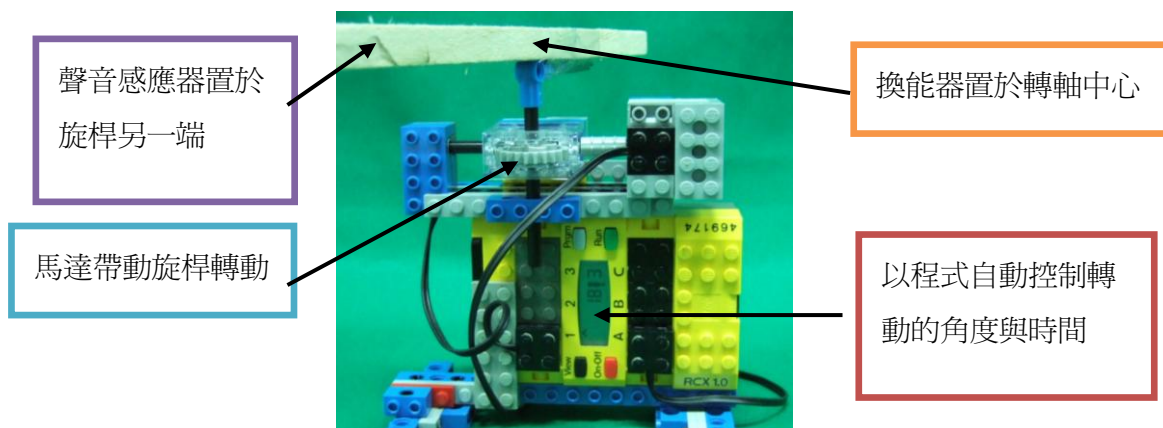


Fig 2-2-15 聲場方位角分佈量測裝置

(四) 訊號處理設備



Fig 2-2-16 前級訊號放大器與等化器

Fig 2-2-17 自製後級放大器

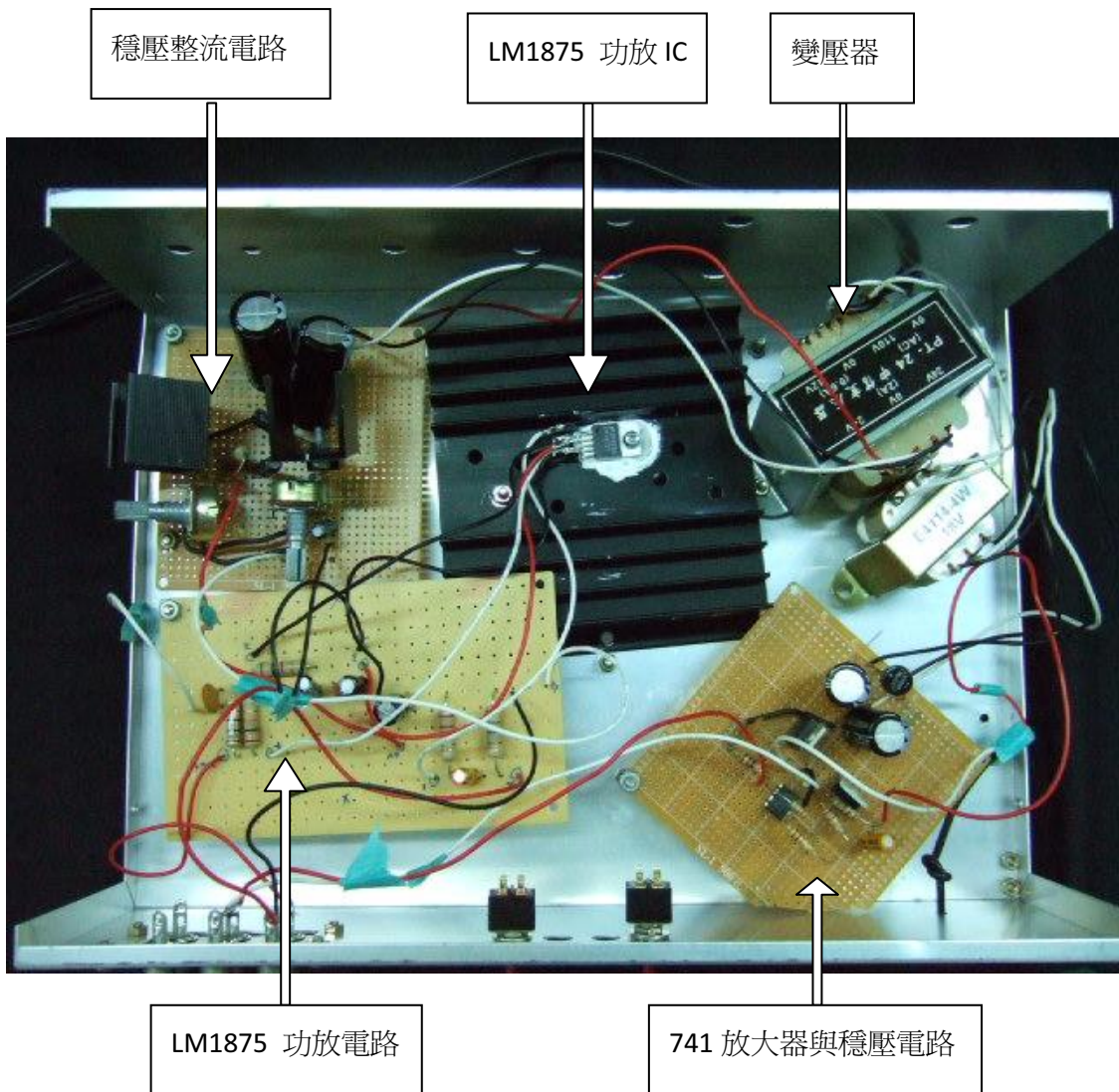


Fig 2-2-18 後級功放內部圖

三、超聲波振幅與傳輸距離對非線性效應之影響

由聲音非線性現象可知：聲音在高頻率或大振幅時需要考慮非線性效應，而非線性效應也會因聲波傳輸距離越遠而越明顯；我們發現當發射一 40KHz 的純音，接收端的頻譜分析中除了 40KHz 基頻外還有 80KHz 的第二諧波，這證明了此超聲波在空氣中有非線性效應，輸入與輸出關係式至少有二次項以產生 80KHz 諧音。

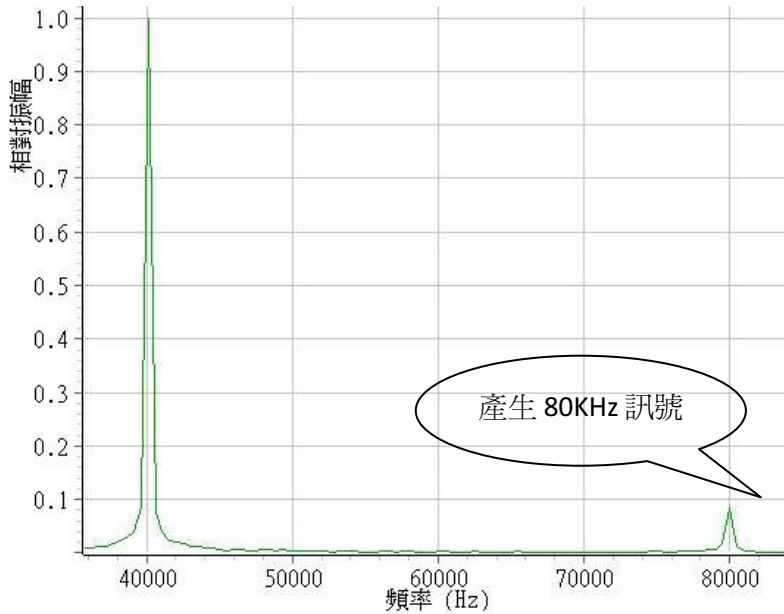


Fig 2-3-1 發射單頻 40KHz 超聲波所量測頻譜

在先前文獻有提到純音代入非線性轉換式，其關係式為：

$$x_{\text{輸入}} = \cos 2\pi(40000)t \quad (2.12)$$

$$x_{\text{輸出}} = K[\cos 2\pi(40000)t + \frac{\epsilon}{2} - \frac{\epsilon}{2} \cos 2\pi(80000)t] \quad (2.13)$$

由關係式可知，當輸入一 40KHz 的純音時，輸出後會產生 40KHz 基頻與 80KHz 諧波，這與我們在實驗的發現相符，而 40KHz 的振幅為 K，80KHz 振幅為 $\frac{K\epsilon}{2}$ 。

在本實驗中，我們發射 40KHz 超聲波，在固定傳輸距離下改變發射超聲波的強度，探討 40KHz 基頻與 80KHz 諧波的比例變化；以及在相等發射強度下改變傳輸距離對 80KHz 所佔比例之影響。

研究步驟-1(改變發射強度)：

- 1、 將發射器與聲音感測器以滑車調整距離為 10cm
- 2、 開啓訊號產生器產生 40KHz 訊號發射器
- 3、 調整訊號產生器的振幅旋鈕為 0.65
- 4、 記錄在頻譜(FFT)上顯示的 40KHz 與 80KHz 訊號大小
- 5、 將步驟 2 中的振幅調整為 0.65、0.7、0.75、0.8……並重複步驟 2~4



Fig 2-3-2 實驗裝置圖

研究步驟-2(改變距離)：

- 1、 將發射器與聲音感測器以滑車調整距離為 0cm
- 2、 開啓訊號產生器產生 40KHz 訊號至發射器
- 3、 記錄在頻譜(FFT)上顯示的 40KHz 與 80KHz 訊號大小
- 4、 將步驟 1 中的距離調整為 1、2、3、4……並重複動作 1~3

四、發展 AM 訊號之非線性轉換數學模型

當我們發射一 AM 調變訊號時，發現人耳會聽到可聽音，所以我們以聲音感測器接收此可聽音並進行分析，發現此可聽音的頻率恰為載送頻率；我們知道，如果此 AM 訊號在空氣式線性關係，就只會有 AM 本來的頻率，也就是載波與上下旁頻帶，但在此情況下卻產生低頻可聽音，而且我們知道空氣對 40KHz 超聲波是非線性的，因此我們認為 AM 訊號在空氣中經過了非線性轉換。

我們提出一數學模型來解釋 AM 訊號經非線性轉換後所產生的可聽音，先將 AM 訊號以數學式表達(式 2.3):

$$x_{\text{輸入}}(t): v_{AM}(t) = [1 + m \cos(\omega_m t)] \times \cos(\omega_c t)$$

此處的 V_{DC} 、 V_C 定為 1。

將 AM 訊號以 $x_{\text{輸入}}$ 形式帶入非線性二階關係式(2.10)：

$$x_{\text{輸出}}(t) = x_{\text{輸入}}(t) + \epsilon x_{\text{輸入}}^2(t)$$

展開並化簡：

$$\begin{aligned} x_{\text{輸出}}(t) &= \underbrace{\cos(\omega_c t)}_{\text{載波}} + \frac{1}{2} m \underbrace{\cos(\omega_c - \omega_m)t}_{\text{下旁頻帶}} + \frac{1}{2} m \underbrace{\cos(\omega_c + \omega_m)t}_{\text{上旁頻帶}} \\ &+ \underbrace{m\epsilon \cos(\omega_m t)}_{\text{可聽音}} + \frac{m^2 + 2}{4} \epsilon \underbrace{\cos(2\omega_m t)}_{\text{可聽音二倍頻}} + \frac{1}{2} \epsilon \cos(2\omega_c t) + \frac{m^2 \epsilon}{4} \\ &\frac{1}{2} \underbrace{m\epsilon \cos(2\omega_c t + \omega_m)t}_{\text{A}} + \frac{1}{2} \underbrace{m\epsilon \cos(2\omega_c t - \omega_m)t}_{\text{M}} + \frac{1}{8} \underbrace{m\epsilon \cos(2\omega_c t + 2\omega_m)t}_{\text{倍}} \quad \text{分} \quad \text{部} \quad \text{分} \quad \text{(藍 色)} \\ &+ \frac{1}{8} \underbrace{m\epsilon \cos(2\omega_c t - 2\omega_m)t}_{\text{倍}} + \frac{\epsilon}{2} + \frac{m\epsilon}{4} \end{aligned} \quad (2.11)$$

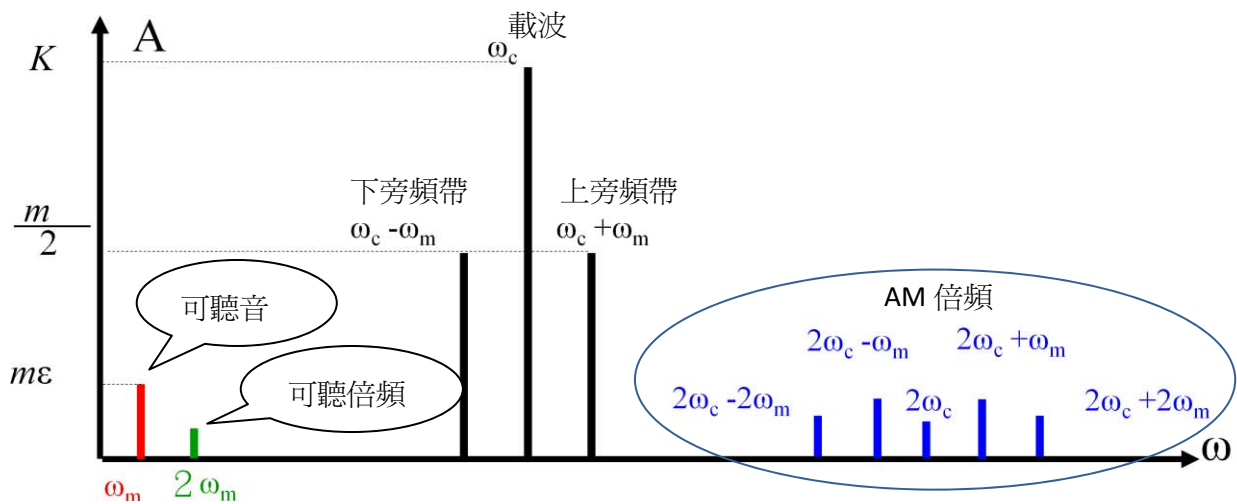


Fig 2-4-1 AM 理論非線性轉換頻譜圖

我們由經轉換後的式子可知，出現原先的載波與上下旁頻帶外，還出現載送頻率 ω_m 以及二倍頻 $2\omega_m$ ，因為出現了原本載送頻率 ω_m ，因此可稱一種解調的形式，更高頻處甚至也出現 5 種不同頻率的訊號。

而且我們也可以從每個頻率前的係數了解一些性質；調變指數 m 會影響旁頻帶的強度外，還會影響 ω_m 訊號，還有二次項係數 ε 也會影響 ω_m 的訊號，總之，AM 解調出的可聽音 ω_m 大小會與調變指數及二次項係數成正比關係。

為了驗證本模型的正確性，我們設計了一個實驗，以換能器發射 AM 訊號，以聲音感測器接收訊號，再經由數位量測裝置分析訊號，最後可在電腦銀幕中讀出頻譜，本實驗重點是觀察頻譜中有哪些頻率出現，而這些頻率是不是與上面的模型推導符合。

研究步驟：

- 1、 將發射器與聲音感測器以滑車調整距離為 10cm
- 2、 開啓訊號產生器產生 1KHz 訊號至調變器
- 3、 開啓訊號產生器產生 40KHz 訊號與聲頻做 AM 調變
- 4、 AM 訊號輸出至換能器
- 5、 擷取頻譜上的資料
- 6、 重複步驟 1~5 並改變在步驟 2 中頻率為 2、4、6、8KHz

五、換能器的頻率響應對旁波帶強度影響

我們發現載送頻率越高時，接收端頻譜的旁頻帶越弱，依照文獻對旁頻帶的定義，旁頻帶強度是不因載送頻率而改變的。

我們以換能器發射 AM 訊號，在固定距離下以聲音感測器接收，只改變載送頻率，下圖是聲音感測器的頻譜圖，由三張圖中可發現，雖然每張圖的調變率都為 100%(即訊號源調變率一致)，旁頻帶的強度應該是相等的，但是有載送頻率越高，旁頻帶強度越低的趨勢。

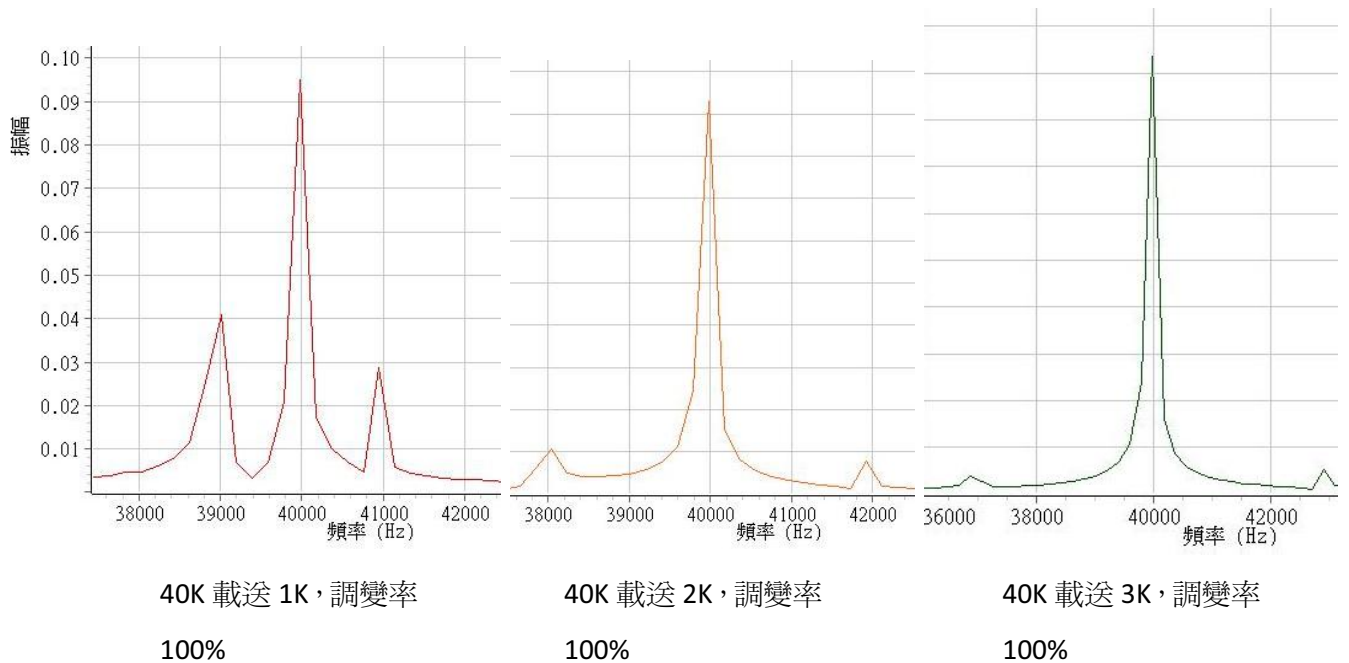


Fig 2-5-1 發射不同載送頻率 AM 訊號頻譜圖

本研究中所使用之超聲波換能器的額定發射頻率為 40KHz，但以 40KHz 超聲波做 AM 調變時，會產生旁頻帶頻率，所以必須考慮此超聲波換能器在 40KHz 以外的頻率響應，但參考超聲波換能器製造商所提供的技術手冊，此換能器所發射的超聲波以 40KHz 最強，偏離 40KHz 的頻率越多，發射強度就越小(詳細換能器資訊可參附錄)，所以發射過後的旁頻帶會因頻率響應特性而衰減；而我們所量測的頻譜訊號是由 Pasco 聲音感測器所接收，因此還必須考慮接收器的頻率響應特性。

綜合以上的兩個因素，AM 訊號還未在空氣中非線性轉換前就有頻率響應的轉換，其流程如下。

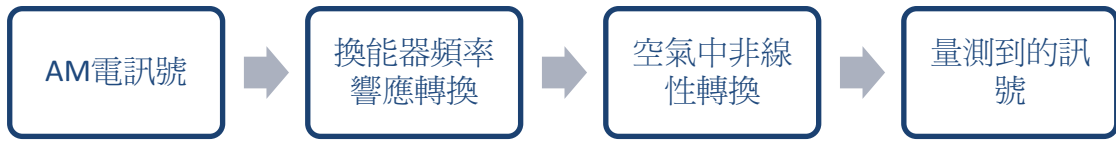


Fig 2-5-2 AM 超聲波轉換流程圖

由上流程圖可知，AM 訊號在空氣中非線性轉換之前，會有一次轉換，這是因為換能器的頻率響應特性，使 AM 訊號旁頻帶的強度降低，才在空氣中進行非線性轉換。

因為旁頻帶的振幅會受頻率響應影響，所以在非線性轉換前必須修正旁頻帶振幅，我們在旁頻帶前定義一係數 k ，以作為頻率響應轉換的形式。

此處的 k 我們定義為頻率函數， k 值會跟所屬的頻率有關係，並以換能器的頻率響應特性做為 k 值轉換依據，並以 40KHz 振幅定為 1， k 是與 40KHz 振幅為相對關係，當 AM 訊號經此轉換後，可以為：

$$v_{AM}(t) = \frac{1}{2} m [k_1 \cos(\omega_m t + \omega_c t) + k_2 \cos(\omega_m t - \omega_c t)] + \cos(\omega_c t) \quad (2.14)$$

代入非線性二階轉換式：

$$\begin{aligned}
 x_{\text{輸出}}(t) = & \cos(\omega_c t) + \frac{1}{2} k_1 m \cos(\omega_c - \omega_m)t + \frac{1}{2} k_2 m \cos(\omega_c + \omega_m)t \\
 & + \frac{k_1 + k_2}{2} m \varepsilon \cos(\omega_m t) + \frac{1}{4} k_1 k_2 m^2 \varepsilon \cos(2\omega_m t) + \frac{1}{2} \varepsilon \cos(2\omega_c t) + \frac{m^2}{4} k_1 k_2 \varepsilon \cos(2\omega_c t) \\
 & + \frac{1}{2} m k_2 \varepsilon \cos(2\omega_c t + \omega_m)t + \frac{1}{2} m k_1 \varepsilon \cos(2\omega_c t - \omega_m)t + \frac{1}{8} m^2 k_2^2 \cos(2\omega_c t + 2\omega_m)t \\
 & + \frac{1}{8} m^2 k_1^2 \cos(2\omega_c t - 2\omega_m)t + \frac{\varepsilon}{2} + \frac{m^2 k_1^2 \varepsilon}{8} + \frac{m^2 k_2^2 \varepsilon}{8}
 \end{aligned} \quad (2.15)$$

根據此理論數學模型，我們可以預測旁頻帶的強度，其旁頻帶振幅為： $\frac{kb}{2}$ ；所以我們設計了一個實驗，改變載送頻率，探討每個載送頻率的旁頻帶的振幅是否與理論推導吻合，以說明載送頻率越高旁頻帶越弱的現象。

六、非線性係數與 AM 載送頻率關係探討

根據式(2.15)，AM 訊號經非線性轉換後，所產生的可聽音振幅為： $\frac{k_1+k_2}{2}m\varepsilon$ ，

而上下旁頻帶振幅各為： $\frac{k_1}{2}m$ 、 $\frac{k_2}{2}m$ ，這證明了非線性效應所產生的可聽音，跟旁頻帶有關係，調變指數 m 也影響可聽音振幅，但不影響二次項係數；我們可利用這些條件來求出二項式係數 ε ，其運算式為：

$$\varepsilon = \frac{\text{可聽音振幅}}{\text{上旁波帶振幅} + \text{下旁波帶振幅}} \quad (2.16)$$

本實驗中，我們以換能器發射 AM 訊號，經由接收器接收後，在頻譜中可得可聽音振幅與旁頻帶振幅，以此條件套入式(2.16)可得二項式係數。

本實驗分別改變載送頻率，觀察對二次項係數的影響，以及証實調變指數 m 不會影響二次項係數，加強本模型的正確性。

研究步驟：

- 1、 將發射器與聲音感測器以滑車調整距離為 3cm
- 2、 產生 40KHz 經 1KHz 100%調變訊號至換能器發射
- 3、 記錄在頻譜中出現的可聽音、載波、上下旁頻帶訊號強度
- 4、 將步驟 2 中的 1KHz 改為 2、3、4……10KHz 並重複步驟 2~3
- 5、 將步驟 2 中的 100%調變率改為 75%、50%，並重複步驟 2~4
- 6、 將步驟 1 中的距離改為 15cm 並重複步驟 1~5

七、超聲波與 AM 可聽音聲場指向特性分析

本實驗分為三部分，第一為先量測純超聲波的聲場，並將換能器組成陣列，觀察它的干涉現象；第二部分為 AM 超聲波在空氣中產生可聽音的聲場，探討解調的可聽音是否與純聲波具有類似的聲場特性；第三為先量測 40KHz 超聲波的衰減性質，再量測解調可聽音做對照，

探討解調後聲音是否具有純超聲波一樣的衰減性質。

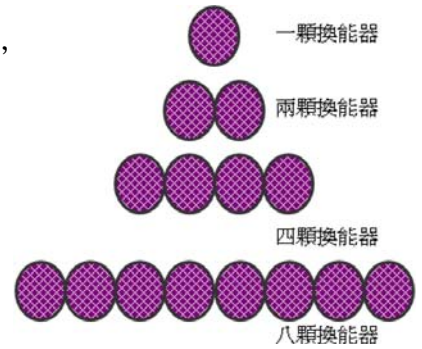


Fig 2-7-1 換能器陣列排列方式（均採緊密排列）

(一) 超聲波陣列聲場

在本實驗中，我們除了量測單顆超聲波換能器在不同方位角的聲音強度(聲場分布)外，還使用多顆換能器組成直線陣列，探討換能器組成陣列時的聲音強度與聲場分布的變化。

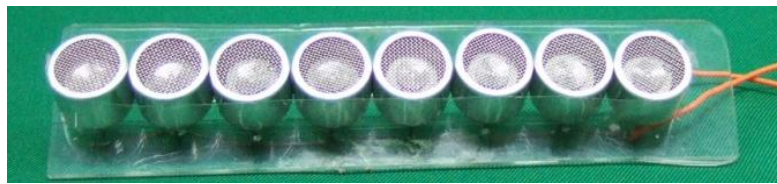


Fig 2-7-2 八顆換能器換能器陣列（均採緊密排列）

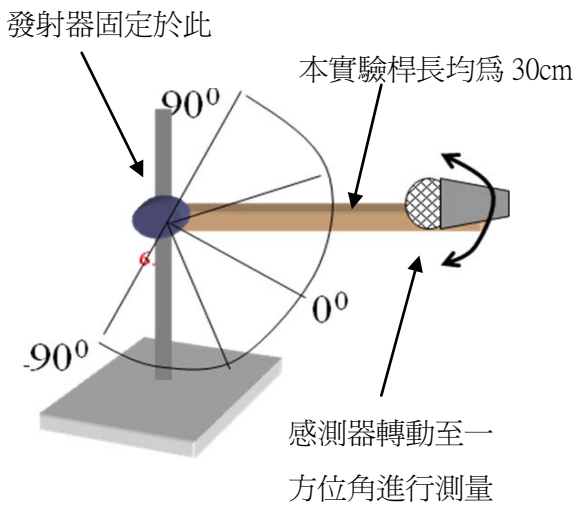


Fig 2-7-3 聲場量測示意圖

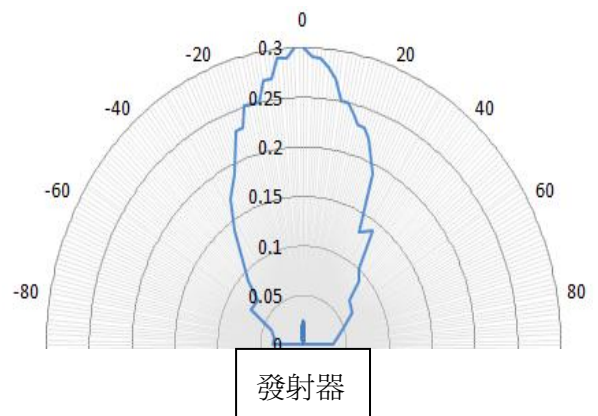


Fig 2-7-4 聲場分布圖說明

在聲場圖中，我們令發射器正前方的方位角為 0 度，從 0 度順時針以正方位角遞增，0 度逆時針以負方位角為遞減。

研究步驟：

- 1、 將 1 顆超聲波換能器固定於量測裝置上。
- 2、 將聲音感應器置於量測裝置的旋桿上
- 3、 利用訊號產生器產生 40KHz 超聲波至超聲波換能器。
- 4、 啓動自動化量測裝置。
- 5、 當自動量測裝置旋桿轉動 1 度時，會停下 6 秒鐘。
- 6、 紀錄當前角度的聲音強度。
- 7、 依序完成在每個方位角下的聲音強度。
- 8、 將步驟 1 的 1 顆換能器改爲 2 顆、4 顆、8 顆直線並列，並重複步驟 2 ~6。

(二) AM 產生可聽音聲場

這個部份我們使用 8 顆換能器直排陣列來做爲發射器，與純超聲波聲場做對照，本實驗的變因爲改變載送頻率，也探討載送頻率不同對聲場之影響。

研究步驟：

- 1、 將 8 顆直線換能器陣列固定於量測裝置上。
- 2、 將聲音感應器置於量測裝置的旋桿上
- 3、 產生 40KHz 經 1KHz 調變訊號至換能器。
- 4、 啓動自動化量測裝置。
- 5、 當自動量測裝置旋桿轉動 1 度時，會停下 6 秒鐘。
- 6、 紀錄當前角度的聲音強度。

- 7、 依序完成在每個方位角下的聲音強度。
- 8、 將步驟 3 的載送頻率改為 2、4、9KHz 並重複步驟 4~7

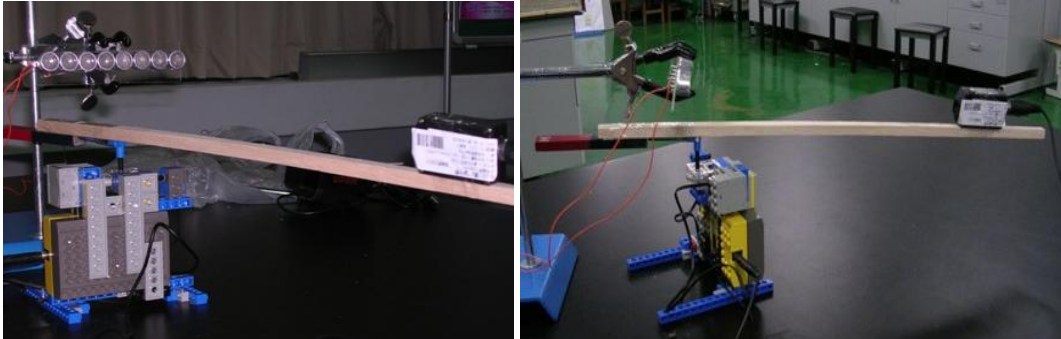


Fig 2-7- 5 聲場量測過程

(三) 40KHz 超聲波與解調可聽音隨距離衰減性質

在本實驗中，我們先去量測 40KHz 超聲波的衰減性質，再量測超聲波 AM 調變後解調的聲音衰減性質，了解解調後聲音是否具有純超聲波一樣的衰減性質。

研究步驟：

- 1、 利用訊號產生器產生 40KHz 超聲波輸出至超聲波換能器。
- 2、 距發射端 0 公分處架設聲音感應器量測訊號。
- 3、 將步驟 2 中 0 公分改為 10、20、30、40.....200 公分，並量測訊號。
- 4、 將步驟 1 中的 40KHz 超聲波改為 40KHz 載送 1、2、4、9KHz 之 AM 訊號，並重複步驟 1~3。

八、不同載波波形對解調可聽音之強度探討

在先前的研究過程中，我們都是以正弦波做為載波，但我們發現改變載波波形為其他形式(方波、三角波)時，所解調的可聽音有強度上的變化，因此我們設計實驗，探討載波波形對解調可聽音之影響。

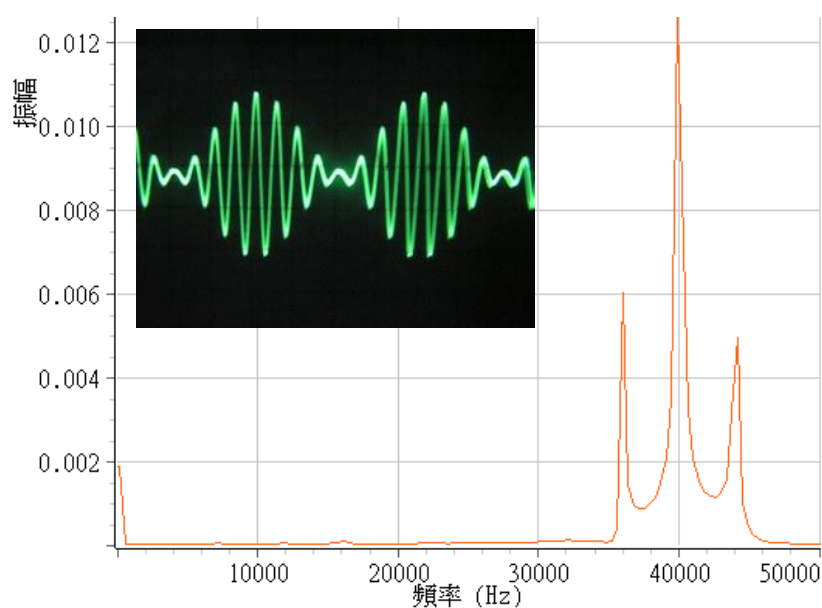


Fig 2-8-3 40KHz 正弦波載 2KHz 波形/頻譜圖

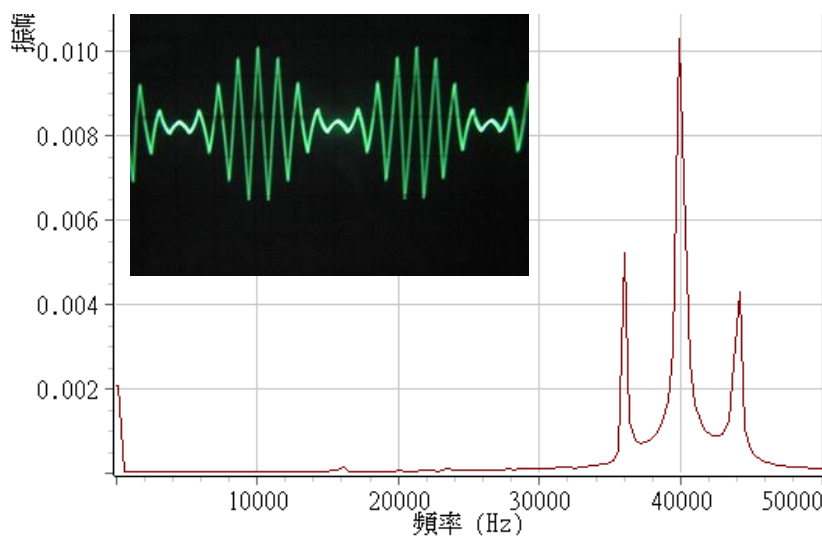


Fig 2-8-4 40KHz 三角波載 2KHz 波形/頻譜圖

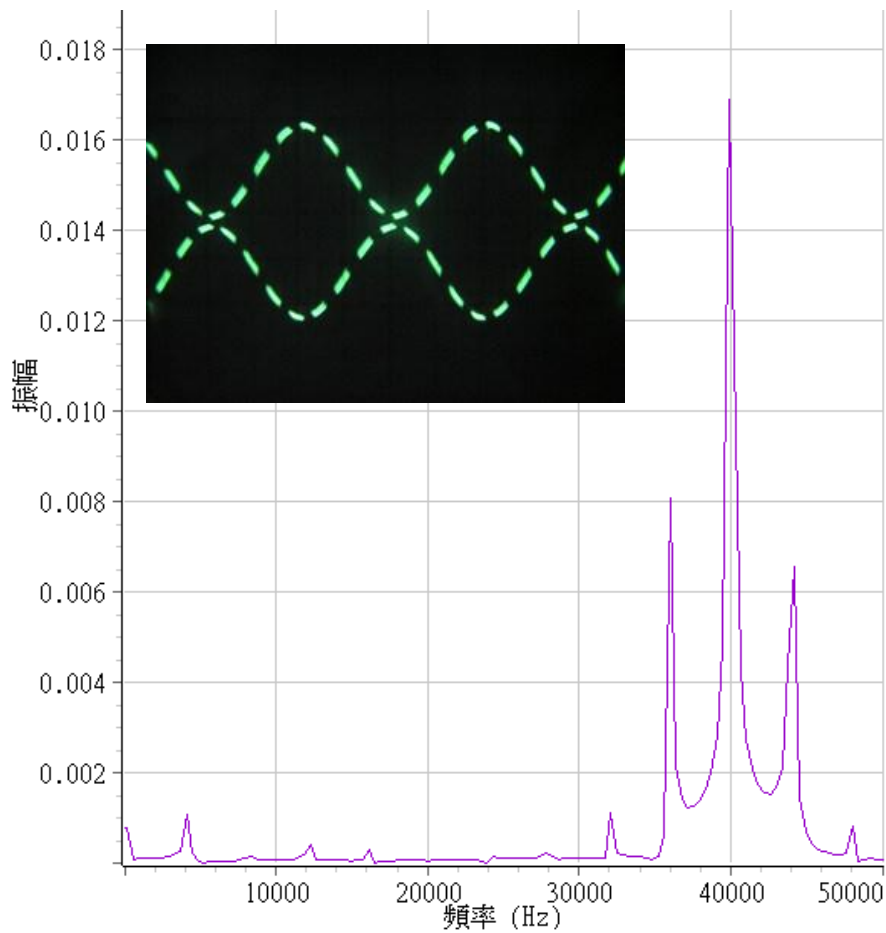


Fig 2-8-3 40KHz 方波載 2KHz 波形/頻譜圖

研究步驟：

- 1、 將發射器與聲音感測器以滑車調整距離為 10cm
- 2、 產生 40KHz 正弦波經 2KHz 調變訊號至換能器發射
- 3、 記錄在頻譜中出現的可聽音、載波、上下旁頻帶訊號強度
- 4、 將步驟 2 中的載波波型改為三角波、方波並重複步驟 2~3

九、建構出高效能指向性揚聲系統

(一) 等化器(Equalizer)

當我們將音樂訊號作 AM 調變並輸出至換能器時，我們發現音樂的音質不是很好，低頻部分有明顯的諧波失真，高頻表現較良好，這是因為在人耳的聽覺曲線中，低頻部分人耳較遲鈍，因此一般音樂便加強低頻部分的強度，結果音樂經 AM 調變後，低頻部分因調變率過高而有嚴重的諧波失真。

為了解決此問題，音樂訊號源在 AM 調變前加上等化器，降低低頻部分強度，增強高頻強度，使各頻率的調變率均能控制在適當的範圍內，以減少低頻失真的問題。

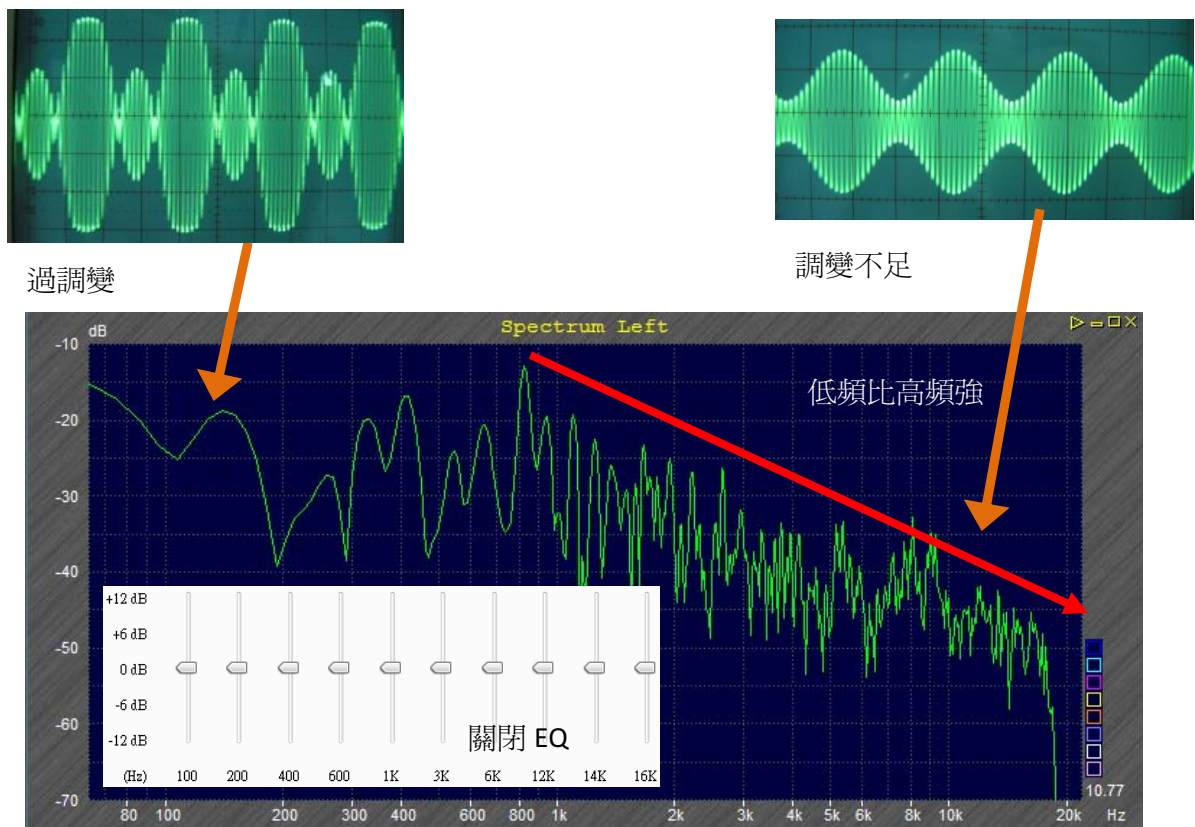


Fig 2-9-1 音樂訊號頻譜

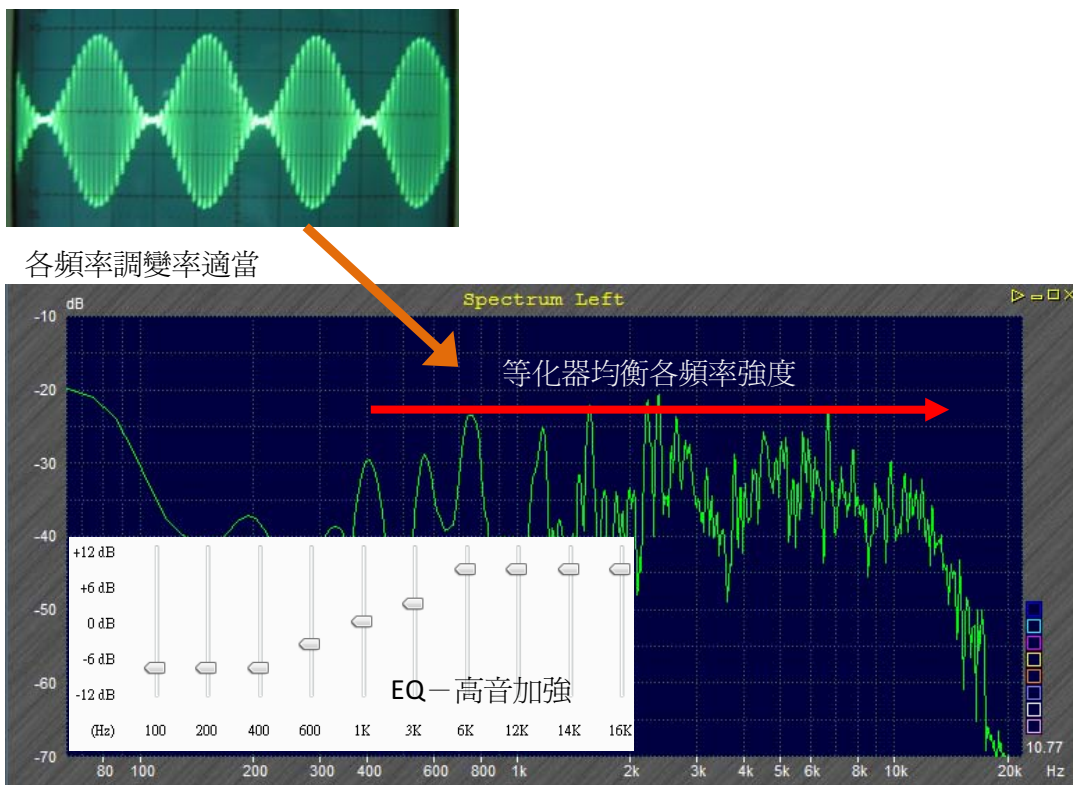


Fig 2-9-2 音樂經等化器調整頻率分布頻譜

上圖是我們對某歌曲片段進行頻譜分析，發現原始訊號的低頻強於高頻，訊號強度隨頻率有遞減的趨勢，此訊號在調變時難以控制適當的調變率，而造成低頻調變過大產生失真，但經等化器調整音樂訊號後，可以使低頻、中頻、高頻的強度控制在一定範圍內，易於控制調變率，降低失真的可能性。

二、自製放大器

本研究所使用的 AM 訊號產生器最大輸出振幅為 $10V(7.07V_{rms})$ ，而換能器技術手冊所提供的最大驅動電壓為 $20V_{rms}$ ，因此我們設計了放大器以放大 AM 訊號，讓換能器有最好的使用效率，而且發射強度越強，非線性效應越明顯，解調可聽音的強度就越強。

因為 AM 訊號的頻率分布在 $40KHz$ 附近，因此不可使用一般的功率放大器，有些放大器會添加帶通濾波器($20\sim 20000Hz$)，濾掉 $40KHz$ 的 AM 訊號，所以自行製作符合此特殊條件的放大器。

綜合以上的訊號處理過程，列出所有的訊號處理過程：

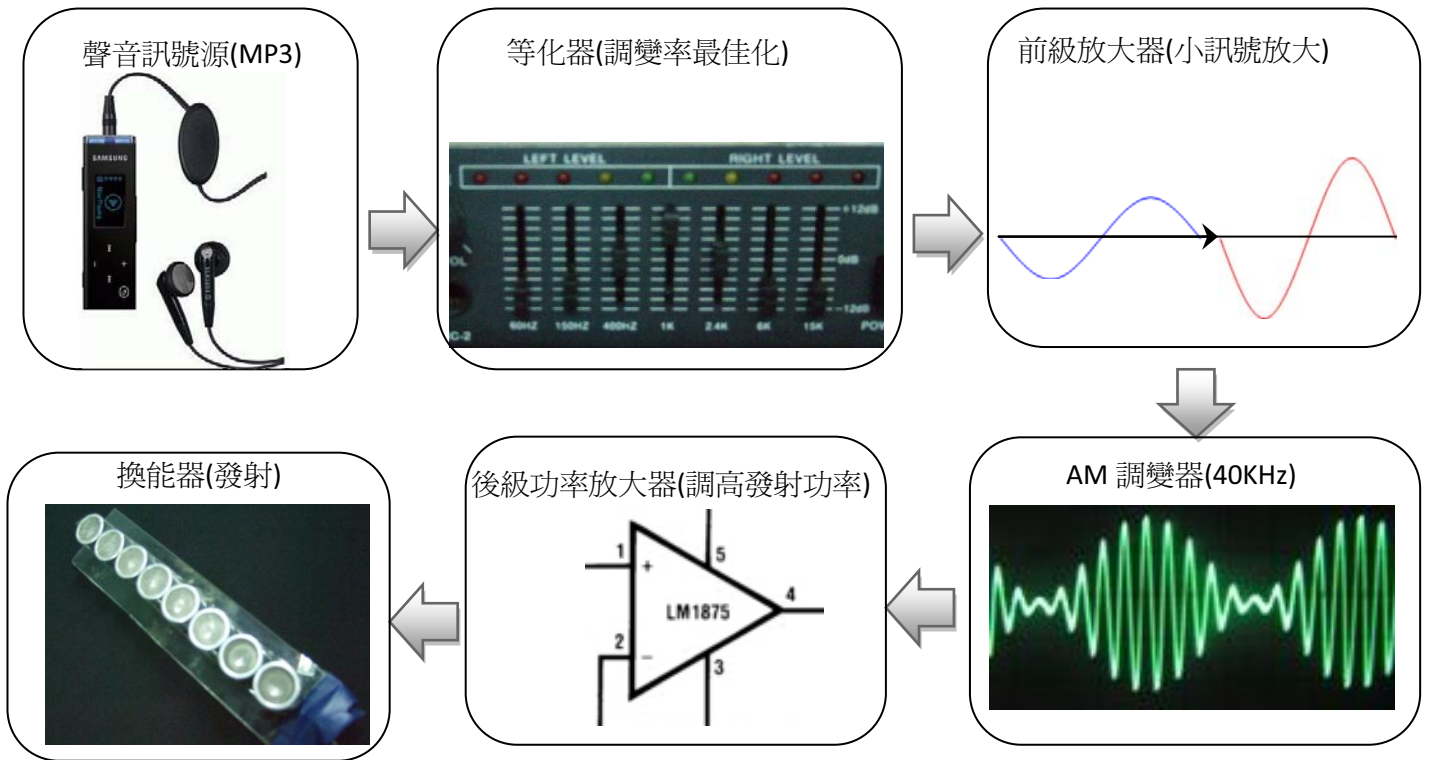
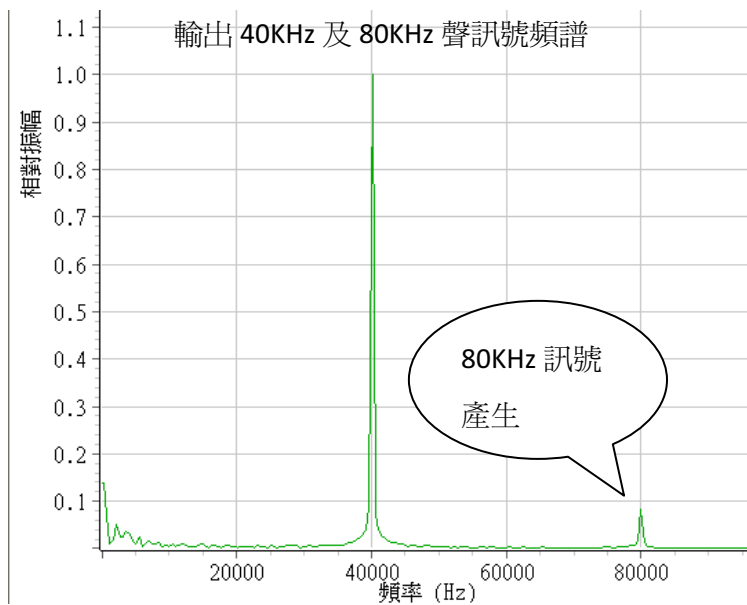
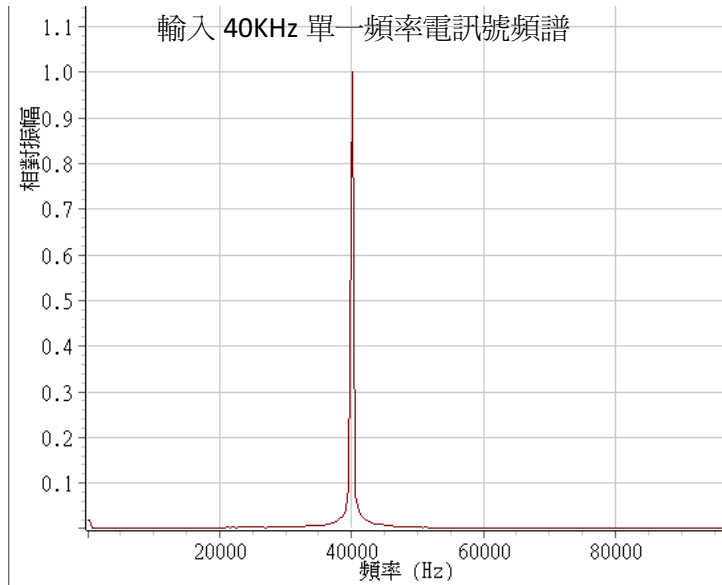


Fig 2-9-3 訊號處理過程

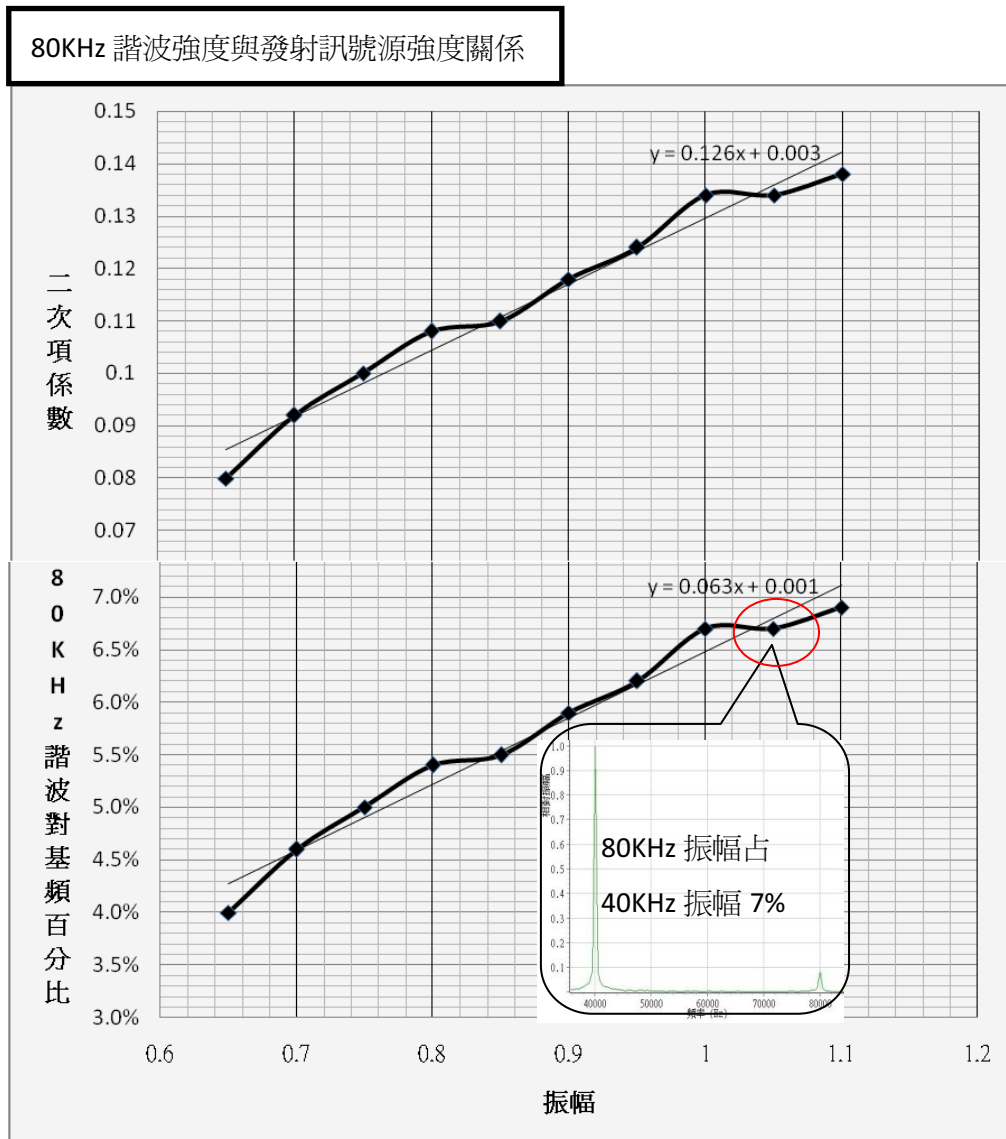
參、 研究結果與討論

一、超聲波振幅與傳輸距離對非線性效應之影響



由上圖可知，當 40KHz 純音超聲波換能器發射時，可以從頻譜儀中發現有 80KHz 的諧波出現，由文獻得知為聲音在空氣傳播時的非線性現象，接下來研究，改變感測接收器與發射器距離及改變輸入訊號強度，由頻譜中分析 80KHz 諧波強度與 40KHz 強度比值，是否會因此而改變？

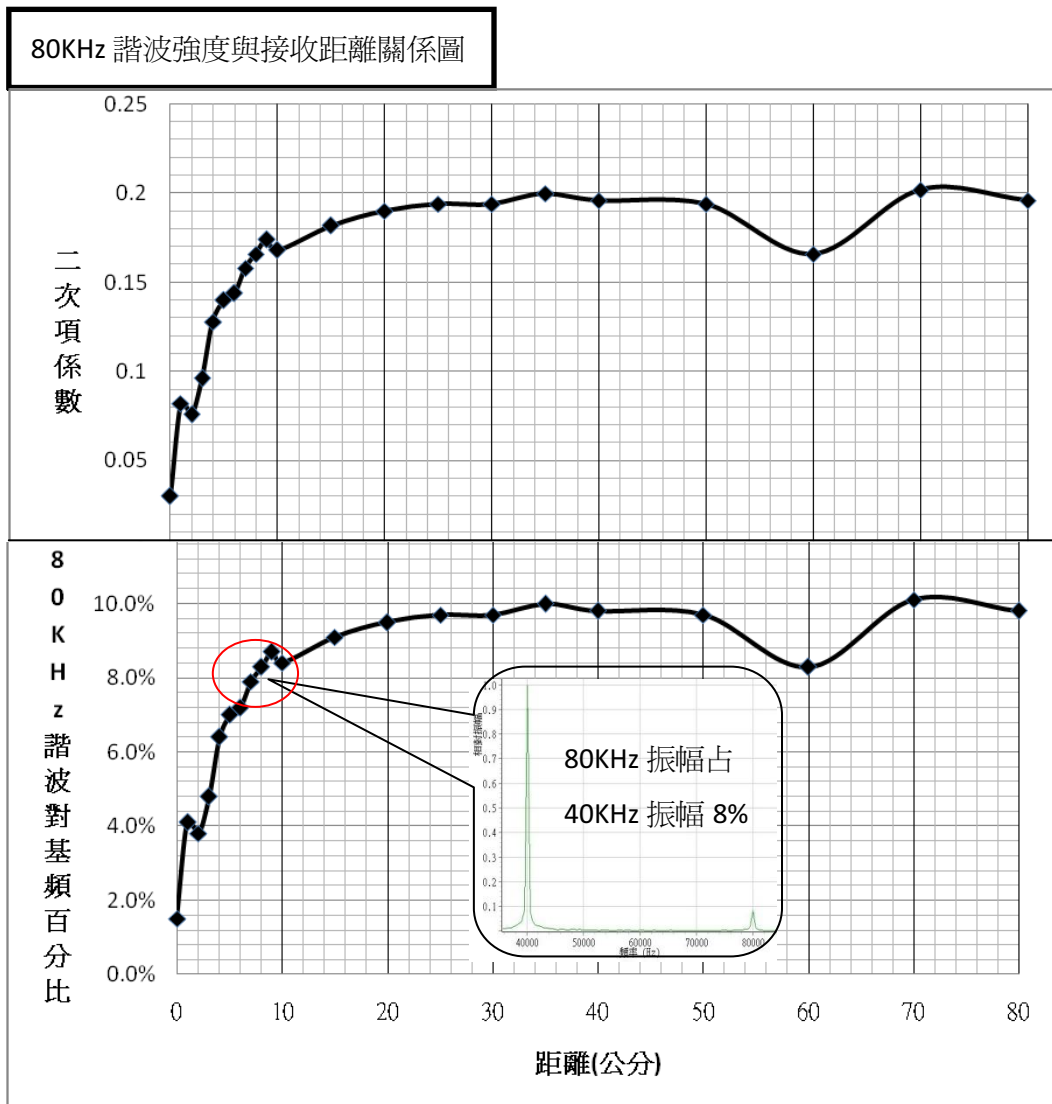
(一) 超聲波振幅對非線性效應之影響



當在固定的傳送距離下，改變給予超聲波換能器的訊號振幅；由上圖可知，當輸出給換能器的相對振幅越大，80KHz 相對於 40KHz 的強度就越高，由第(2.13)關係式中的二次項係數也越大，即訊號輸入強度與二次諧波強度成線性遞增關係。

這也意味著，當超聲波的聲音強度越高，所發生的非線性效應就越大。

(二) 40KHz 超聲波訊號傳送距離與非線性效應產生 80KHz 諧波關係

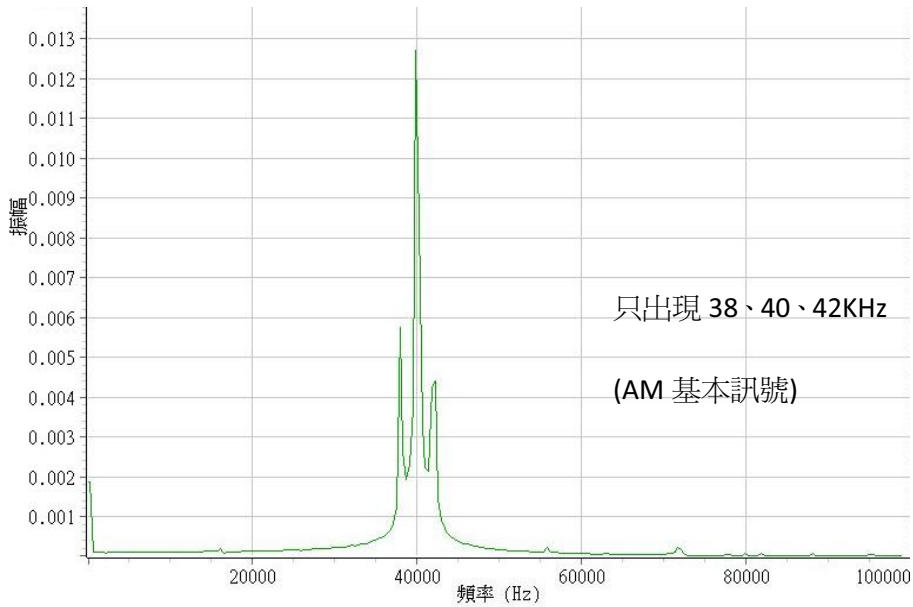


由 80KHz 諧波強度與 40KHz 強度比值圖中，可看出而 80KHz 諧波強度隨著距離增加成正比關係，距離在 0 至 20 公分時諧波振幅有快速增加之趨勢，而過 20 公分後諧波振幅趨於穩定，所以當超聲波傳送的距離越遠，所發生的非線性效應就越明顯。

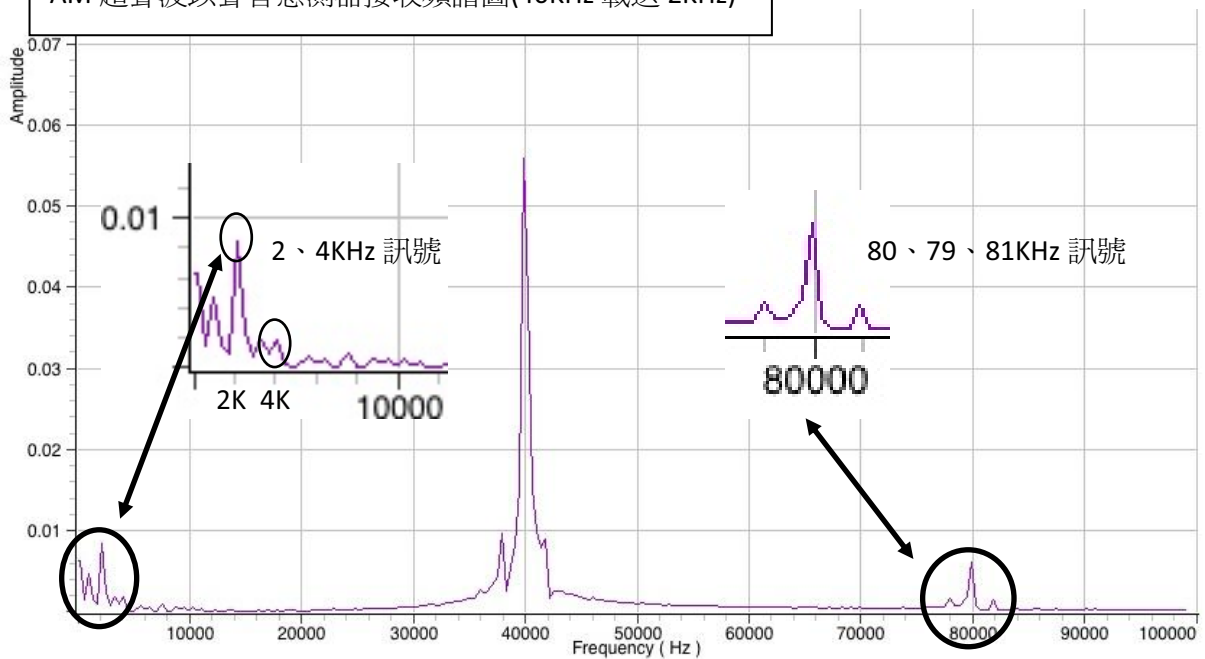
在先前文獻及推導中可知 40KHz 基頻分量係數為 K ，諧波分量的係數為 $K \frac{\varepsilon}{2}$ ，因此我們以 $\frac{80\text{KHz 振幅} \times 2}{40\text{KHz 振幅}}$ 算出二次項係數 (ε)；並發現二次項係數與距離成正比關係，數量級大約在 10^{-1} 次方。

二、發展 AM 訊號之非線性轉換數學模型

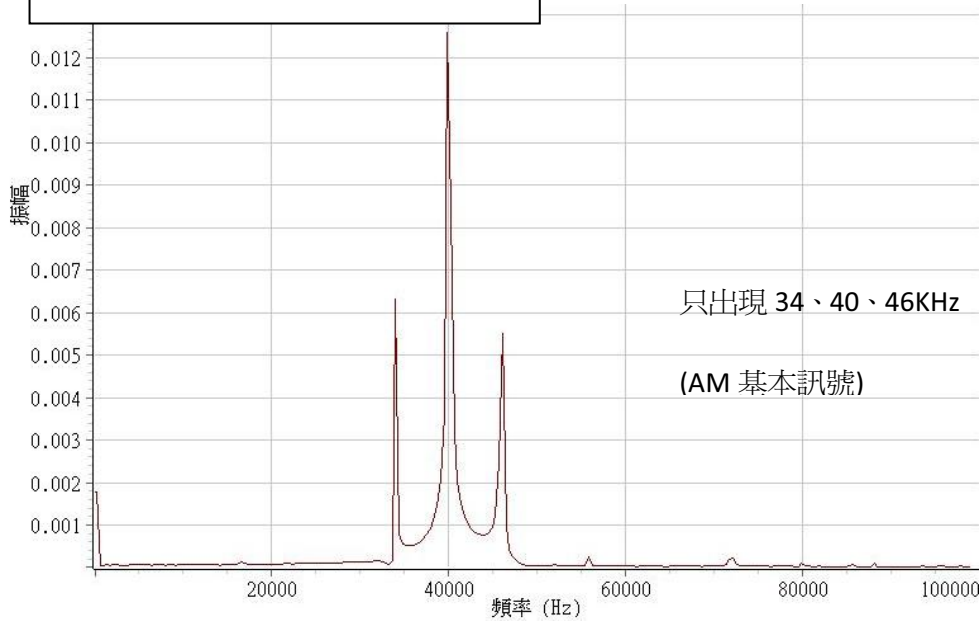
AM 訊號源頻譜圖(40KHz 載送 2KHz)



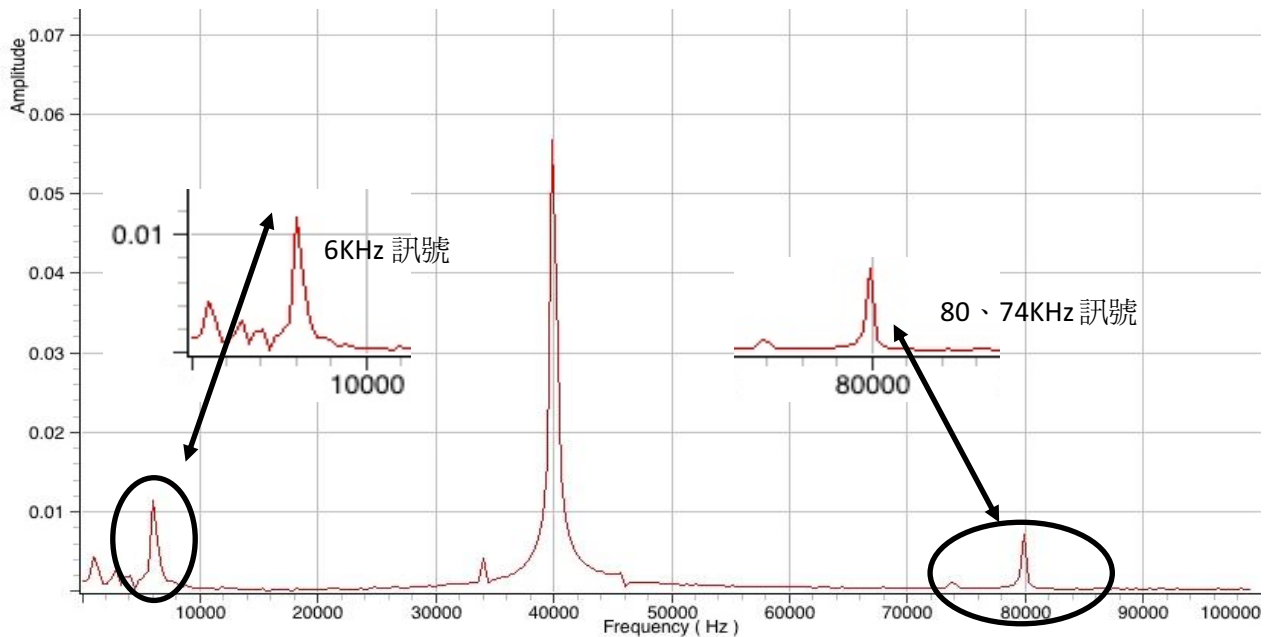
AM 超聲波以聲音感測器接收頻譜圖(40KHz 載送 2KHz)



AM 訊號源頻譜圖(40KHz 載送 6KHz)



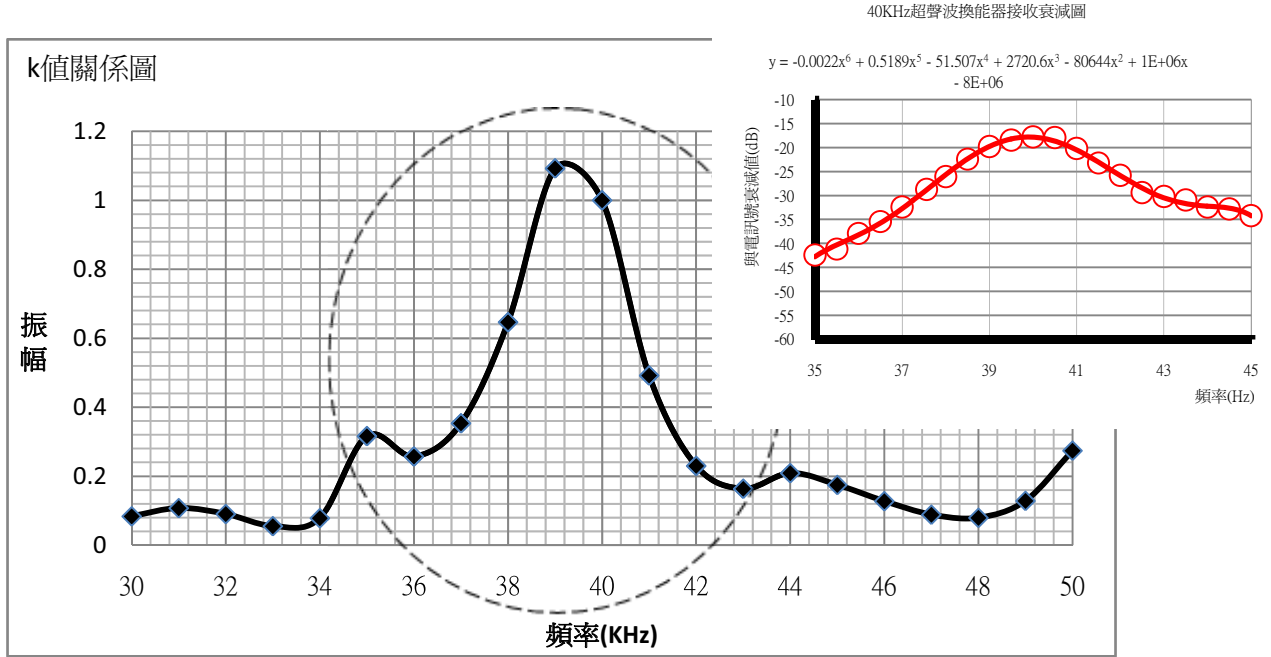
AM 超聲波以聲音感測器接收頻譜圖(40KHz 載送 6KHz)



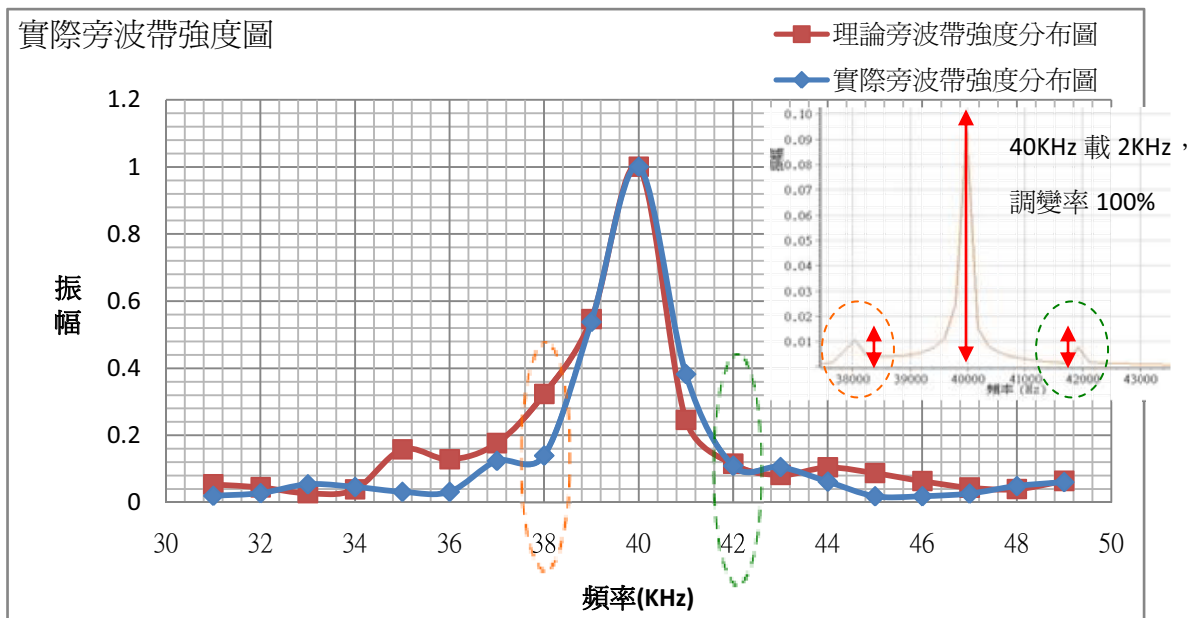
在 40KHz 載送 2K(6K)Hz 電訊號，經頻譜儀發現 AM 訊號源有三頻率：40KHz 載波、38K(34K)Hz 下旁頻帶與 42K(46K)Hz 下旁頻帶，這與先前文獻 AM 理論吻合。

但此 AM 訊號經由換能器發射後，再以聲音感測器接收，發現其頻譜多了原先訊號源所沒有的頻率；40KHz 載送 2KHz 的部分可發現 2KHz 可聽音、4KHz 可聽音倍頻、80KHz、78KHz 與 82KHz 訊號產生；40KHz 載送 6KHz 的部分也可發現 6KHz 可聽音、80KHz、74KHz 與 86KHz 訊號產生；這些頻率與我們提出的非線性模型所預測的頻率有相同處，證實可聽音是由非線性效應所產生的。

三、換能器的頻率響應對旁波帶強度影響



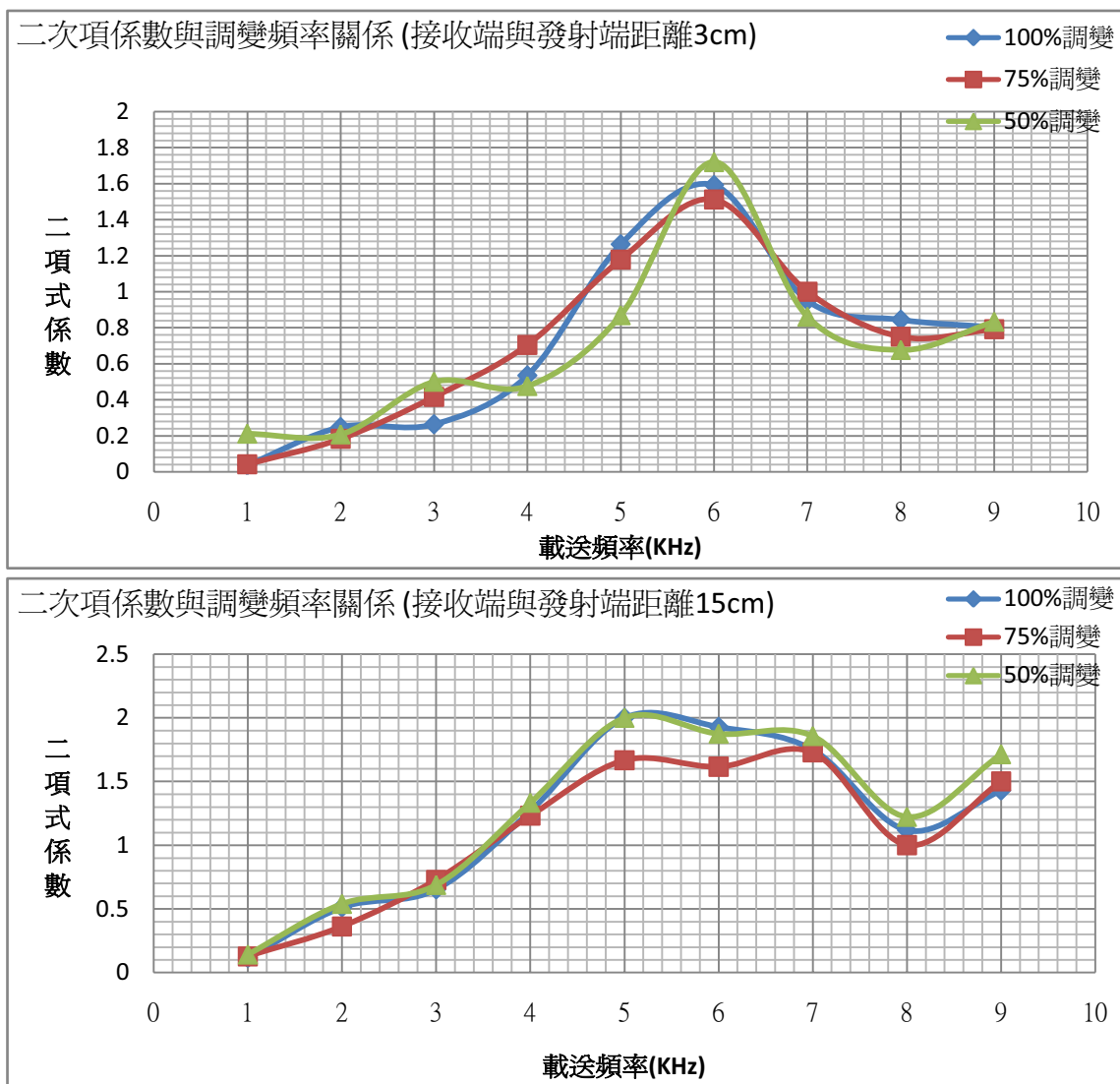
上圖是 k 值轉換圖，其中 41~50KHz 圍上旁頻帶的 k_2 ，39~30KHz 為下旁頻帶的 k_1 ，40KHz 為載波，本圖是以換能器與接收器的頻率響應為依據，採相對值方式，以 40KHz 的振幅定為 1，此系統在 40KHz 附近有較佳的響應，偏離 40KHz 越遠，響應越差。



有了頻率響應 k 值關係，就可以依第(2.15)關係式理論計算旁頻帶($\frac{km}{2}$)的振幅，所載送的頻率為 1KHz 時，可計算 39KHz、41KHz 旁頻帶的振幅；當所載送的頻率為

2KHz 時，能預測 38KHz、42KHz 旁頻帶的振幅，類推下去可得調變 1~9KHz 的旁頻帶強度圖(如上)，發現與實際情況的趨勢吻合，其旁頻帶強度，為與調變指數及換能器頻率響應乘積的一半，證實有載送的頻率距 40KHz 越遠旁頻帶越弱的現象，完全符合換能器頻率響應趨勢。

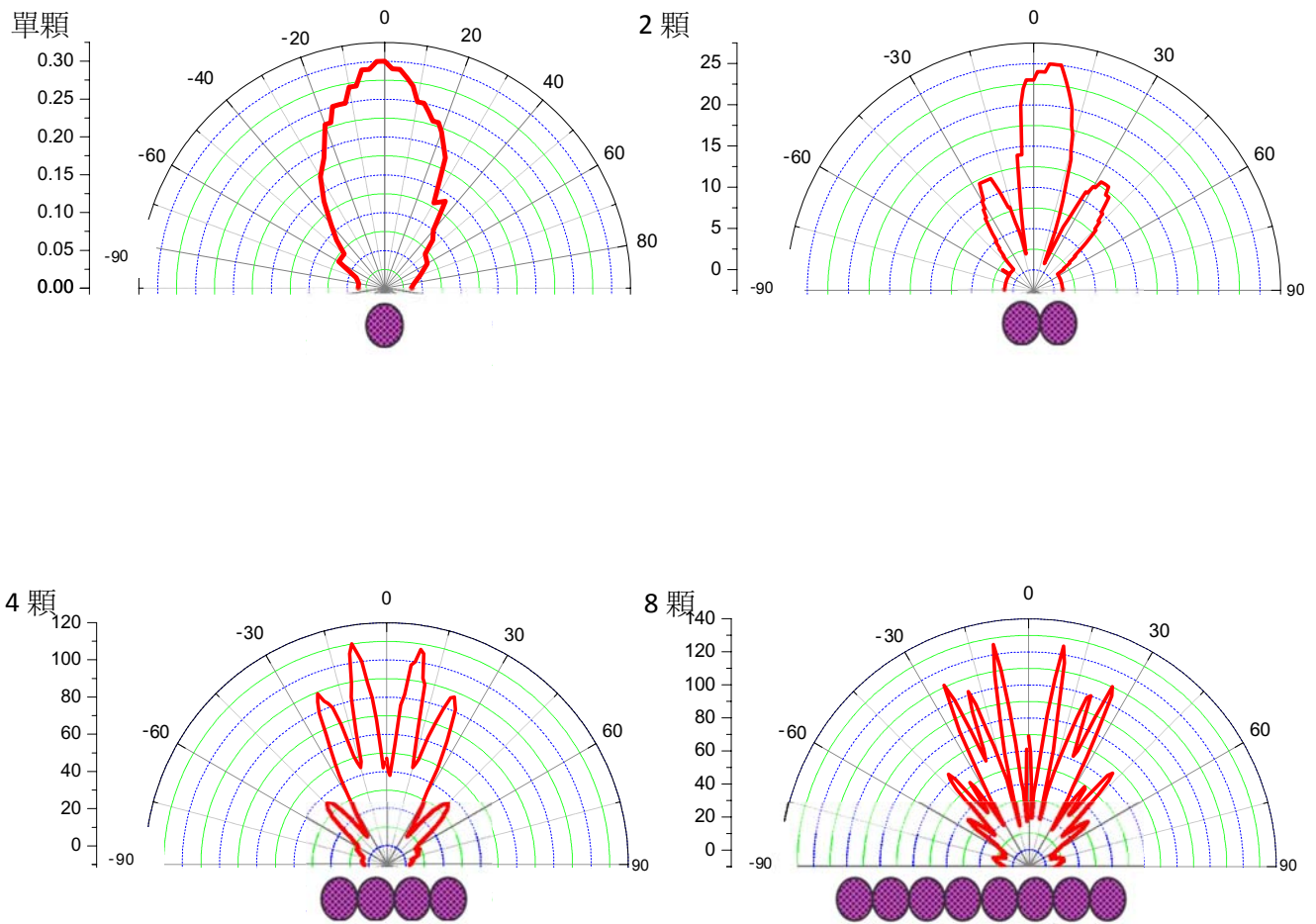
四、非線性係數與 AM 載送頻率關係探討



我們由解調出可聽聲強度與旁頻帶強度比值(式 2.16)，可求出非線性係數，由上圖發現，調變指數大小不會影響二項式係數大小；但所載送的頻率改變會影響二項式係數，其係數大小與調變頻率約成正相關，因此我們發現二項次係數除了傳輸距離跟振幅外，與調變頻率也有關係；在這張圖有三種調變率，三種都有類式的趨勢，所以證實調變指數不影響二項式係數。

五、超聲波與 AM 可聽音聲場指向特性分析

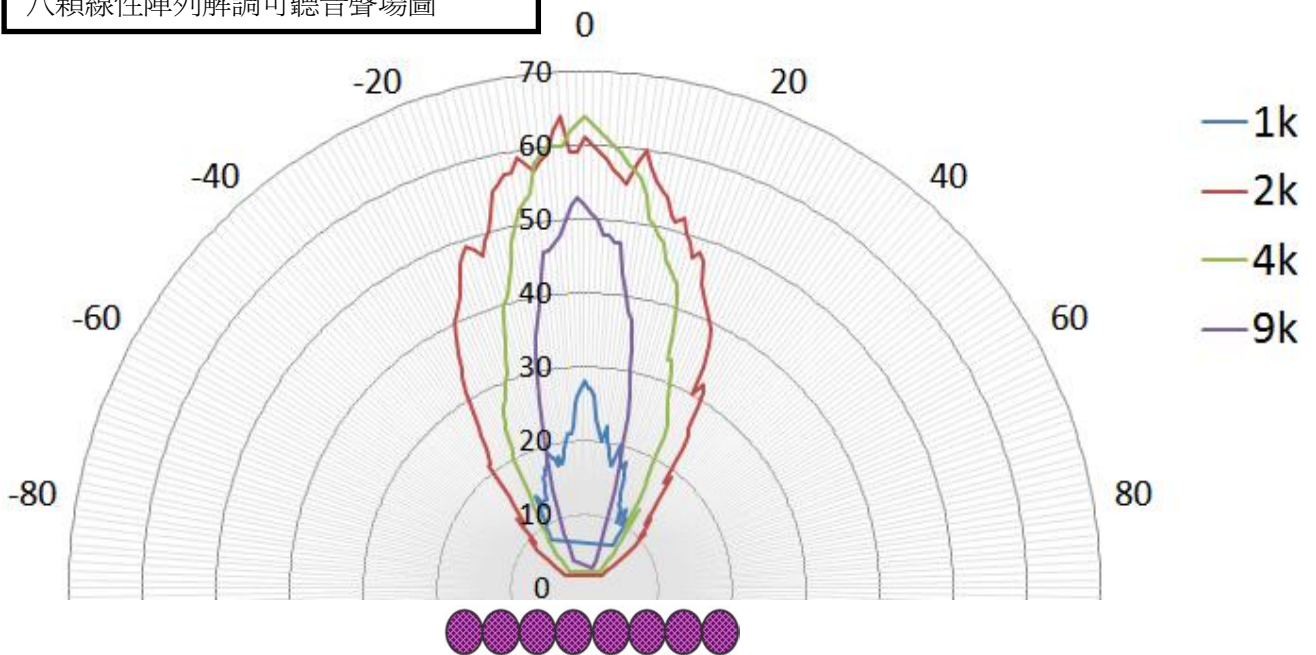
換能器線性陣列聲場圖



數量不同的換能器排成直線組成陣列聲場，上列每個聲場圖的右邊是振幅座標軸，圓周外圍座標是方位角，透過此圖形，可以知道各個方位角所對應的聲音強度。

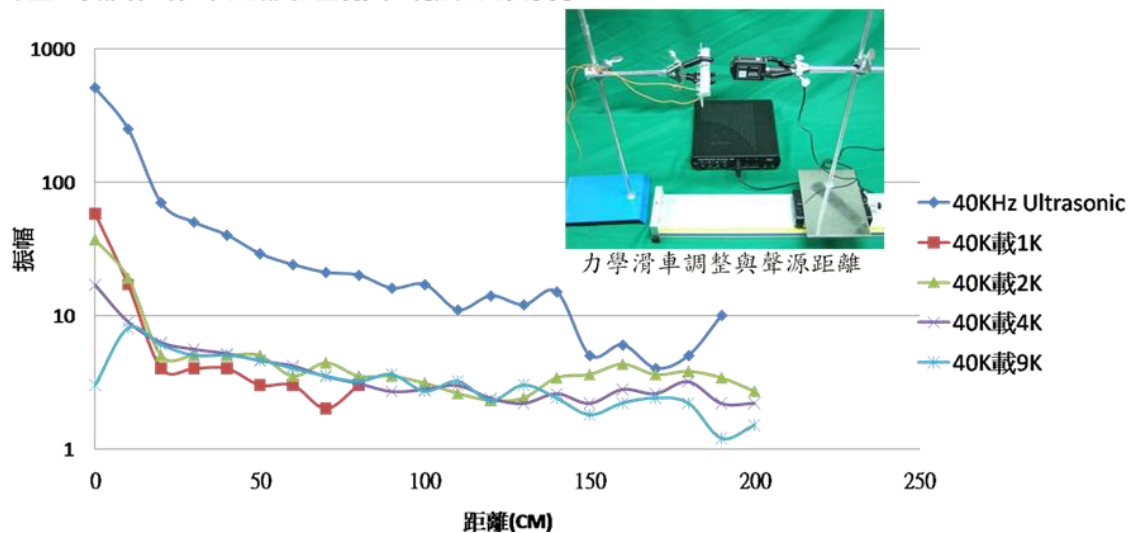
由圖可知，可以發現在單顆換能器中，超聲波具有良好的指向特性；當增加換能器數量時，發現聲場有複雜的干涉條紋，各個換能器之間有著明顯且複雜的干涉現象。

八顆線性陣列解調可聽音聲場圖



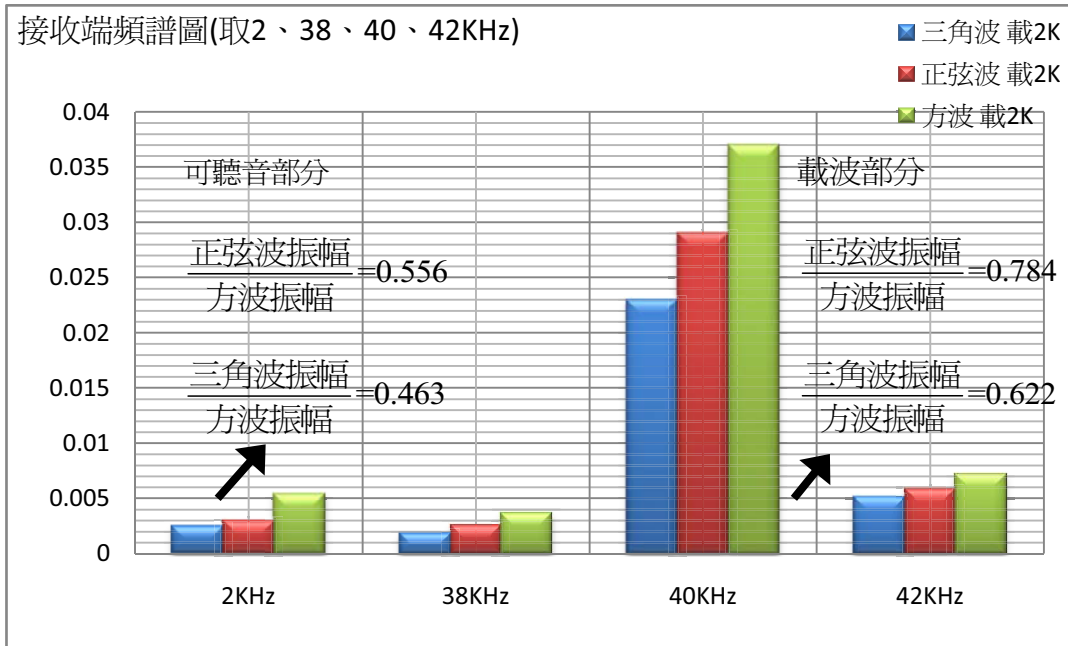
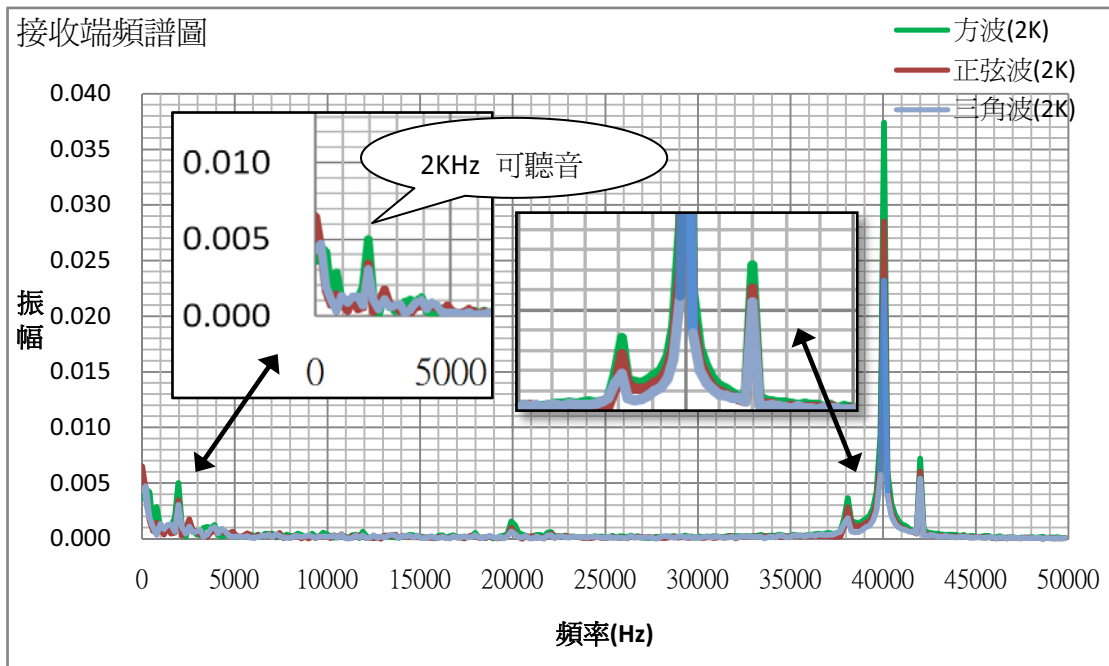
上圖中，縱座標軸為振幅，圓環座標軸為方位角；可以發現由超聲波調幅載波所解調出的可聽音均具有良好指向性的主瓣，而且頻率越高指向性就越好，雖使用8顆換能器陣列，但與先前實驗的純超聲波不同，在此聲場圖中沒有發現複雜的干涉現象。

超聲波與其載波距離與振幅關係



超聲波與解調聲音都會隨著距離的增加而衰減，但超聲波衰減的幅度比解調聲音大，說明解調後訊號沒有像超聲波一樣快速衰減之性質。

六、不同載波波形對解調可聽音之強度探討



由圖可發現，不論載波、上下旁頻帶、可聽音，方波的強度皆明顯強於正弦和三角波，雖然發射的電訊號源振幅一致，但在頻譜中，振幅是平均值，非峰值振幅，當換算方均根值討論時，方波的方均根值為峰值的 1 倍，正弦波的方均根值約為峰值的 0.707 倍，三角波的方均根值約為峰值的 0.557 倍，因此就訊號源而論，方波的功率就比其他兩者強，所以可以解釋以方波載波所產生的可聽音為最強。

肆、 結論

- 一、以 40KHz 的單一頻率訊號輸入換能器，會因為空氣中非線性效應，除了 40KHz 頻率以外，還由實驗可量測出 80KHz、120KHz 等其他頻率，其中非線性效應不但隨著輸入訊號強度增強而遞增，且與換能器距離越遠，而逐步增加至穩定。
- 二、我們由調幅載波理論，代入二階非線性數學計算，所發展出的數學模型，可以成功解釋超聲波調幅載波實驗，說明為什麼可解調出具指向性可聽聲的奇特現象；並且成功預測除可聽聲外，還有可聽聲的兩倍頻率訊號。
- 三、以 40KHz 超聲波調幅載送可聽聲，會在 40KHz 兩側旁形成旁頻帶，其旁頻帶強度，為與調變指數及換能器頻率響應乘積的一半，這實驗結果與理論數學模型計算十分吻合。
- 四、由理論模型計算得知，解調出可聽聲強度與旁頻帶強度比值，可求出非線性係數，由實驗觀測結果，其非線性係數與所載送可聽聲頻率高低約略成正相關。並且與換能器距離遞增而越遠而增加。
- 五、以八顆線性陣列發出 40KHz 超聲波形成，具有複雜干涉腹線與節線的聲場，但是由 40KHz 超聲波調幅載送可聽聲，所解調的可聽聲聲場，卻具強烈指向性的主瓣，且調幅解調可聽聲衰減率比純超聲波來的低。
- 六、以正弦波作為載波，所輸出的旁頻帶與調幅可聽聲強度較小；若換成方波作為載波，所輸出的旁頻帶與調幅可聽聲強度都大為增加。
- 七、在播放音樂或語音時可透過等化器，先將輸入可聽聲頻譜分佈強度修正；衰減低頻部分強度，並增強高頻部分強度部分，在經 40KHz 超聲波調幅載波後，才不會在低頻部分過調變而訊號失真，也不會在高頻部分調變不足而訊號過低。

伍、 參考資料

- 一、林明瑞.民 90.高級中學物理上冊.台南市.南一書局
- 二、徐淳毅.民 90 陣列喇叭的聲場研究.台北市科展高中物理特優
- 三、超聲波換能器產品型錄.台北縣.普威電子股份有限公司
- 四、Amplitude modulation 取自 <http://Wikipedia.org>
- 五、中國大百科全書” 非線性聲學”
- 六、曾順、羅俊良.民 92 通訊電學實習.台北縣.台科大圖書股份有限公司
- 七、陳順強、黃振麟.民 92.費因曼物理學.徐氏文教基金會
- 八、陳文山.民 90.電子學(一).全華科技圖書
- 九、陳威宏. “第三章：AM 調變與解調原理”
- 十、J.O. Norris. 2000 .Whitepaper: “Theory , History , and the Advancement of Parametric Loudspeakers” American Technology Corporation
- 十一、 Final Year Project 2005.” Acoustic Beam-Forming” . Prof- Minyue Fu
- 十二、 L.J.Black “A Physical Analysis of Distortion Produced by the Nonlinearity of the Medium” The Journal of The Acoustical Society of America

陸、 附錄

一、超聲波換能器詳細資料

Air Ultrasonic Ceramic Transducers

400ST/R160



Dimensions: dimensions are in mm

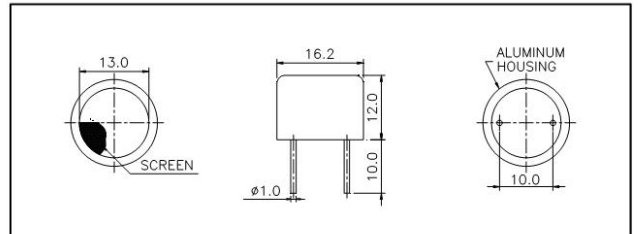


Fig 6-1 實體與尺寸圖

Impedance/Phase Angle vs. Frequency

Tested under 1Vrms Oscillation Level

- 400SR160 Impedance (Red solid line)
- 400SR160 Phase (Red dotted line)
- 400ST160 Impedance (Blue solid line)
- 400ST160 Phase (Blue dotted line)

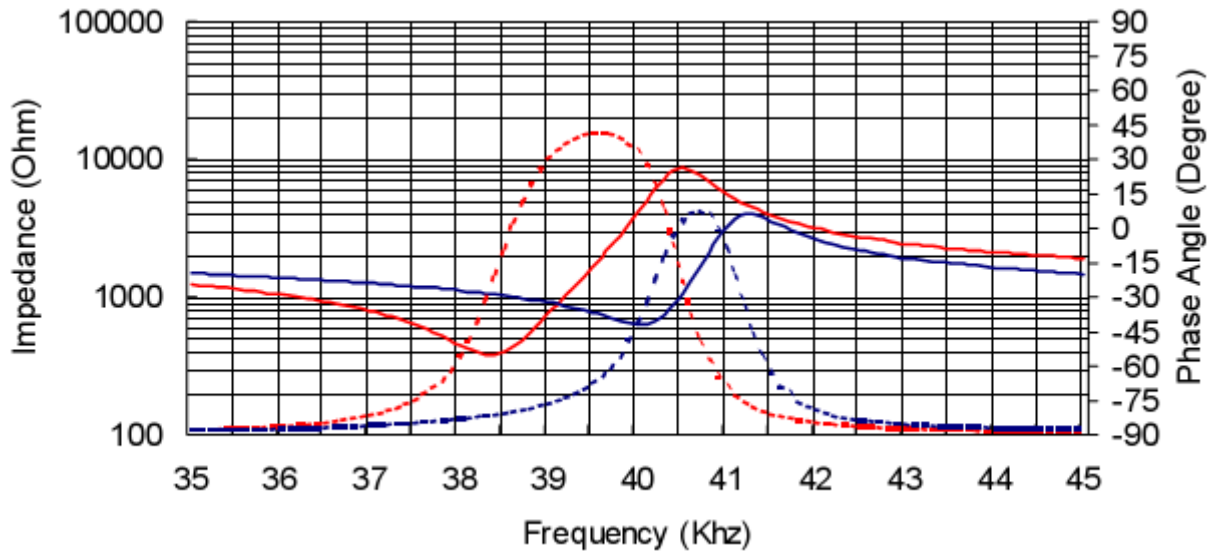


Fig 6-2 阻抗/相位角與頻率關係

Sensitivity/Sound Pressure Level

Tested under 10Vrms @30cm

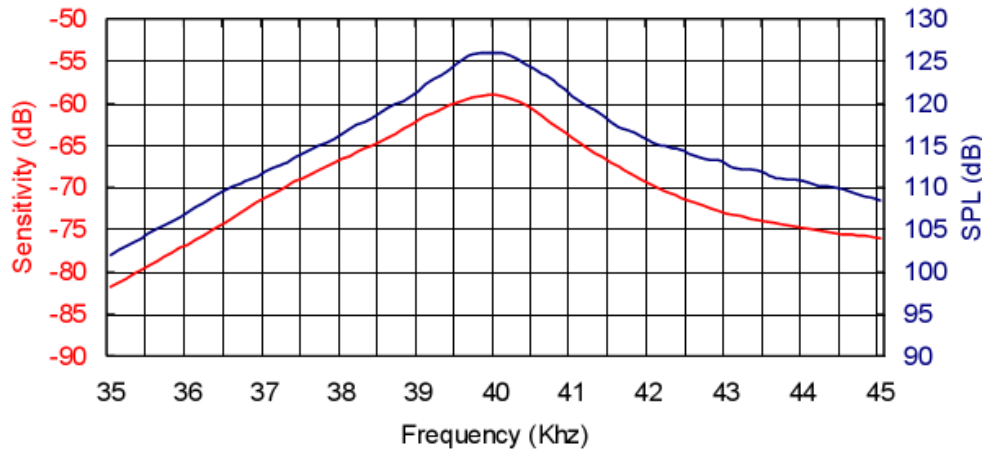


Fig 6-3 靈敏度/聲壓圖

Beam Angle: Tested at 40.0Khz frequency

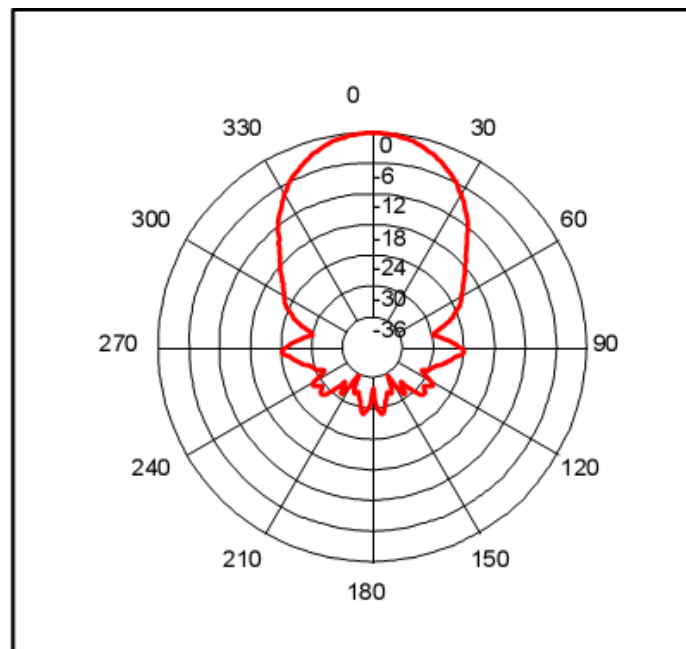


Fig 6-4 指向特性圖

SPL Variation vs. Driving Voltage

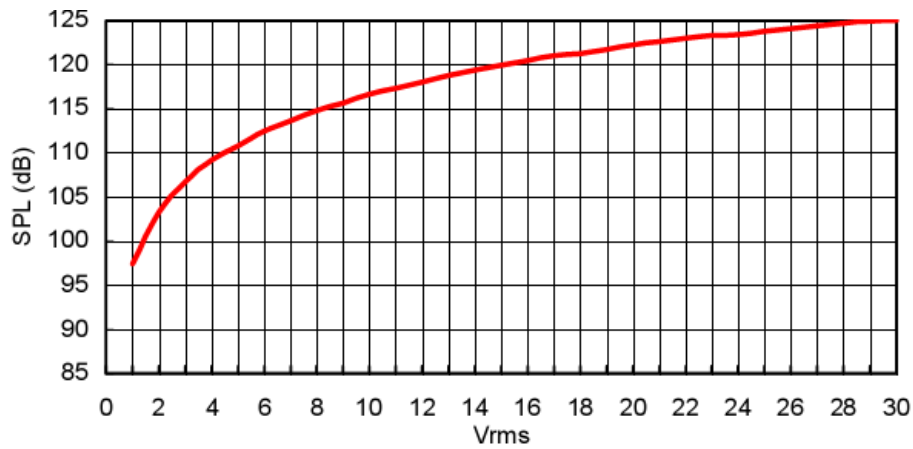


Fig 6-5 聲壓變化與驅動電壓關係

Specification

400ST160	Transmitter
400SR160	Receiver
Center Frequency	40.0±1.0Khz
Bandwidth (-6dB)	400ST160 2.0Khz 400SR160 2.5Khz
Transmitting Sound Pressure Level at 40.0Khz; 0dB re 0.0002μbar per 10Vrms at 30cm	120dB min.
Receiving Sensitivity at 40.0Khz 0dB = 1 volt/μbar	-65dB min.
Capacitance at 1Khz ±20%	2400 pF
Max. Driving Voltage (cont.)	20Vrms
Total Beam Angle -6dB	55° typical
Operation Temperature	-30 to 80°C
Storage Temperature	-40 to 85°C

All specification taken typical at 25°C
Closer frequency tolerance can be supplied
upon request.

二、訊號處理

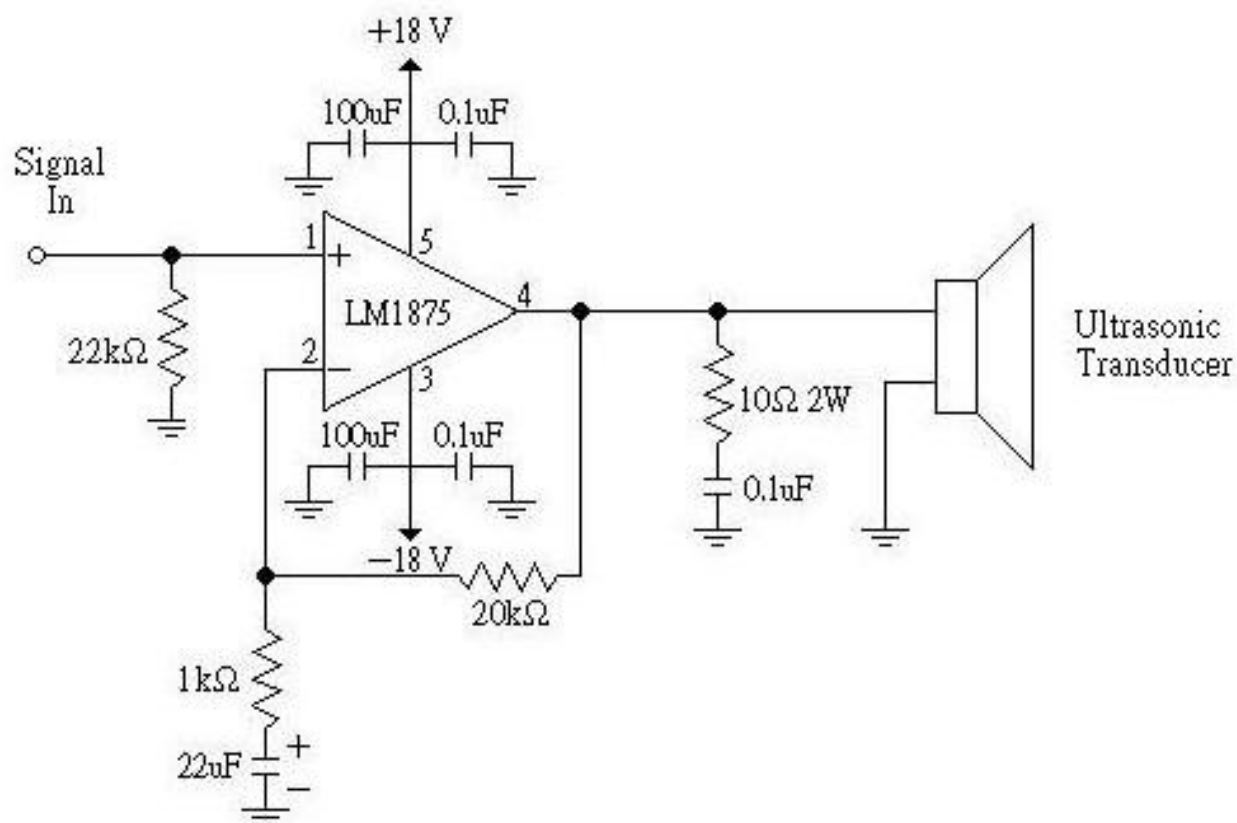


Fig 6-6 後極功率放大器電路圖

評語

優：理論模型與實驗數據相符。

缺：1) 本主題已有許多研究。

2) 聲波在空氣中傳遞之非線性現象為指導老師之想法，學生僅按表
量測而已！