

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

多層共極點模式之研究與應用

Acoustical Common Pole Modeling

計畫編號:90-2213-E-009-112

執行期限:90年08月01日至91年07月31日

主持人:謝世福 交通大學電信系副教授

計畫參與人員:鄭張權

一、摘要

本計畫主要的目的在將共極點(Common pole)與 FXLMS 適應性濾波器結合，並在一維管路情形下，做出動態噪音消除的應用。首先我們利用 Image method 模擬產生多組房間響應，目的在方便觀察反射係數與共極點效應之間的關係。其次我們分析 prony 和 Iterative prefiltering 等現有的尋找共極點的方法並分別求得它們的群體誤差。因為這些方法的“極點個數”未知，造成濾波器的階數(order)難以決定。我們提出 Jointly Balanced Truncation 模型，嘗試改進這個缺點。最後我們做出電腦模擬再與傳統 FIR 方法作比較。

關鍵詞: 噪音消除，共極點

ABSTRACT

We aim to find a common-acoustical poles model for active noise control (ANC). Because of the standing waves effects, common poles models seem to be effective the room impulse responses. If we can find a common set of poles, then we only need to track the zeros parameters using the adaptive filters, which will greatly reduce the filter order and computational cost as well. In the past, we have successfully applied Prony and Iterative Prefiltering methods to find the common-poles models of HRTF's for 3D sound applications. Now, we will propose to use the Jointly Balanced Model Truncation(JBMT) method, which can decide the

order of poles easily because of the rank-revealing property of SVD. Computer simulations will be performed to justify the models for ANC applications.

二、緣由與目的

近代許多的應用：例如房間的動態噪音消除[6]、回音消除[5]、和虛擬立體音響合成[4]等，多著重在研究如何描述房間內的“一組”脈衝響應。一般而言，房間中各別的脈衝響應，多利用 ARMA 濾波器的模型來逼近。若 ARMA 模型中的 AR 部分可以相同而共稱爲“共極點”(Common pole)[7]。

本計畫主要的目的在將共極點的概念與 Filter-x Least-Mean-Square (FXLMS) 適應性濾波器結合，並在動態噪音消除 Active Noise Control (ANC) 做出應用。為簡化起見，我們僅討論一維空間(管路)情形。尤其當房間內牆面的反射係數較高時駐波效應顯著，又由於駐波效應可以對應共極點，才使得共極點效應顯著。這樣因為濾波器 AR 部分共稱時，誤差不致太大，所以估計“一組”脈衝響應，所需的係數和運算量，就可以大量降低。

在方法上，首先我們利用 Image method [8] 模擬產生多組房間響應，該方法是利用映射原理，配合一個方形房間的大小與牆面的反射係數來模擬出聲音的反射波，目的在方便觀察反射係數與共極點效應之間的關係。

其次我們分析現有的尋找共極點的方法，例如 prony 法和 Iterative prefiltering 法等[2, 3]，並分別求得它們的群體誤差 GER (Group Error Index)。因為這些方法的“極點個數”未知，造成濾波器的皆數(order)難以決定。我們提出 Jointly Balanced Truncation (JBMT) 模型，嘗試改進這個缺點，我們將做出分析與電腦模擬再與傳統 FIR 方法作比較。

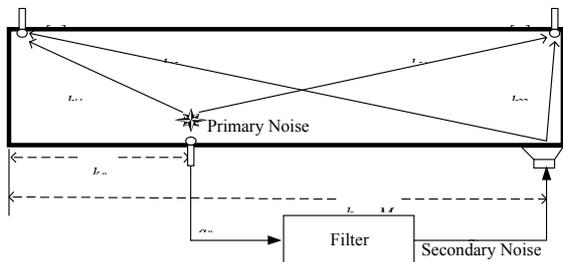
三. 動態噪音消除模型

圖(一)表示典型的管路 ANC 控制系統，主要的原理就是以一種人為的聲波去抵銷或(破壞性)干涉噪音源，以降低管路中噪音能量的目的。假設管路長度為 L ，噪音源的位置在 k_p ，它的訊號 q_p 被麥克風所感應，並被輸入到濾波器 g ，以產生干涉源 q_s ，位置在 k_r 。管路中的脈衝響應 h_{11}, h_{12}, h_{21} 和 h_{22} 主要在描述噪音源與麥克風之間的系統輸出入關係。我們利用 Image method [8] 模擬產生該響應，該方法是利用映射原理，配合一個方形房間的大小與牆面的反射係數來模擬出聲音的反射波，一維管路情形表示如下[9]:

$$h[n] = \sum_{i=0}^1 \sum_{m=-\infty}^{\infty} \beta_1^{m-i} \beta_2^{|m|} \delta[n - |(1-2i)k_p - k_r + 2mM|]$$

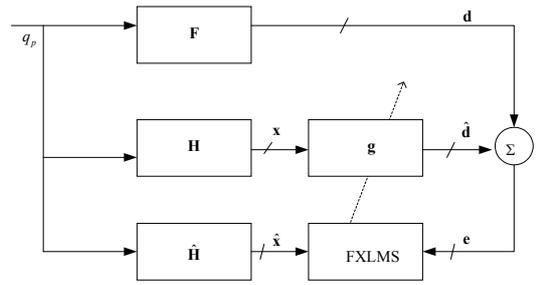
β_1 和 β_2 為管路的 reflection coefficients。

噪音的能量置於管路端點的兩個麥克風的平方值 $e_1^2[n] + e_2^2[n]$ 來估計



圖(一)管路 ANC 控制系統

ANC 與 FXLMS 結合模型表示如圖(二)



圖(二)ANC 與 FXLMS 模型

FXLMS 表示如下

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{X}\mathbf{g}(n)$$

$$\mathbf{g}(n+1) = \mathbf{g}(n) + \mu \hat{\mathbf{X}}^T \mathbf{e}(n)$$

其中

$$\mathbf{F} = [\mathbf{h}_{11}^T \quad \mathbf{h}_{12}^T]^T, \mathbf{H} = [\mathbf{h}_{21}^T \quad \mathbf{h}_{22}^T]^T, \hat{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{h}}_{21}^T & \hat{\mathbf{h}}_{22}^T \end{bmatrix}^T$$

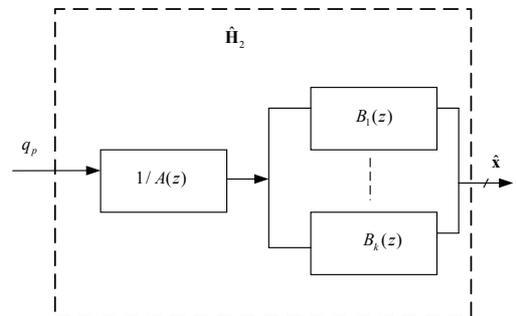
$$\mathbf{d}(n) = \mathbf{F}\mathbf{g}(n), \mathbf{g}(n) = [g_p(n) \quad \dots \quad g_p(n-k+1)]^T$$

$$\mathbf{X}(n) = \begin{bmatrix} x_1(n) & x_1(n-1) & \dots & x_1(n-k+1) \\ x_2(n) & x_2(n-1) & \dots & x_2(n-k+1) \end{bmatrix}$$

$$x_i(n) = h_{2i}(n) * g_p(n), \hat{x}_i(n) = \hat{h}_{2i}(n) * g_p(n)$$

四. 共極點在動態噪音消除的應用

圖(二)中假設 $\hat{\mathbf{H}}$ 有 k 個脈衝響應 $H_1(z), \dots, H_k(z)$ 分別用濾波器的 ARMA model 來逼近，而共極點的模型是指濾波器的 AR 部分相同而共用，表示如圖(三)。



圖(三)共極點的共用

尋找共極點是一個非線性的問題，有一定的困難度描述如下。若令

$$H_i(z) \approx \hat{H}_i(z) = \frac{B_i(z)}{A(z)}$$

且定義 Coefficient error 為

$$E_i(z) = H_i(z) - \hat{H}_i(z) = H_i(z) - \frac{B_i(z)}{A(z)} \approx 0$$

我們希望它們的詳細誤差 GER 為最小即

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{n=0}^{N-1} |e_i(n)|^2$$

由於它是一個非線性的 least-squares optimization 問題，有一定的困難度。以往我們提出 Iterative prefiltering 的方法 [2, 3]，因為這個方法的“極點係數”未知，造成濾波器的階數(order)難以決定，本計畫我們嘗試提出 Jointly Balanced Truncation 模型，改進這個缺點。這個模型的基本想法是：首先利用 state-space model, 參數為 $\{A, B, C, D\}$ ，將一組 FIR 濾波器表為一組 IIR 濾波器 [1] 但是 AR 部分共用，並藉著 SVD (Singular Value Decomposition) 來估計“極點係數”。接著，定義一個 Hankel matrix 如下：

$$H = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \cdots & c_n \\ c_2 & c_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \\ c_n & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

因為 H 是對稱矩陣，可以分解成：

$$H = V \Lambda V^T$$

則 Low-order approximated IIR 濾波器可表為

$$F^k(z) = C^{(k)}(zI - A^{(k)})^{-1}B^{(k)} + D$$

其中 $V = [V_k \ V_{n-k}]$ ， $A^{(k)} = V_k^T A V_k$ ，

$B^{(k)} = V_k^T B$ ， $C^{(k)} = C V_k$ ， $D = c_0$ 。而 k 可視為極點係數，我們可利用 SVD 方法來估計。

以上僅針對單一 transfer function 作 low-order 的 IIR model [1]，假如有一組許多 transfer functions 時，我們可以建立一個更大的 Hankel 矩陣：

$$H = [H_1^T \ H_2^T \ \cdots \ H_i^T]^T$$

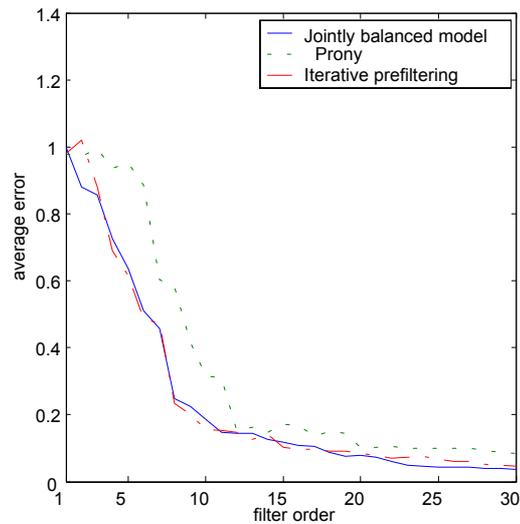
其中，每個 submatrix H_i 是對應到個別 Hankel 矩陣。由於 JBMT 模型比較容易看出 poles model 的階數 k，此優點是 Prony 與 Iterative Prefiltering 方法所欠缺的。

摘要整個 Jointly Balanced Model Truncation 的方法如下：

- (1). 建立 Hankel matrixes H_1, H_2, \dots, H_i
- (2). 形成 H
- (3). 矩陣分解 H
- (4). 經由 H 分解後的對角線值，選擇合適的 k。
- (5). 求 $F^k(z) = C^{(k)}(zI - A^{(k)})^{-1}B^{(k)} + D$

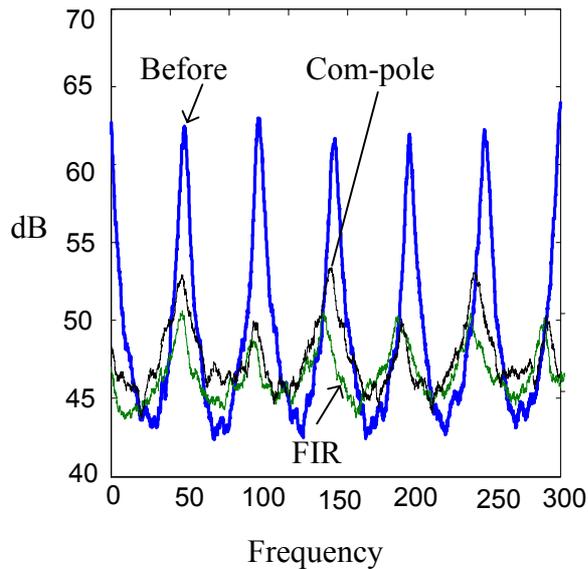
五. 電腦模擬

圖(四)比較 prony，Iterative prefiltering 和 Jointly Balanced Truncation 等方法的“濾波器階數”對“平均誤差”的關係。後兩者平均誤差十分接近。



圖(四) 濾波器階數對平均誤差的關係

圖(五)比較以 Iterative prefiltering 尋找共極點的 ARMA (Pole=17, zeros=40) model 和 FIR (zeros=400) 在一維管路情形下，動態噪音消除的情形，前者對噪音消除一樣有效，而所需的係數和運算量大量降低。



圖(五) Common pole 和 FIR 的動態噪音消除

二. 計畫結果與自評

本計畫結合共極點與適應性濾波器，在一維管路情形下，做出動態噪音消除的應用。我們分析 prony 和 Iterative prefiltering 等現有的尋找共極點的方法，因為這些方法的“極點個數”未知，造成濾波器的階數(order) 難以決定。我們提出 Jointly Balanced Truncation 模型，改進這個缺點。最後我們做出電腦模擬再與傳統 FIR 方法作比較。未來我們會考慮將 JBMT 作進一步的改進，並結合 Iterative Prefiltering 的優點，找出一組不同階數的最佳 zeros 以克服 poles 與 zeros 的階數要一樣多限制。

REFERENCE

- [1] Jonathan Mackenzie, Jyri Huopaniemi, Vesa Valimaki and Kali, “ Low-order Modeling of Head-Transfer Function Using Balanced Model Truncation,” IEEE Signal Processing Letters. Vol. 4, no. 2, pp. 39-41, February 1997
- [2] M. C. Chen and S. F. Hsieh, “Common Acoustical-Poles/Zero Modeling for 3-D Sound Processing, “ International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing,

Istanbul, 2000

- [3] M. C. Chen, “Common-pole/zero on HRTFs data sets,” 國立交通大學碩士論文,1998
- [4] Durand R. Begault, 3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia AP Professional, 1994.
- [5] C. Breining, et al.,” Acoustic echo control, ” IEEE Signal Processing Magazine, pp. 42-69, July, 1999
- [6] Fan Jiang, et al.,” Adaptation for Active Noise Control,” IEEE Control System, pp.36-47 December 1997
- [7] Y. Haneda, et al., “Common-acoustic-pole and zero modeling of head-related transfer functions,” IEEE Trans. On Speech and Audio Processing, Vol. 7, No. 2, p 188-195, March 1999.
- [8] J. B. Allen and D. A. Berkley, “Image method for effectively simulating small-room acoustics,” J. Acoust. Soc. Amer., Vol 65, p 943-950, 1979.
- [9] J.C. Jenq and S.F. Hsieh, " A Simplified Filter Design in Acoustic Duct Noise Control " submitted to *IEEE signal processing letters*.