

## 空間窄頻噪音主動控制之理論探討與實作

謝傳璋<sup>\*1</sup> 王昭男<sup>\*1</sup> 吳江凱<sup>\*2</sup>  
<sup>\*1</sup>教授  
<sup>\*2</sup>碩士班研究生

台灣大學工程科學及海洋工程學研究所  
106 台北市舟山路 73 號  
電話：02-3366-5747 Fax：02-2365-4931  
E-mail：cctse@ntu.edu.tw

### 摘要

本文主要是利用 rescaling 演算法及 Leaky LMS 演算法，以數值模擬及實時試驗的方式，觀察並比較其對於空間窄頻噪音之主動控制效果。所使用的系統架構是採用 FIR(Finite Impulse Response)濾波器架構，控制器運算方面，分別就兩種演算法，以疊代的方式修正控制器的加權係數，以控制空間定點位置的噪音。

結果顯示：在數值模擬時，對於各類型噪音，兩種演算法皆可達到良好的控制效果，若所擷取的參考信號含有雜訊時，兩種演算法皆有抗雜訊的功效。在空間噪音實時控制時，rescaling 演算法及 Leaky LMS 演算法對於單頻、窄頻等穩定噪音，可達到 15dB 以上的噪音衰減量。

關鍵字：噪音主動控制、適應性、rescaling 演算法、Leaky LMS 演算法

### Abstract

The purpose of this paper is to compare the performances of two LMS algorithms (Rescaling and Leaky algorithm) for adaptive active noise control at a single space location. The comparisons were conducted by numerical simulations and real-time experiments. An iteration scheme is used to calculate the weighting vector of the FIR (Finite Impulse Response) filter which is used in this control process.

Numerical simulation shows that all algorithms are good in control process. In case of pure tone or narrow-band noise, the real-time experimental result shows that more than 15 dB noise reduction can be achieved when Rescaling or Leaky LMS algorithm is used.

Keywords : Active noise control, adaptive, rescaling algorithm, Leaky LMS algorithm

## 一、前言

工業的發展促進了經濟的繁榮，然而也產生了不良副產品-「噪音」，例如：工地施工時所產生的敲打聲、車輛的引擎聲、工廠內的機器聲等。人類長期處於高分貝的環境中，除了對聽覺的損害外，亦會降低工作效率、影響睡眠品質，對於生理及心理都會造成傷害。因此噪音的防治是現階段重要的課題。

噪音主動控制的概念最早於 1936 年由 Paul Lueg 提出[1]。爾後各國便陸續

投入這方面的研究[2-8]，至今已有許多噪音主動控制的商業化產品提出，例如話筒迴音的消除、飛機客艙內的噪音消除、及排氣管消音等。

本文中空間噪音控制實驗主要是以單點控制為主，也就是在欲控制區域裝設一麥克風，以消滅該麥克風所收到的噪音量為目的，由於能量不減定理，該區域的噪音能量衰減，則可能造成其他區域噪音能量的增加，此現象在本文中不作討論。如圖 1 所示，我們在欲控制區域裝設麥克風 M，再利用圖示左邊的揚聲器發出與噪音能量大小相等，相位差 180 度的控制噪音 y，使 M 點的噪音 y 及 d 產生相互干涉，進而達到噪音衰減的效果。實驗流程如下：

- (1) 在欲控制區域中裝置一麥克風 M，以此麥克風所測得之聲波作為控制成效之目標。
- (2) 以目標頻率  $f_0$  (即欲控制的頻率) 為中心，設定一窄頻濾波器。將原先的噪音信號  $d$  過濾為窄頻信號  $x$ 。
- (3) 將  $x$  輸入控制器處理後，輸出控制信號  $y$ 。
- (4) 利用揚聲器將控制信號  $y$  輸出。
- (5) 在控制過程中，麥克風 M 之輸入為  $e = d + y$ ，而控制器的目標函數是使  $e$  之均方值(mean square value)達到最小值。

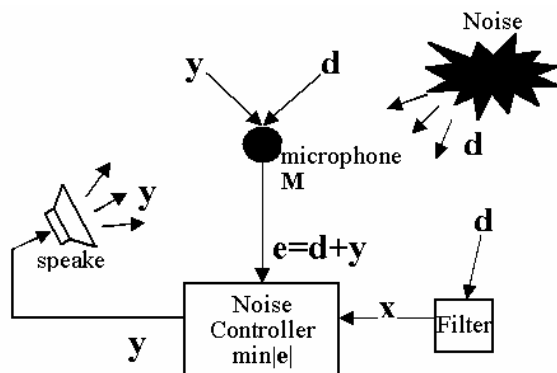


圖 1 主動型消音系統在空間中的運用

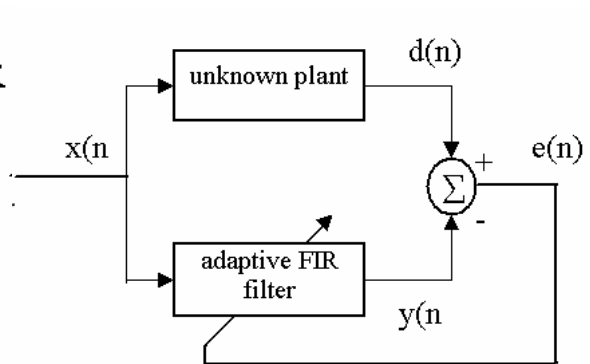


圖 2 適應性主動控制消音系統

## 二、控制系統架構

本文中之主動型噪音控制系統(Active Noise Control System)是架構在 FIR 濾波器上，主要是以適應性濾波器建立一個未知的聲場，如圖 2 所示，其中  $x(n)$  及  $y(n)$  分別表示在第  $n$  個時間下濾波器的輸入信號及輸出信號， $d(n)$  表示輸入信號  $x(n)$  經過一未知聲場後的信號， $e(n)$  為適應性過程中所產生的誤差信號。濾波器輸入輸出關係可表示成下列形式的數學模型：

$$y(n) = \sum_{k=0}^M w_{n,k} x(n-k) = W_n^T X_n \quad (1)$$

其中

$$W_n^T = [w_{n,0} w_{n,1} \cdots w_{n,M}] \quad (2)$$

$$X_n^T = [x(n) x(n-1) \cdots x(n-M)] \quad (3)$$

$y(n)$  為系統之輸出； $w_{n,k}$  為系統的加權係數，是一個特定的參數； $x(n)$  為系統的輸入，是一個已知的信號； $M$  為系統階數。

在演算式方面分別採用 Leaky LMS 演算法及 rescaling 演算法，並以原 LMS 演算法做比較，觀察兩種演算法的收斂性及控制效果。Leaky LMS 演算法是定義成本函數為：

$$\hat{J} = |e(n)|^2 + \alpha \|W_n\|^2 \quad (4)$$

加權係數的疊代關係為：

$$W_{n+1} = (1 - \mu\alpha)W_n - \mu X_n e^*(n) \quad (5)$$

其中  $\alpha$  為洩露因子(leakage factor)， $\mu$  為增益常數(Gain)，其功能是調整疊代的速度並使疊代過程中不至產生發散的現象。此演算法的效果相當於，當輸入的已知信號  $x(n)$  參雜了一個零平均(zero mean)且變異數(variance)為  $\alpha$  的白雜訊(white-noise)。

rescaling 演算法與 LMS 演算法所定義的成本函數為：

$$\hat{J} = |e(n)|^2 \quad (6)$$

加權係數的疊代關係為：

$$W_{n+1} = W_n - \mu X_n e^*(n) \quad (7)$$

兩者最大的不同是 rescaling 演算法加上一個條件式，當系統的輸出大於最大容許輸出值時，則做了以下的修正：

當  $|y(n+1)| > A_{\max}$  時

$$W_{n+1} = W_{n+1}(A_{\max} / |y(n+1)|) \quad (8)$$

$$y(n+1) = y(n+1)(A_{\max} / |y(n+1)|) \quad (9)$$

本文將以此兩種演算法，分別針對各種型態的噪音源作適應性控制的數值模擬，及實際空間中的應用，以比較此兩種演算法的控制效果。

### 三、數值模擬

在本章節中，我們將利用電腦設備製造出各種波形，並以該波形作大小及相位的改變，以作為系統中所要求控制的對象。控制系統如圖三， $x(n)$  為參考信號(reference signal)，也就是控制系統的已知信號； $d(n)$  為參考信號經過某個空間系統後，其大小及相位改變，在控制的過程中，主要就是要針對  $d(n)$  信號作衰減；信號在傳輸的過程中因 A/D、D/A 轉換、濾波器、功率放大器等，會產生時間延遲及振幅大小的改變，此過程稱為誤差路徑， $E_n$ 、 $\hat{E}_n$ 、 $\tilde{E}_n$  表示誤差路徑轉移函數，在這我們假設該影響可於適應性過程中將其修正，故不考慮誤差路徑轉移函數的修正，即：

$$E_n = \hat{E}_n = \tilde{E}_n = [1.0, 0.0, \dots, 0.0]^T \quad (10)$$

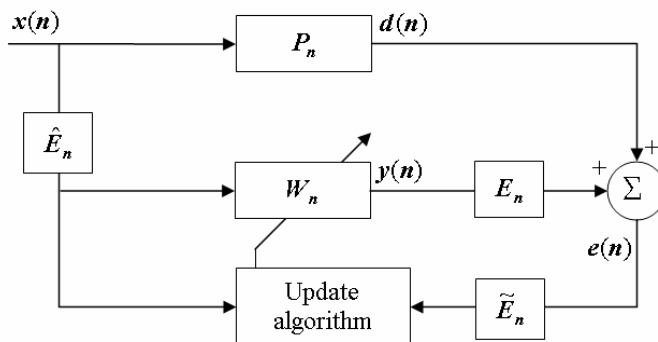
$y(n)$  為系統輸出：

$$y(n) = W_n^T X_n \quad (11)$$

$$X_n = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-M+1)]^T \quad (12)$$

$e(n)$  為估測誤差：

$$e(n) = d(n) + y(n) \quad (13)$$



圖三 適應性主動控制系統區塊圖

在控制的過程中，我們定義噪音衰減量 NR(Noise Reduction)值來表示收斂後的控制效果：

$$NR = 10 \log_{10} \left( \frac{E\{d^2(n)\}}{E\{e^2(n)\}} \right) \quad (14)$$

並控制系統輸出在限制  $A_{\max} = 1.0$  的範圍內。

圖 4~圖 9 分別表示單頻及窄頻的數值模擬結果，從圖 4(d)可以看到 LMS 演算法幾乎可以將誤差完全收斂到趨近於零，NR 值達到無限大，但在系統輸出限制方面，圖 4(c)，並無法達到  $A_{\max} = 1.0$  的要求。圖 5 為 Leaky LMS 演算法將洩露因子  $\alpha$  慢慢調整至 0.04，使其收斂後的輸出符合限制，收斂後 NR 值為 18.2 dB，但在控制初期，圖 5(c)，輸出信號仍會超出限制。圖 6 為 rescaling 演算法控制結果，因為在演算式裡作了修正的動作，故系統輸出皆可控制在限制範圍內，NR 值為 19.0 dB。

窄頻控制是以一中心頻率 150Hz，頻寬 100Hz 的窄頻信號作為參考信號， $P_n = [1.0 \ 0.5]^T$ 。圖 7 至圖 9 為各演算法針對窄頻信號控制收斂後，其系統輸出及估測誤差圖。各演算法噪音衰減量分別為：Leaky LMS 演算法 NR = 12.7dB；rescaling 演算法 NR = 14.4dB。

圖 10 為欲控制信號及參考信號在時間軸上的資料，我們將單頻模擬時的參考信號加上了一大小為 0.5 的白雜訊，模擬當參考信號擷取時摻雜了其他的雜訊。由圖 11 LMS 演算法的模擬結果顯示，當參考信號含有雜訊時，則 LMS 演算法在控制初期有良好的控制效果，但在控制後會產生發散的現象。圖 12 為 Leaky LMS 演算法的控制結果，當洩漏因子  $\alpha$  調至 0.08 時，噪音衰減量 NR = 10.5dB。圖 13、14 分別為 rescaling 演算法在  $A_{\max} = 2.0$  及  $A_{\max} = 1.0$  時的控制結果，其噪音衰減量為 3.9dB 及 10.6dB。比較圖 3-11、3-12、3-14，當參考信號含有雜訊時，則 LMS 演算法將會有發散的現象，而 Leaky LMS 及 rescaling 演算

法可利用調整  $\alpha$  或  $A_{\max}$  來使控制效果穩定收斂。

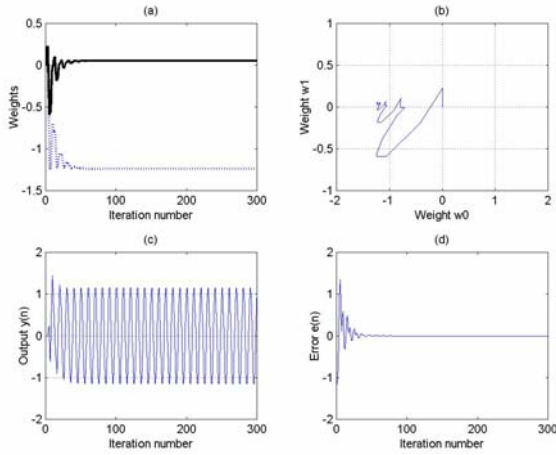


圖 4 LMS 演算法 200Hz 單頻模擬結果：(a) 適應性過程中，加權係數大小的改變，虛線為  $w_0$  實線為  $w_1$ ；(b)加權係數的收斂路徑；(c)系統輸出；(d)估測誤差的變化。

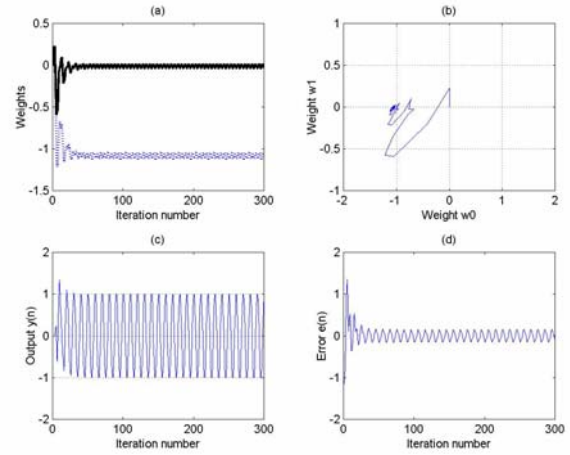


圖 5 Leaky LMS 演算法 200Hz 單頻模擬結果， $\alpha = 0.04$ ：(a)適應性過程中，加權係數大小的改變，虛線為  $w_0$  實線為  $w_1$ ；(b)加權係數的收斂路徑；(c)系統輸出；(d)估測誤差的變化。

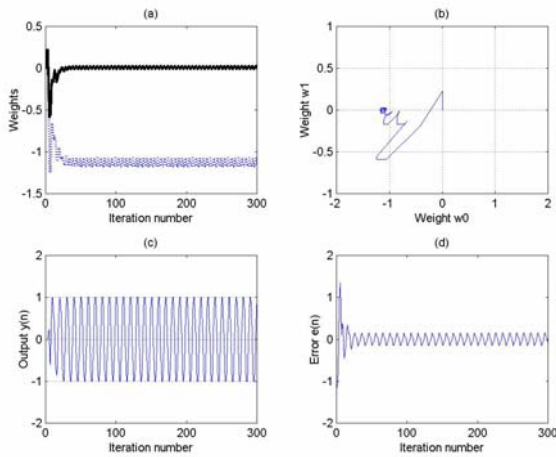


圖 6 rescaling 演算法 200Hz 單頻模擬結果：(a)適應性過程中，加權係數大小的改變，虛線為  $w_0$  實線為  $w_1$ ；(b)加權係數的收斂路徑；(c)系統輸出；(d)估測誤差的變化。

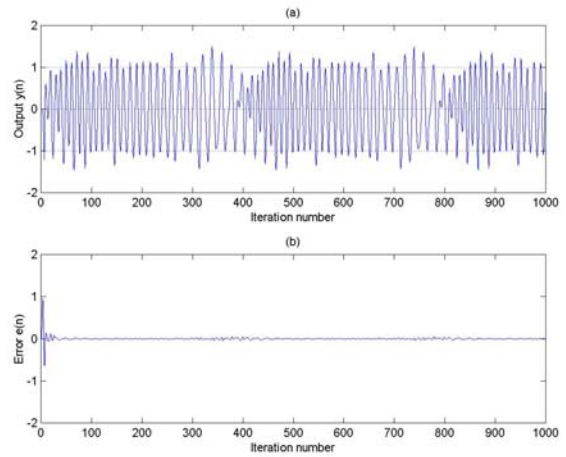


圖 7 LMS 演算法窄頻模擬結果：(a)系統輸出；(b)估測誤差

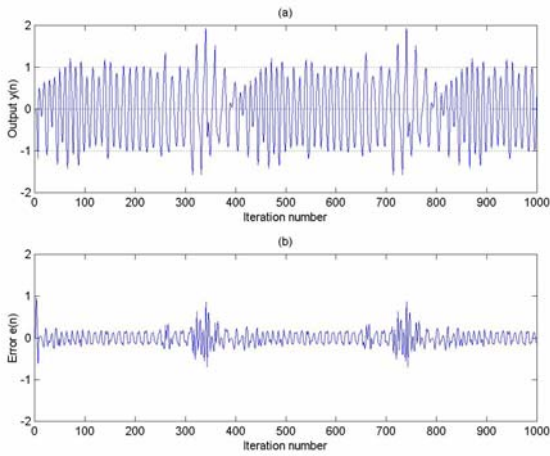


圖 8 Leaky LMS 演算法窄頻模擬結果：(a) 系統輸出；(b) 估測誤差

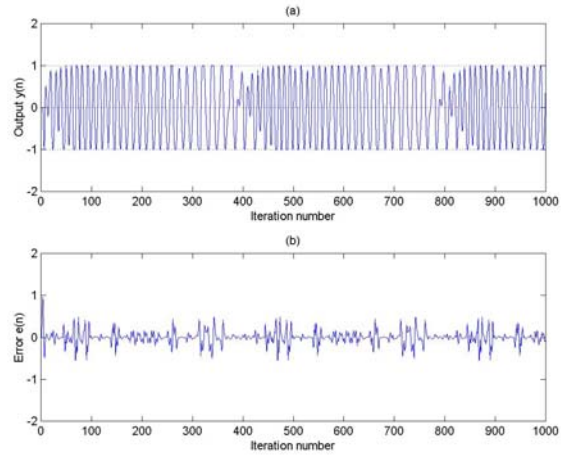


圖 9 rescaling 演算法窄頻模擬結果：(a) 系統輸出；(b) 估測誤差

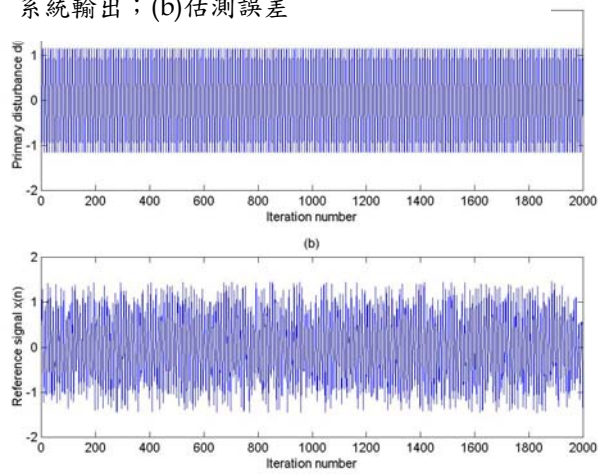


圖 10 時間軸資料：(a) 欲控制信號；(b) 參考信號(含雜訊)

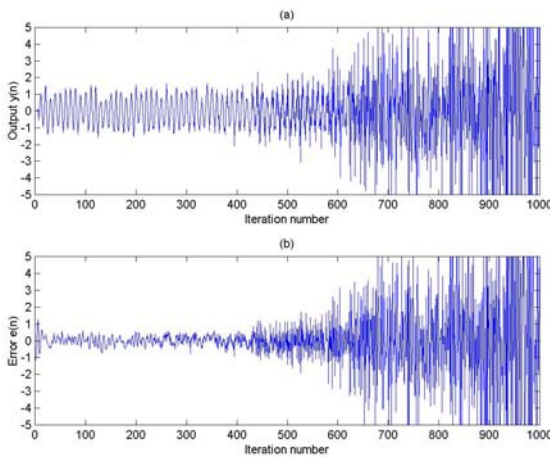


圖 11 LMS 演算法參考信號含雜訊模擬結果：(a) 系統輸出；(b) 估測誤差

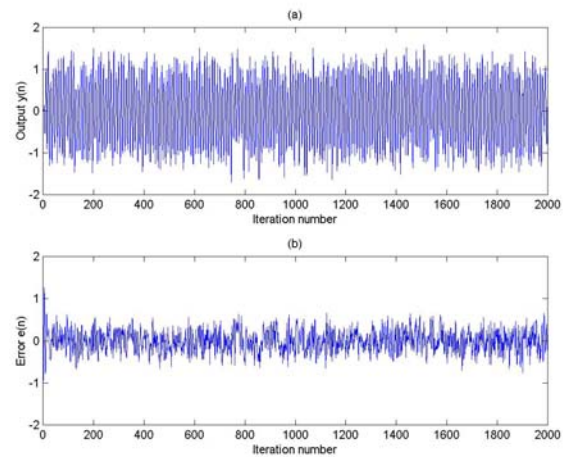


圖 12 Leaky LMS 演算法參考信號含雜訊模擬結果， $\alpha = 0.08$ ：(a) 系統輸出；(b) 估測誤差

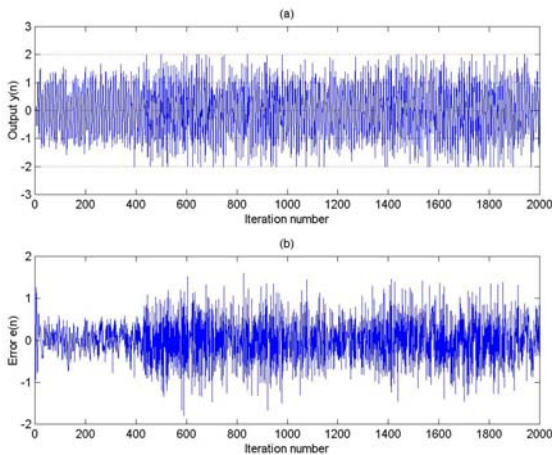


圖 3-13 rescaling 演算法參考信號含雜訊模擬結果， $A_{\max} = 2.0$ ：(a)系統輸出；(b)估測誤差

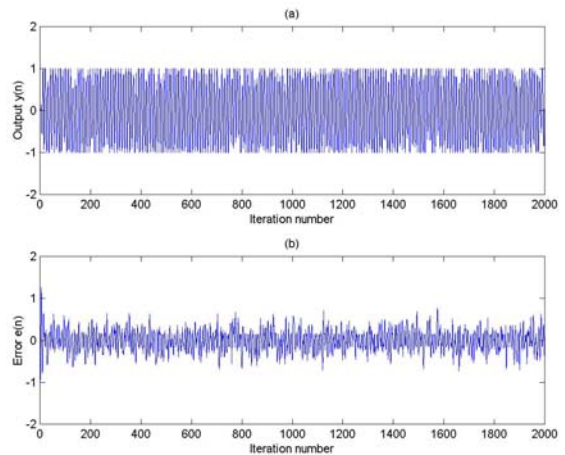


圖 3-14 rescaling 演算法參考信號含雜訊模擬結果， $A_{\max} = 1.0$ ：(a)系統輸出；(b)估測誤差

#### 四、實時控制實驗

實驗配置示意圖如圖 15 所示，噪音源喇叭負責放出函數產生器所製造的噪音，控制喇叭則放出控制器所運算出的輸出值，麥克風接收兩信號在空間中干涉後的殘餘噪音量。

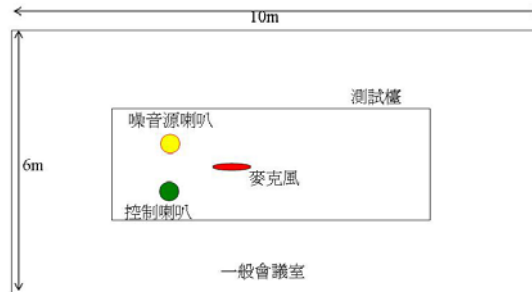


圖 15 實驗配置示意圖

首先控制單頻噪音，控制頻率 250Hz，系統設定方面控制器階數  $M$  採用 10 階，增益常數  $\mu$  使用 0.0001，最大輸出限制  $A_{\max} = 1.0$ ，控制過程中的取樣頻率使用 2500Hz。圖 16、圖 17 為 rescaling 演算法及 Leaky LMS 演算法對於單頻噪音的控制結果。比較兩張圖的能量頻譜位準圖可以發現，同樣的系統設定下，以 rescaling 演算法的控制效果最好，可達 30dB 的以上噪音衰減量，Leaky LMS 演算法可達 20dB 左右的噪音衰減量。兩種演算法在主要控制頻率上的控制效果皆相當理想，但在控制後其他的雜訊會跟著被放大。

另外，對於 rescaling 演算法針對單一頻率在控制時，若噪音能量突然改變，以及當對單一頻率控制時，若噪音頻率改變，其控制結果如圖 18 及圖 19 所示，圖中縱軸所代表的是殘餘噪音(即估測誤差)在收斂過程中每秒鐘的均方值(Mean Square Error)。圖 18 在第 5 秒開始作控制，控制後噪音衰減，第 10 秒時改變噪音音量大小，系統很快的就能夠收斂到最低點；圖 19 約在第 4 秒時開始控制，噪音衰減後，同樣在第 10 秒時改變頻率，由 250Hz 改變到 300Hz，待系統穩定後，

仍然可以收斂至低點。

圖 20 到 21 為兩種演算法控制窄頻噪音的效果，實驗結果顯示在中心頻率 275Hz 附近皆可達到不錯的效果，兩種演算法都有 15dB 左右的衰減量，但在窄頻兩側頻率無法達到控制效果，甚至能量有些微的增加。

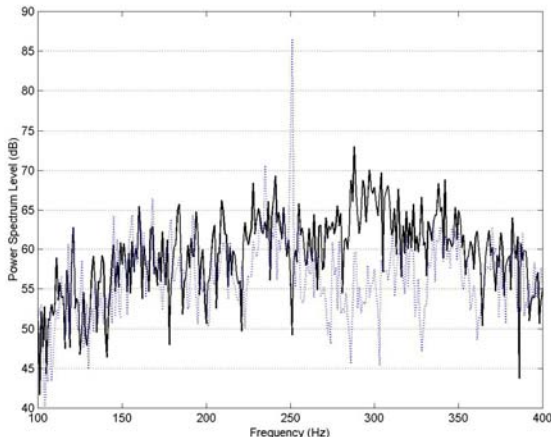


圖 16 rescaling 演算法 250Hz 單頻控制前後能量頻譜位準；虛線為控制前，實線為控制後。(參考聲壓  $20 \times 10^{-6}$  Pa)

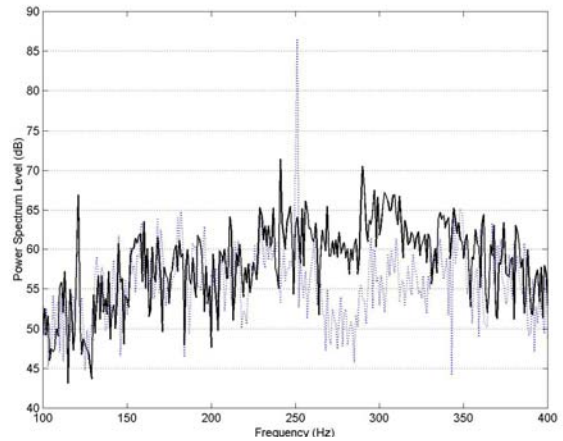


圖 17 Leaky LMS 演算法 250Hz 單頻控制前後能量頻譜位準， $\alpha = 0.5$ ；虛線為控制前，實線為控制後。(參考聲壓  $20 \times 10^{-6}$  Pa)

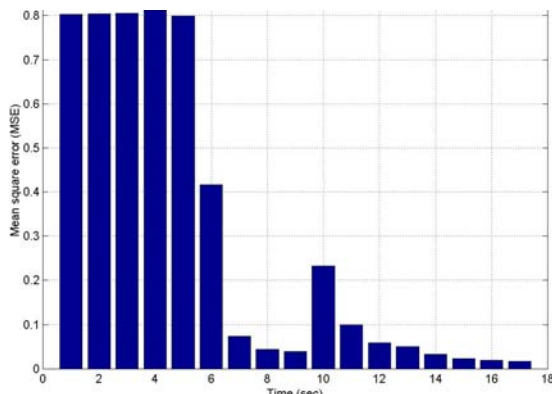


圖 18 rescaling 演算法 250Hz 單頻控制中改變噪音大小所得之結果

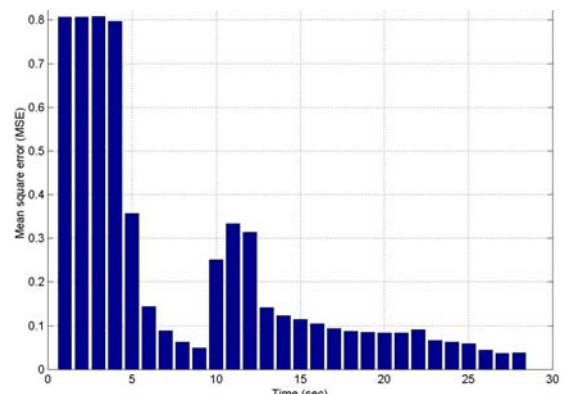


圖 19 rescaling 演算法 250Hz 單頻控制中頻率改變到 300Hz 所得之結果

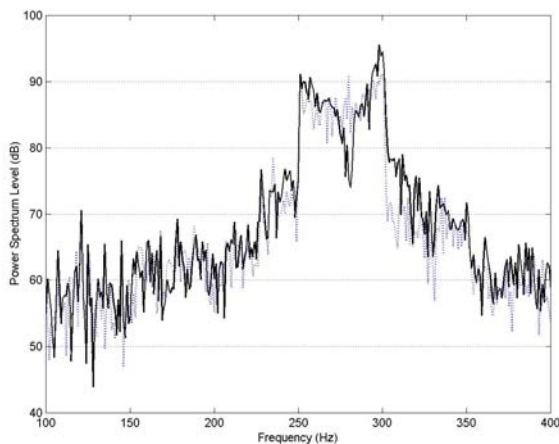


圖 20 rescaling 演算法中心頻率 275Hz，頻寬 50Hz，控制前後能量頻譜位準；虛線為控制前，實線為控制後。(參考聲壓  $20 \times 10^{-6}$  Pa)

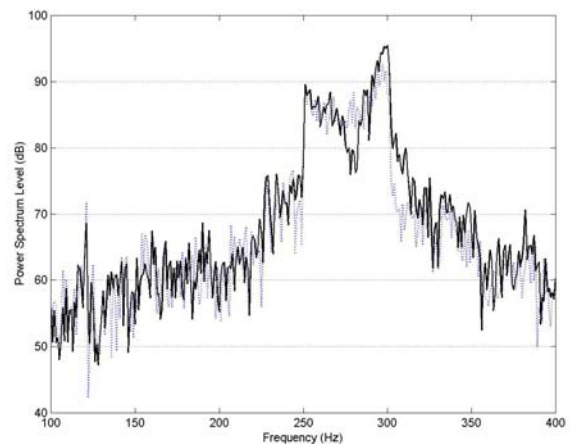


圖 21 Leaky LMS 演算法中心頻率 275Hz，頻寬 50Hz， $\alpha = 0.5$ ，控制前後能量頻譜位準；虛線為控制前，實線為控制後。(參考聲壓  $20 \times 10^{-6}$  Pa)



## 五、結論

1. 在數值模擬方面，rescaling 及 Leaky LMS 演算法對於各類型噪音，都可以達到良好的控制效果，以 rescaling 演算法最好，不但擁有較高的噪音衰減量，且在控制的過程中可以確保系統不會發散；如要將系統輸出控制在限制範圍內，Leaky LMS 演算法則需要較大的洩漏因子(leakage factor)，但洩漏因子的增加，會降低控制的收斂效果。另外若在參考信號的擷取上摻雜了其他的雜訊時，則 rescaling 演算法可利用  $A_{\max}$  的限制來達到穩定收斂，而 Leaky LMS 演算法可利用洩漏因子  $\alpha$  的調變來達到較佳的控制效果；兩種演算法都具有抗雜訊的功能。
2. 實際空間控制時，在穩定噪音的控制上，對於單頻噪音可達到 20 至 30dB 左右的噪音衰減量，且在控制過程中，若噪音量改變或頻率改變後，系統同樣可以達到穩定的收斂；對於窄頻噪音而言，在中心頻率附近，可以達到 15dB 左右的噪音衰減量。
3. 未來之研究可考慮加入誤差路徑的修正，即修正控制信號到揚聲器輸出後，因 A/D、D/A 轉換、各放大器及濾波器的影響而造成的相位延遲，振幅大小改變等，如此可以使系統更加穩定。此外可使用較高階數控制器(目前採用 10 階)，提高階數後相對的運算速度亦需提升，故可考慮提升運算器速度及擷取卡之處理速度。

## 參考文獻

- [1]. Paul Lueg, "Process of silencing sound oscillation", U.S Patent 2043416, 1936.
- [2]. H. F. Olson, E. G. May, "Electronic Sound Absorber", Journal of the Acoustical Society of America, 25, pp.1130-1136, 1953.
- [3]. R. R. Leitch, M. O. Tokhi, "Active noise control system", IEE Proceedings, Vol.134,Pt. A, No.6, pp.525-546, June, 1987.
- [4]. J. C. Burgess, "Active adaptive sound control in a duct: A computer simulation", Journal of the Acoustical Society of America, 70(3), pp.715-726, 1981.
- [5]. C. D. Kestell, B. S. Cazzolato, C. H. Hansen, "Active noise control in a free field with virtual sensors", Journal of the Acoustical Society of America, 109(1), pp.232-243, 2001.
- [6]. Xiaojun Qiu, C. H. Hansen, "A study of time-domain FXLMS algorithm with control output constraint", Journal of the Acoustical Society of America, 109(6), pp.2815-2823, 2001.
- [7]. H. Lan, M. Zhang, W. Ser, "A Weight-Constrained FxLMS Algorithm for Feedforward Active Noise Control Systems", IEEE Signal Processing Letters, Vol. 9, No. 1, 2002.
- [8]. J. Lu, C. Shen, X. Qiu, B. Xu, "Lattice form adaptive infinite impulse filtering algorithm for active noise control", Journal of the Acoustical Society of America, 113(1), pp.327-335, 2003.
- [9] Simon Haykin, "Adaptive Filter Theory", Prentice-Hall, New Jersey, 1991.

- [10]. B. Widrow , S. D. Stearns, "Adaptive Signal Processing" , Prentice-Hall, New Jersey,1985.
- [11]. P. A. Nelson , S. J. Elliott , "Active Control of Sound" , Academic Press, San Diego, 1990.
- [12]. M. G. Bellanger, "Adaptive Digital Filters" , Marcel Dekker, New York, 1987.
- [13]. P. M. Clarkson , "Optimal and Adaptive Signal Processing" , CRC Press, Ann Arbor, 1993.