

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2022.02.020

## 自校正滤波有源噪声控制算法

吴礼福<sup>1,2\*</sup>, 胡秋岑<sup>1</sup>, 陈晶晶<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京, 210044; 2. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京, 210044)

**摘要:** 滤波-x 最小均方 (Filtered-x Least Mean Square, FxLMS) 算法是前馈有源噪声控制系统中应用最广的算法, 但滤波器阶数选择和运算量是制约其在多通道系统中应用的重要因素. 引入一种自校正自适应算法, 通过串联多个低阶滤波器以简化滤波器阶数选择并降低计算复杂度. 在有源降噪耳机实例中的对比结果表明, 该算法能在计算量较小的情况下获得与 FxLMS 算法相当的降噪性能.

**关键词:** 有源噪声控制, 自校正滤波, 降噪耳机, 前馈系统

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

## A self-correcting adaptive algorithm for active noise control

Wu Lifu<sup>1,2\*</sup>, Hu Qiuceng<sup>1</sup>, Chen Jingjing<sup>1</sup>

(1. School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing, 210044, China)

**Abstract:** The filtered-x least mean square (FxLMS) algorithm is the most widely used algorithm in the feedforward active noise control system, but the selection of filter order and the computation load are important factors restricting its application in multi-channels system. In this paper, a self-correcting adaptive algorithm is introduced to simplify the selection of filter order and reduce the computational load by cascading multiple small order filters. The experimental results in an active noise reduction headphone show that the self-correcting algorithm can achieve approximately equal noise reduction performance as the FxLMS algorithm with less computation.

**Key words:** active noise control, self-correcting filter, noise reduction headphone, feedforward system

有源噪声控制 (Active Noise Control, ANC) 在控制低频噪声方面具有明显的优势<sup>[1-3]</sup>, 因而被广泛应用于各种降噪领域. 有源噪声控制系统分前馈和反馈两种结构, 前馈系统使用参考信号, 降噪量高、稳定性好. 自适应算法是有源噪声控制系统的核心, 其中最常用的自适应算法是滤波-x 最小均方 (Filtered-x Least Mean Square, FxLMS) 算法, 该算法具有结构简单、稳定性好等优

点<sup>[4-5]</sup>, 但实际应用中, 其收敛速度、稳定性、稳态误差等仍有改进的空间.

毛鑫等<sup>[4]</sup>分析了归一化频域算法在非因果条件下稳态解的特性, 提出一种新的滤波器系数自适应调整方法, 并证明它在非因果条件下也能收敛到最优解. 为了改善已有算法在控制混合噪声时会出现稳定性不足、收敛速度与降噪量不佳等问题, 本文提出一种递归最小二乘的自适应算

基金项目: 国家自然科学基金 (12074192)

收稿日期: 2021-01-06

\* 通讯联系人, E-mail: wulifu@nuist.edu.cn

法<sup>[5]</sup>. 针对 $\alpha$ 稳定分布噪声的前馈主动控制, 定义了最小化误差绝对值对数变换平方的代价函数, 在此基础上, 提出了滤波对数变换最小均方算法, 该方法克服了已有方法需要根据实际噪声信号的统计特性预先选择和设定某些参数才能保证收敛和稳定的局限性<sup>[6]</sup>.

目前多通道有源噪声控制系统有重要的应用需求<sup>[7-15]</sup>, 如有源降噪头靠<sup>[9-12]</sup>、高铁车厢噪声控制<sup>[13]</sup>、隔声窗<sup>[14-15]</sup>等. 运算量是制约多通道系统的一个重要因素, 随着通道数的增加, 通常需要降低滤波器的阶数以满足实时性要求. 另一方面, 实际使用中, 滤波器阶数的选择也需要多次尝试, 滤波器阶数选择过大, 浪费运算量, 滤波器阶数选择过小则降噪性能不够. 据此, 本文研究了一种自校正滤波的有源噪声控制算法<sup>[16-17]</sup>, 通过串联多个低阶滤波器以简化滤波器阶数选择并降低计算复杂度.

## 1 自校正滤波算法

FxLMS 算法在最小均方 (Least Mean Square, LMS) 算法的基础上考虑了扬声器与误差传感器之间的次级路径, 在 LMS 算法的参考信号与滤波器之间放置估计的次级路径以补偿次级路径对 ANC 系统的影响<sup>[4]</sup>. 基于 FxLMS 算法的前馈有源噪声控制系统如图 1 所示, 其中,  $x(n)$ ,  $d(n)$ ,  $e(n)$  和  $y(n)$  分别为系统的参考信号、初级噪声信号、误差传感器采集的残留噪声信号和控制输出信号的次级信号,  $W(z)$  为控制器,  $S(z)$  为次级路径传递函数,  $\hat{S}(z)$  为次级路径的估计.

如图 1, 自适应滤波器  $W(z)$  的输出:

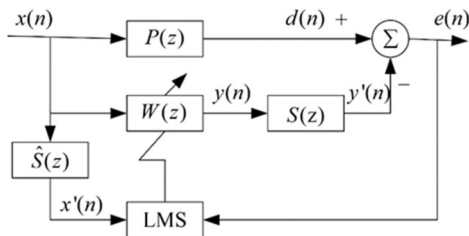


图 1 基于 FxLMS 算法的自适应前馈控制系统

Fig. 1 Block diagram of adaptive feedforward control system based on FxLMS algorithm

$$y(n) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m(n) x(n-m) \quad (1)$$

其中,  $w(n)$  是第  $n$  次采样时刻自适应滤波器的权系数,  $M$  是滤波器的阶数. 参考信号经过估计的次级路径形成滤波后的参考信号  $x'(n)$ , 其表达式为:

$$x'(n) = \sum_{m=0}^{P-1} \hat{s}(n) x(n-m) \quad (2)$$

其中,  $\hat{s}(n)$  为次级路径估计  $\hat{S}(z)$  的脉冲响应,  $P$  为  $\hat{s}(n)$  的阶数.

FxLMS 算法采用最小均方误差准则, 用梯度下降法得到控制器  $w(n)$  的迭代表达式为:

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n) x'(n) \quad (3)$$

其中,

$$x'(n) = [x'(n), x'(n-1), \dots, x'(n-L+1)]^T$$

是滤波后的参考信号,

$$w(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{M-1}(n)]^T$$

是  $W(z)$  在  $n$  时刻的系数矢量,  $\mu$  为收敛系数.

自校正 FxLMS (Self-correcting FxLMS, SC-FxLMS) 算法将前一级滤波器的输出作为后一级滤波器的输入, 图 2 和图 3 分别给出了两种 SC-FxLMS 算法, 区别在于: 图 2 所有级使用相同的期望信号  $d(n)$ , 图 3 将前一级的误差信号  $e(n)$  作为后一级的期望信号, 故将图 2 算法记作 DSC-FxLMS (Desired-signal Self-correcting FxLMS, DSC-FxLMS) 算法, 将图 3 算法记作 ESC-FxLMS (Error-signal Self-correcting FxLMS, ESC-FxLMS) 算法. 为简化, 图 2 和图 3 中省去了图 1 中的滤波参考信号步骤, 直接使用滤波后的参考信号表示算法结构.

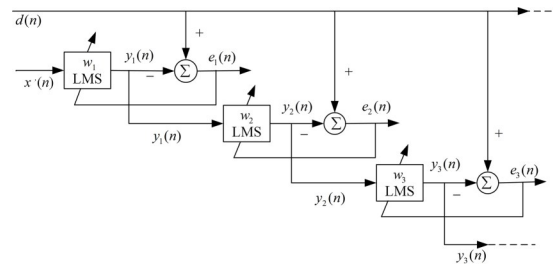


图 2 DSC-FxLMS 算法结构框图

Fig. 2 Block diagram of DSC-FxLMS algorithm



源分别位于人工头正前方、正左方、正右方和正后方,距离人工头 0.3 m,初级噪声信号为白噪声.系统的采样率为 16000 Hz.采用最小均方误差(LMS)算法估计出次级路径  $\hat{S}(z)$ ,此处  $\hat{S}(z)$  为 256 阶有限长脉冲响应(Finite Impulse Response, FIR)滤波器.

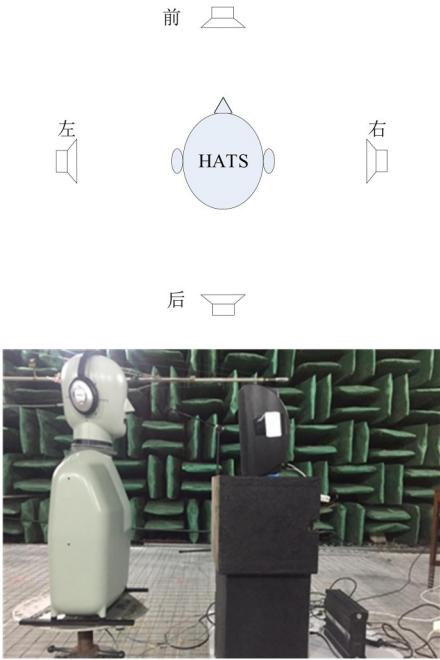


图5 初级声源的四个位置(上)以及消声室中的实验场景(下)

Fig.5 Diagrammatic view of the four different incident directions of the primary noise (up) and the experimental configuration in the anechoic chamber (down)

**2.2 结果与讨论** 本文以降噪量评价降噪性能的好坏,降噪量为 ANC 系统关闭与打开两种情况下误差传声器信号的功率谱密度之差.实验分别对四个不同入射方向进行降噪性能测试,发现左右两只耳朵的性能几乎一样.为了在一幅图中更加清晰简洁地看出每种算法的降噪量,取右耳四个不同入射方向初级噪声源降噪量的平均值进行对比.

本文选用 FxLMS, DSC-FxLMS, ESC-FxLMS 三种算法分别迭代得到三种控制器权系数矢量后,对比三种算法的降噪量.控制器  $W(z)$  都为 FIR 滤波器,三种算法的参数设定见表 2.

三种算法的降噪量如图 6a 所示, FxLMS 算

表 2 三种算法的参数设定			
Table 2 Parameters setting of the three algorithms			
算法	FxLMS	DSC-FxLMS	ESC-FxLMS
步长	$\mu=0.005$	$\mu=0.5$	$\mu=0.05$
自适应滤波器长度	$L^I=64$	$L=2$	$L=2$
串联个数		$I=6$	$I=6$

法在 218 Hz 附近获得 28 dB 的最大降噪量,其有效降噪频段在 2800 Hz 以下,在 3900 Hz 左右出现了 3 dB 的最大噪声抬升,并且在 2300~2800 Hz 频段内降噪量几乎为 0; DSC-FxLMS 算法和 ESC-FxLMS 算法的有效降噪频段均在 3800 Hz 以下,在 3800~4300 Hz 频段内的噪声抬升比 FxLMS 算法小 1~2 dB.

从图 6a 可见,降噪量, FxLMS 算法优于两种自校正自适应算法, ESC-FxLMS 算法优于 DSC-FxLMS 算法;有效降噪频段, DSC-FxLMS 算法和 ESC-FxLMS 算法一样, 优于 FxLMS 算法;高频噪声抬升, DSC-FxLMS 算法和 ESC-FxLMS 算法的噪声抬升小于 FxLMS 算法.图 6b 给出了三种算法的误差收敛曲线,可以看出, FxLMS 算法的均方误差最小, DSC-FxLMS 算法和 ESC-FxLMS 算法的均方误差相同,但 ESC-FxLMS 算法的收敛速度更快.

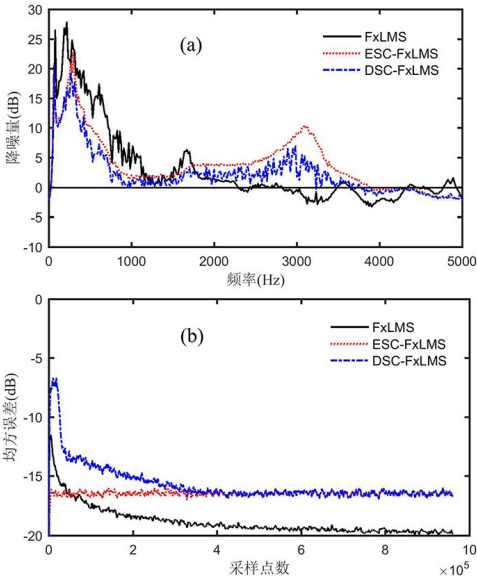


图6  $I=6, L=2$  时三种算法的性能

Fig. 6 The performance of three algorithms with  $I=6$  and  $L=2$



### 3 结论

本文通过在前馈自适应降噪系统中串联多个低阶滤波器,研究了一种自校正自适应算法.在有源降噪耳机实例中的验证结果表明,与 FxLMS 算法相比,该算法计算复杂度低,有效降噪带宽大和低频噪声抬升小.虽然两种算法的每一级都是 LMS 算法的结构,其稳定性可以参考 LMS 算法,但这两种算法稳定性的理论分析、步长的理论上界都值得进一步研究.

#### 参考文献

- [1] Nelson P A, Elliott S J. Active control of sound. London: Academic Press, 1992.
- [2] Kuo S M, Morgan D R. Active noise control systems: Algorithms and DSP implementations. New York: Wiley, 1996.
- [3] Elliott S J. Signal processing for active control. London: Academic Press, 2001.
- [4] 毛鑫, 卢晶, 邹海山. 频域自适应算法在有源噪声控制系统中的性能研究. 南京大学学报(自然科学), 2014, 50(1): 41—45. (Mao X, Lu J, Zou H S. Investigation of the performance of frequency domain adaptive algorithms in active noise control system. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2014, 50(1): 41—45.)
- [5] Wu L F, Qiu X J, Burnett I S, et al. A recursive least square algorithm for active control of mixed noise. Journal of Sound and Vibration, 2015(339): 1—10.
- [6] Wu L F, He H S, Qiu X J. An active impulsive noise control algorithm with logarithmic transformation. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2011, 19(4): 1041—1044.
- [7] Chu Y J, Mak C M, Zhao Y, et al. Performance analysis of a diffusion control method for ANC systems and the network design. Journal of Sound and Vibration, 2020(475): 115273.
- [8] 张聪鑫, 邹海山, 邱小军. 小开口声传输有源控制的次级源和误差传感策略研究. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(5): 781—790. (Zhang C X, Zou H S, Qiu X J. Secondary source and error sensing strategies for active control of sound transmission via a small opening. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2019, 55(5): 781—790.)
- [9] Han R, Wu M, Gong C, et al. Combination of robust algorithm and head-tracking for a feedforward active headrest. Applied Sciences, 2019, 9(9): 1760.
- [10] Elliott S J, Jung W, Cheer J. Head tracking extends local active control of broadband sound to higher frequencies. Scientific Reports, 2018, 8(1): 5403.
- [11] Behera S K, Das D P, Subudhi B. Head movement immune active noise control with head mounted moving microphones. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142(2): 573—587.
- [12] Behera S K, Das D P, Subudhi B. Adaptive nonlinear active noise control algorithm for active headrest with moving error microphones. Applied Acoustics, 2017 (123): 9—19.
- [13] Guo H, Wang Y S, Liu N N, et al. Active interior noise control for rail vehicle using a variable step-size median - LMS algorithm. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018(109): 15—26.
- [14] He J J, Lam B, Shi D Y, et al. Exploiting the underdetermined system in multichannel active noise control for open windows. Applied Sciences, 2019, 9 (3): 390.
- [15] Murao T, Shi C, Gan W S, et al. Mixed - error approach for multi - channel active noise control of open windows. Applied Acoustics, 2017(127): 305—315.
- [16] Kim J, Perry E T. Performance analysis of the self-correcting adaptive filter//Proceedings of the 37<sup>th</sup> Southeastern Symposium on System Theory. Tuskegee, AL, USA: IEEE, 2005: 316—319.
- [17] Poularikas A D, Ramadan Z M. Adaptive filtering primer with MATLAB. Boca Raton: CRC Press, 2006: 151—153.

(责任编辑 杨可盛)