

控制參數自動調變之噪音主動控制研究

Active Noise Control with Automatic Adjustment of Control Parameters

劉德源¹、楊哲綸²

¹ 國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系副教授

² 國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系研究生

摘要

本文主要是利用自適應濾波器原理，配合浮點式數位訊號處理器 TMS320 C6713 DSK 進行管道與三維開放空間之主動控式噪音控制(Active Noise Control, ANC)研究，並進行控制參數的自動調變。首先進行一維方形管道及三維開放空間聲場之噪音主動控制研究，以透徹了解自適應控制的基本原理，亦即將濾波器結構(本文採用有限脈衝濾波器結構，FIR)和自適應性算法(本文採用最小均方法，LMS)，以 C 語言將上述概念撰寫成程式，再由具即時(real-time)處理特性之數位訊號處理器作為整個硬體架構的核心，將真實世界連續性的類比聲音訊號，轉換成離散性的數位訊號，再送入演算法中作運算，以獲得欲求訊號。除了記錄降噪效果外，也將控制參數詳細記錄。在一維方形管道部份，單頻平均有 30dB 左右的降噪效果，雙頻最高也有 40dB 以上的降噪效果，帶頻方面於頻寬 25Hz、50Hz，個別降噪平均值為 24.34dB、8.21dB，於三維開放空間部分，單頻平均有 17dB 的降噪效果，雙頻有 15dB 以上的降噪效果。

接著兩個案例所取得的控制參數為基礎，包括收斂係數與取樣頻率，將控制參數由程式控制改變為自動調整的方式，再一次進行 ANC 實驗。經由這樣的改變與實驗成果，可省去許多手動調整控制參數的時間，很快取得最佳、最穩定的控制參數。由結果確定，C6713 DSK 可作為 ANC 商品化初期程式模擬計算與實驗設計之工作平台。

Abstract

The purpose of this paper is to conduct active noise control (ANC) experiment in duct and 3-D open sound space using the adaptive filter theory with digital signal processor (DSP) TMS320 C6713 DSK (DSP Starter Kit), and perform ANC experiment with automatic adjustment of control parameters. We first research the ANC of sound fields for one-dimensional square duct and three-dimensional open space field. We develop the programs of two componential elements of the adaptive filter, filter structure (FIR) and adaptive algorithm (LMS), into program with C language. Then we use real-time DSP as the core of whole hardware structure and transform the continuous analog sound signals into discrete digital ones. Finally, we can get the required signals using the control algorithm. Except the noise reduction, we also take down control parameters. In one-dimensional duct sound field, pure tone signals have average 30dB noise reduction; dual sine signals have the highest 40dB noise reduction. In band noise signals, the individual average noise reduction are 24.34dB and 8.21dB with bandwidth 25Hz and 50Hz. In three-dimensional open space, pure tone signals have average 17dB noise reduction; dual sine signals have over 15dB noise reduction.

Then we try to adjust two parameters with assembler for step-size and sampling frequency automatically. We can shorten time to attach the maximum control results instead of parameters adjustment in hand and results like this. Confirmed by the result, C6713 DSK can be used as the workbench for the initial programming simulation and experiment design of ANC commercialization.

壹、導論

噪音防治法規越來越嚴格，而如何有效的達成振動噪音的防治與研究工作一直是近代相當重要的課題。一般噪音控制可由下列三方面要素著手：噪音源(source)、噪音的傳播路徑(path)以及噪音接收者(receiver)。在解決噪音問題時，會先確認噪音源，並對上述三方面為基本要素去做考量，評估各種可能的噪音控制方式。主動式噪音控制(Active Noise Control, ANC) 為噪音控制方式之一：

主動式噪音控制的基本概念是由德國物理學家Paul Lueg(1898-1979)首先提出，主動式噪音控制對於低頻噪音的消除能在不改變系統的結構下而有較好的效果。這種技術的基本原理是由接收主要噪音源的噪音訊號，經由計算與預估，再同一物理環境下，即為相同位置處產生一個次級音源(secondary sound)，其特性與主要噪音源(primary sound)振幅相當，但方向相反向位差180度的反向聲波，與主要噪音源產生破壞性干涉，簡單的說就是利用噪音來消除噪音(fighting noise with noise)。而這一個簡單的概念在實際運用上就需要考慮到許多複雜的因素，像是聲場回饋(acoustic feedback)、第二路徑(secondary path)、系統識別(system identify)、喇叭頻率響應、喇叭及麥克風的空間位置及數量、聲場類型的不同、頻率範圍、時變特性，而在自適應性濾波器實行上，也需選擇其硬體介面、控制結構、演算法、濾波器階數、取樣頻率、收斂係數...等等[1-10]，而當維度增加時，整個系統的複雜度也隨之增加，而ANC系統算法的硬體實現，是以可達到即時(real time)處理的數位訊號處理器(Digital Signal Processor, DSP)，也因為從80年代左右，數位訊號處理技術、電子技術及積體電路技術漸漸興起，到至今的突破與發展，使得一直處於理論階段的ANC系統更能實際應用，符合現實實作的需求，也使得ANC的研究討論更為熱烈。主動式控制較常運用的技術是利用一套自適應性濾波理論，去辨識並且追蹤不確定性系統，是一種訓練及學習的方式去追蹤獲得符合系統的最佳權重，在濾波器結構方面有有限脈衝濾波器(Finite Impulse Response, FIR)及無限脈衝濾波器(Infinite Impulse Response, IIR)兩種[2]，而運算處理則以LMS法則為基礎，其方法簡單、計算量較低，但由於收斂過慢、調適誤差過大或是需更符合實際系統模擬等問題，其後有數種不同自適應算法及ANC系統控制模式的衍生。本文則是延續李家勳(2006)TMS320 C6713數位訊號處理器在噪音主動控制應用之研究[10-15]，收斂係數與取樣頻率，將控制參數由程式控制改變為自動調整的方式，再一次進行ANC實驗。

貳、噪音主動控制之基本理論

本文中主動式噪音控制系統上所使用到的理論方法為自適應控制基本原理，包含了濾波器結構和自適應性計算法則，而實際進行ANC實驗時會受到第二路徑影響、聲場回饋影響、各電子元件及電路產生的失真、麥克風及揚聲器所擺放的位置及動態響應...等之影響。考慮第二路徑預估值 $\hat{h}_s(z)$ 做濾波的動作，亦即事先考慮第二路徑的影響，因此在濾波器的輸出 $y(n)$ 會包含第二路徑的特性。關鍵式子如下:[2,10]

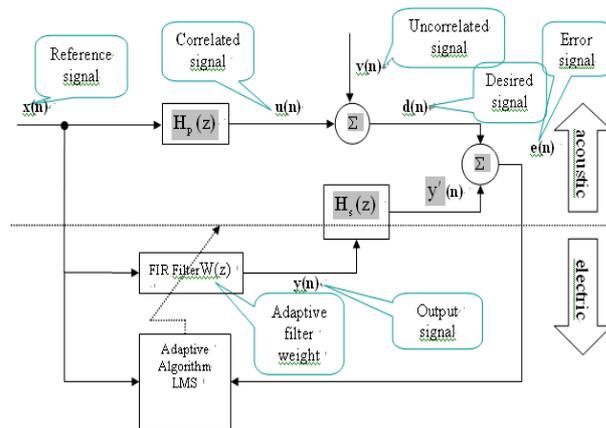
$$x'(n) = h_s(n) * x(n)$$

分別為FXLMS方法

$$w(n+1) = w(n) + \mu x'(n)e(n)$$

及FXNLMS方法

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\alpha}{P_x(n)} x'(n)e(n)$$



參、實驗架構及配置

本文在實驗部分主要可分為三大部分，分別為：1.一維方形管道ANC實驗，2.三維開放空間ANC實驗，3.自動調整控制參數之ANC實驗。其中，先做一維方形管道消除噪音之實驗，以透徹了解自適應控制的基本原理，亦即將適應性濾波器的兩個組成元素，即濾波器結構(本文採用有限脈衝濾波器結構，FIR)和自適應性算法(本文採用最小均方法，LMS)，以德州儀器(Texas Instruments，TI)隨DSK卡所提供的作業平台C6713DSK CCS 2.0所支援的C語言程式編譯，將上述概念撰寫成程式，再由具即時(real-time)處理特性之數位訊號處理器(DSP)作為整個硬體架構的核心。以自製方形管道為實驗聲場，並進行許多ANC要素之討論，即第二路徑的影響、聲場回饋、系統識別、揚聲器之頻率響應，因此隨後將演算法換成考慮第二路徑的FXLMS方法，因此在進行實驗前，也將先做離線的系統識別。之後再以錄音方式嘗試控制日常生活中常見的特殊噪音，以及一般環境的ANC實驗。最重要的是，藉此實驗取得各頻帶ANC的控制參數與數據並加以整合，最後再調整程式將控制參數改為自動調整，再進行ANC實驗觀察其成效。

本文實驗案例有兩個聲場模式，分別為：一維方形管道聲場與一般三維開放空間聲場。

1 一維方形管道聲場模型製作

一維自製木質方形管道 ANC 實驗，如圖 2，方形管道全長為 245 公分，方管最前端挖一與喇叭徑長相等之圓形孔洞(直徑長 13 公分)，以設置主要噪音源喇叭，於離前端主要噪音源喇叭 15 公分處鑽一小孔洞用以設置參考麥克風，於 112 公分處亦挖一孔洞設置控制喇叭，於 120 公分處鑽小孔洞用以設置誤差麥克風，於 245 公分處為開口端，管道內徑截面積寬為 20 公分;高為 16.5 公分，全管是以 1.75 公分厚之木板製。

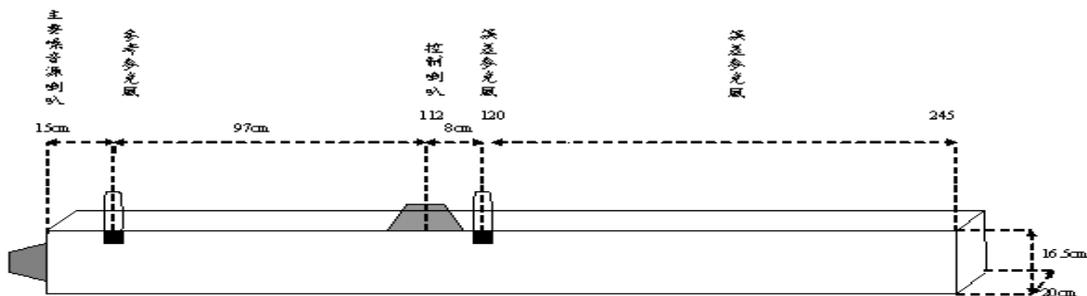


圖 2 一維方形管道聲場模型尺寸圖。

2 三維開放空間聲場

在此所謂的一般環境，簡單地說即是日常生活中隨處可見的空間。由於在我們平常身處的環境，有著許許多多的電器用品，或許我們不一定聽得見，又或者時間一久，漸漸習以為常。但實驗用的參考麥克風和誤差麥克風，可以將這些訊號確實捕捉並且呈現出來。正因如此，在這樣三維空間又不單純的環境下進行ANC實驗，碰到的問題和干擾相對就高上許多。在本系音響實驗室之下的研究室架設儀器，嘗試進行ANC實驗。簡單地將兩個揚聲器擺放在研究室內的桌子上，距離地面85公分，麥克風亦架高85公分，且與揚聲器距離10公分；主要噪音源喇叭和控制喇叭相距55公分。

肆、實驗結果與結論

本章說明三個實驗案例的控制結果以及小結，實驗結果包含：誤差麥克風所接收誤差訊號控制前後頻譜圖、不同收斂係數之控制結果、不同取樣頻率之實驗結果。在各案例中，以單頻訊號、雙頻訊號及帶頻訊號及冷卻水塔噪音作為主要噪音源訊號，討論頻率範圍為200Hz至1000Hz，文中將對各種不同情況下之控制結果進行討論及比較。

1 一維方形管道 ANC 實驗之結果與討論

為了在進行自動調整控制參數之ANC實驗時事半功倍，因此在進行自動調整控制參數之ANC實驗前，先進行一維方形管道ANC實驗。除了能更深入了解自適應控制的基本原理，也能練習DSP平台實作上會遇到的問題，以及透過實驗成果與數據使往後的控制更有效率。一維方形管道ANC實驗，係以最簡單LMS演算法及空間前饋式結構開始著手。此階段量測出的控制效果並不是非常理想，在頻率200Hz與400Hz時有較好的控制效果，但是控制卻相對容易產生發散，且由於取樣頻率較低，雜訊也比較多；而在500Hz與1000Hz控制相對較為容易但效果卻稍差，但是雜訊就來得比較少。就實驗數據的觀察，各個頻帶控制的效果相差並不是很大，可藉由這些數據，了解到收斂係數 μ 、濾波器階數 N 及取樣頻率這些參數，對控制效果有何影響。在第一階段的實驗後，對控制效果較不理想的結果，做了一些觀察和探討後，將不成功的原因歸咎於，影響主動式噪音控制的兩大要素，亦即第二路徑影響與聲場回饋影響。與李家勳[52]所做的結果有不小的出入，推測實驗時所處聲場不同應是最大的因素。以下分別是單頻訊號、雙頻訊號及帶頻訊號，作為主要噪音源的控制結果。由於主要目的只是取得適當之控制參數，故選擇的頻帶僅如下，單頻分別有：200Hz、400Hz、500Hz及1000Hz。雙頻訊號即是單頻訊號包含頻率的組合，共6組。帶頻訊號則是有頻率中心：200Hz、500Hz二種，帶寬有25Hz、50Hz及二種。實驗結果如下：

表1 一維方形管道(單頻)噪音降低量之列表

頻率(Hz)	降低量(dB)
200Hz	49.49
400Hz	37.23
500Hz	28.96
1000Hz	32.57

表 2 一維方形管道(雙頻)與一維方形管道(帶頻)噪音降低量

頻率(Hz)		降低量(dB)	中心頻率(Hz)		降低量(dB)
200Hz+400Hz	200Hz	46.28	200Hz	25Hz	29.51
	400Hz	34.54		50Hz	11.31
200Hz+500Hz	200Hz	47.76	500Hz	25Hz	19.17
	500Hz	29.38		50Hz	5.11
200Hz+1000Hz	200Hz	42.24		1000Hz	30.33
400Hz+500Hz	400Hz	26.95			
	500Hz	27.02			
400Hz+1000Hz	400Hz	25.96			
	1000Hz	26.63			
500Hz+1000Hz	500Hz	26.32			
	1000Hz	30.33			

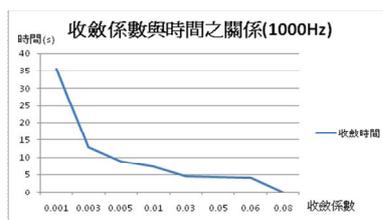
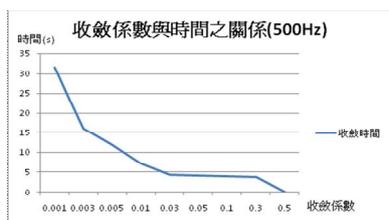
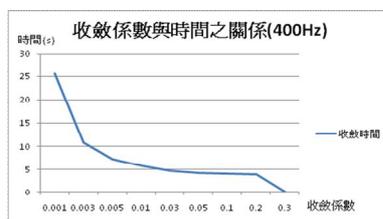
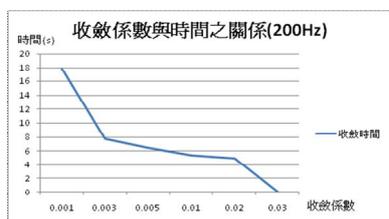


圖 3 單頻訊號收斂係數與時間之關係圖

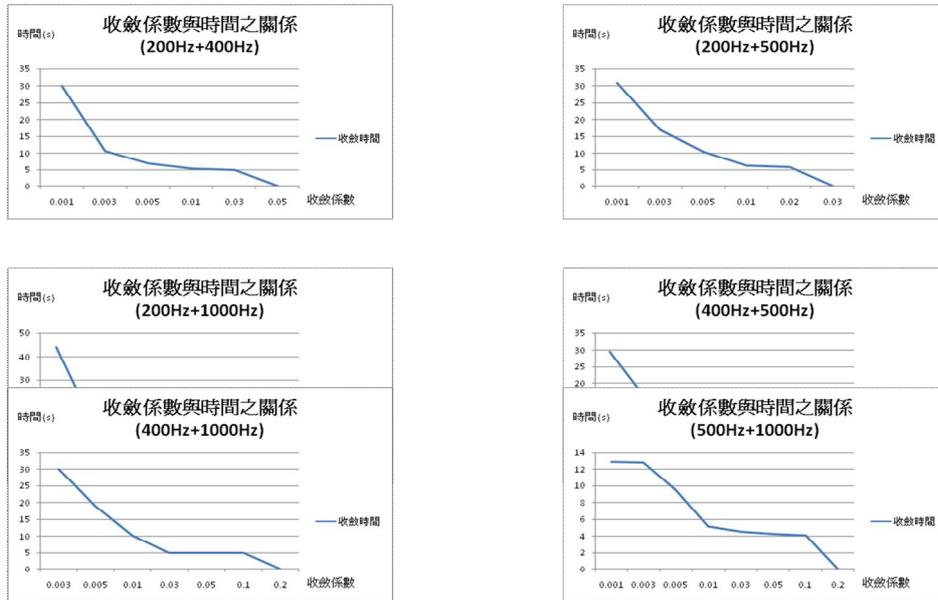


圖 4 雙頻訊號收斂係數與時間之關係圖

2 三維開放空間 ANC 實驗之結果與討論

在結束了一維方形管道之ANC實驗之後，為了驗證此DSP平台在實作時並不受限於單純的聲場，因此將麥克風及揚聲器移出管道，在放置管道的研究室直接架設並進行ANC實驗。也藉此實驗取得在不同聲場時，各控制參數的變化以及比較。在選擇的頻帶方面，單頻分別有：200Hz、400 Hz、500Hz及1000Hz。雙頻訊號在此捨去200Hz，只以其他三種頻率進行組合，共3組，原因在下列結果中一併討論。

表 3 三維開放空間(單頻)噪音降低量之列表

頻率 (Hz)	降低量 (dB)
200Hz	12.76
400Hz	14.11
500Hz	15.42
1000Hz	25.86

表 4 三維開放空間(雙頻)噪音降低量之列表

頻率 (Hz)		降低量 (dB)
400Hz+500Hz	400Hz	10.90
	500Hz	17.72
400Hz+1000Hz	400Hz	13.51
	1000Hz	21.12
500Hz+1000Hz	500Hz	19.55
	1000Hz	21.81

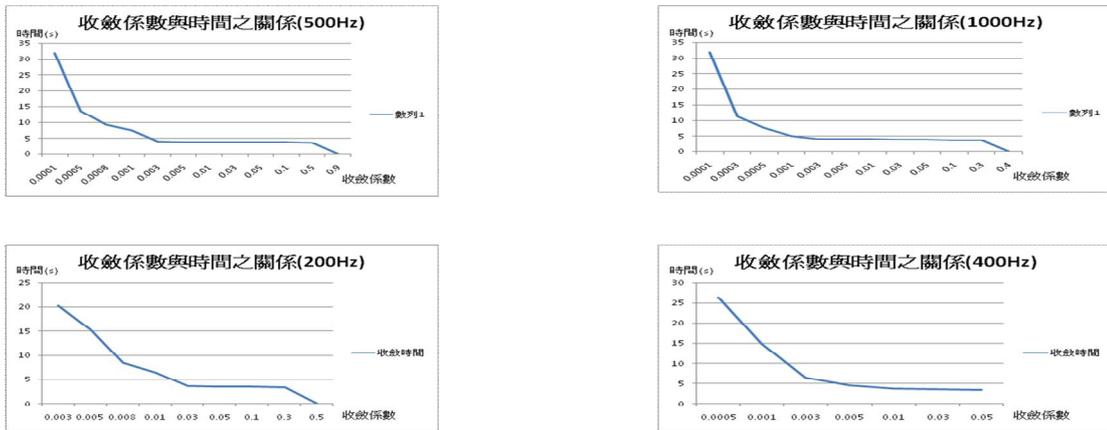


圖 5 單頻訊號收斂係數與時間之關係圖

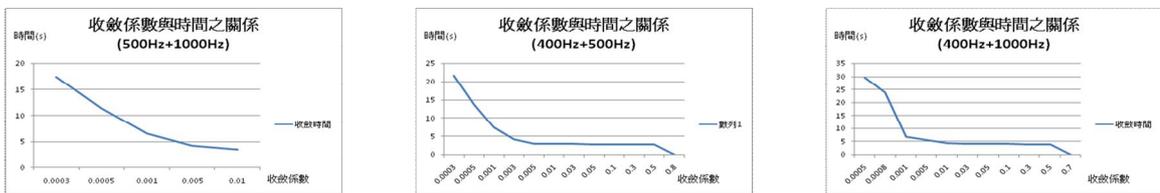


圖 6 雙頻訊號收斂係數與時間之關係圖

3 自動調整控制參數之 ANC 實驗之結果與討論

由前面兩個案例的結果可以發現，收斂係數與取樣頻率對系統控制結果有相當大的影響。藉由程式自動調整控制參數的過程並不如想像中順利。礙於 TMS320 C6713 DSK 本身的限制，對於取樣頻率的宣告必須是實數，不能以代數或者變數的方式呈現，因此只能退而求其次，藉由前兩個案例的經驗，改變程式讓使用者可以一次輸入兩組取樣頻率並藉由收斂或發散的判別決定使用哪一組取樣頻率。雖然與理想中的結果有所出入，但實際測試的效果也算不錯。經由前兩個案例實際操作的經驗，整理出噪音訊號與誤差訊號在系統收斂及發散時的相對關係，並配合各個頻率收斂係數改變時控制速度、與系統收斂或發散的整理，將收斂係數程式控制，以 0.005 為初始值，每次遞增 0.0001，取得各個頻帶最佳、最穩定的收斂係數。實驗以一維方形管道為實驗聲場，另外為了驗證自動調整係數的可行性，除了原先的四個單頻訊號，另外加入了三組單頻訊號。由實驗結果可以發現，與第一次在一維方形管道的實驗結果不盡相同，在衰減效果與取樣頻率都有變化，再次說明此一系統雖然都能達到預期的控制效果，但卻不夠穩定，也說明了噪音主動控制的系統是牽一髮而動全身。在實驗內容方面，單頻分別有：原先的 200Hz、400 Hz、500Hz 及 1000Hz；另外又加入了 125Hz、250Hz、625Hz 三個單頻訊號。雙頻訊號即是單頻訊號包含頻率的組合。

表 5 自動調整參數(單頻)噪音降低量之列表

頻率	收斂係數	取樣頻率	降低量(dB)
200Hz	0.0227	96kHz	35.46
400Hz	0.0084	96kHz	28.36
500Hz	0.0574	96kHz	26.43
1000Hz	0.0482	48kHz	28.95
125Hz	0.0208	16kHz	30.32
250Hz	0.0519	48kHz	25.75
625Hz	0.0807	96kHz	18.22

表 6 自動調整參數(雙頻)噪音降低量之列表

頻率(Hz)		μ	f_s	降低量(dB)
200Hz+400Hz	200Hz	0.0226	96kHz	38.41
	400Hz			19.37
200Hz+500Hz	200Hz	0.0277	96kHz	37.16
	500Hz			19.59
200Hz+1000Hz	200Hz	0.0282	32kHz	38.35
	1000Hz			21.68
400Hz+500Hz	400Hz	0.0309	96kHz	21.24
	500Hz			20.98
400Hz+1000Hz	400Hz	0.0187	96kHz	18.13
	1000Hz			26.58
500Hz+1000Hz	500Hz	0.0093	16kHz	24.73
	1000Hz			20.83
125Hz+250Hz	125Hz	0.0192	16kHz	28.30
	250Hz			17.49
125Hz+625Hz	125Hz	0.0172	16kHz	27.47
	625Hz			16.22
250Hz+625Hz	250Hz	0.0138	16kHz	20.37
	625Hz			16.99

伍、結論與展望

經由一維方形管道與三維開放空間ANC實驗，綜合其結果以結論與展望說明如下：

結論

1. 本文在一維方形管道及三維開放空間建立ANC系統，已驗證其可行性。至於影響系統的聲場回饋現象，採用如下的方式應對：以電訊直接輸入，亦即類似非聲學感測器的方式作問題的解決。
2. 管道ANC之實驗結果顯示，在200Hz~1000Hz的頻率範圍下，於單頻皆有不錯的降噪效果，皆在20dB以上。在雙頻方面，在6組案例中，也皆有25dB以上的消音效果。帶頻方面，於頻率中心200Hz、500Hz二組案例結果顯示，頻寬為25Hz及50Hz，個別降噪數值為29.51dB、11.31dB、19.17dB及5.11dB。
3. 三維開放空間ANC之實驗結果顯示，在200Hz~1000Hz的頻率範圍下，受限於訊號強度太弱、衰減太快的緣故，降噪效果並不突出，但結果相當明顯也很穩定。在雙頻方面，在3組案例中，除了400Hz以外，也皆有15dB以上的消音效果。此組實驗中有一定之降噪效果，系統整體的穩定性以及在各複雜聲場仍能達到控制效果的結果才是最重要的，本文初步發現是可行的。
4. 在ANC實驗過程，可先由了解單頻噪音下的控制情況，獲得在各噪音頻率而能達到控制效果時的演算法參數，再經由這些經驗參數，方便的找到雙頻、多頻或者是帶頻這些較複雜噪訊的有效控制參數。
5. 前兩個實驗案例在單頻、雙頻及帶頻皆有不錯的控制效果，顯示了噪音主動控制在不同噪音下的可行性。
6. 經由自動調整控制參數的實驗成果，使得在進行ANC實驗時能加速取得最佳控制參數的時間，更加使得C6713 DSK在ANC商品化初期的程式模擬與設計有相當大的助益和發展空間。

展望

1. 在本實驗案例中，討論之頻率範圍都在1000Hz以下。因此如有低通率波器能將其不需要的高頻部分去除，必能減少高頻部份對控制效果的影響。在小於100Hz以下之電噪，也需有接地設施，將之去除。如此，想必能達到更好的控制效果。
2. 功率放大器部分，建議採用配有數位式調整增益的功能，因為在各實驗案例中，增益大小的固定對控制效果有相當大的影響。
3. 本文在自動控制程式方面仍有許多改善的空間，可試著加快取得最佳參數的速度或者以不同的控制方式做自動調整。

陸、參考文獻

- [1] Olson, H. F. and May, E. G., "Electronic sound absorbers," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 6, pp.1130-1136, 1953.
- [2] Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan, "Active Noise Control Systems Algorithms and DSP Implementations", John Wiley & Sons, 1996.
- [3] B. Widrow, M.E. Hoff, "Adaptive Switching Circuits," IRE WESCON Conv. Rec, part4, pp.96-104,1960.
- [4] Widrow, B et al. ,"Adaptive Noise Canceling: Principles and Application," Proc. IEEE, Vol.63, NO.12, pp.1692-1716, 1975.
- [5] B. Widrow, S.D. Stearns, "Adaptive Signal Processing," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [6] J.C. Burgess, "Active adaptive sound control in duct: a computer simulation," J. Acoust. Soc. Am., vol. 70,no. 3, pp.715-726, 1981.
- [7] S. J. Elliot and P. A. Nelson, "Active noise control," IEEE Signal Processing Mag., vol. 10, pp. 12-35, Oct. 1993.
- [8] M.C.J. Trinder and P.A. Nelson, "Active Noise Control in Finite Length Ducts," Journal of Sound and Vibration, Vol.89, pp.95-105, 1983
- [9] 林中偉，TMS320VC5510數位訊號處理器在噪音主動控制應用之研究，海洋大學造船工程學研究所碩士論文，基隆，2004。
- [10] 李家勳，TMS320 C6713數位訊號處理器在噪音主動控制應用之研究，基隆，2006。
- [11] Zhang, Qi-Zhi Gan, Woon-Seng , "A model predictive algorithm for active noise control with online secondary path modelling," Journal of Sound and Vibration, Vol.270, pp.1056-1066, 2004.
- [12] Roshan Gummattira, Philip Baltz, Nat Seshan , "TMS320C6713 Digital Signal Processor Optimized for High Performance Multi- channel Audio Systems," Texas Instruments Application Report, SPRA921, June. 2003.
- [13] "TMS320C6713, TMS320C6713B FLOATING-POINT DIGITAL SIGNAL PROCESSORS," Texas Instruments , SPRS186I , DECEMBER 2001-REVISED MAY 2004.
- [14] "TMS320C6713 DSK Technical Reference," Texas Instruments , 506735-0001 Rev. A, May 2003.
- [15] "TMS320 C6416/C6713 DSK One-Day Workshop," Texas Instruments , June 2003.