

基于 TMS320VC5416 的自适应有源噪声控制系统的设计与实现

高传莹¹, 蒋建国^{1,2}, 齐美彬^{1,2}

(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009;

2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009)

摘要: 设计并实现了一种适用于封闭空间的、基于 TI TMS320VC5416 DSP 的单通道有源前馈噪声控制系统, 详细阐述了有源噪声控制采用的 FLMS 算法和次级通路建模中采用的 LMS 算法, 给出了程序流程图, 介绍了硬件结构, 并在封闭空间内进行实验。实验结果表明, 该系统具有良好的降噪效果。

关键词: 有源噪声控制; 次级通路建模; FLMS 算法; TMS320VC5416

中图分类号: TB535

文献标识码: A

Design and implementation of active noise control system based on TMS320VC5416

GAO Chuan Ying¹, JIANG Jian Guo^{1,2}, QI Mei Bin^{1,2}

(1. School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract: A single-channel feedforward active noise control system is designed and implemented in this paper. Based on TMS320VC5416 DSP and used in close room, this paper presents the LMS algorithm used in the secondary path modeling and Filtered-XLMS algorithm used in noise control. It also presents the hardware structure and software flow. We experimented in a close room, the experimental data proved a good result.

Key words: active noise control; secondary path modeling; Filtered-XLMS algorithm; TMS320VC5416 DSP

传统的控制噪声的声学措施主要有吸声、隔声以及使用消声器等方法, 这些方式统称为“无源”噪声控制。一般来说, 它们仅对中高频噪声的控制有效。1933年, 德国物理学家 Paul Leug (1898~1979) 提出的专利“消除声音振荡的过程”, 开创了有源噪声控制 (Active Noise Control) 研究的先河^[1]。有源噪声控制技术擅长于低频噪声的控制, 与无源噪声控制的互补性极强。20世纪80年代以来, 随着信号处理技术和电子技术的高度发展, DSP 芯片价格成几何级数下降, 使得有源噪声控制有了显著的发展^[2]。

有源噪声控制通过人为地产生一个声场 (次级声场) 来抵消初级噪声, 在误差传感器附近空间产生降噪

区。20世纪90年代以前, 产生次级声场的次级源均为声源, 因此这种有源控制方式又称有源声控制, 在有的文献中被称为“以声消声”。

1 系统结构与算法

根据有源噪声控制噪声处理方式的不同, 可分为前馈控制和反馈控制; 根据系统中误差传感器与次级声源的个数, 可分为单通道和多通道控制系统。本文采用单通道前馈控制系统。

如图1所示, 前馈系统包含2个传感器 (麦克风) 和1个次级声源。在该系统中, 噪声源到初级传感器之间称为参考通路, 噪声源到误差传感器之间称为初级通路, 次级声源到误差传感器之间称为次级通路。

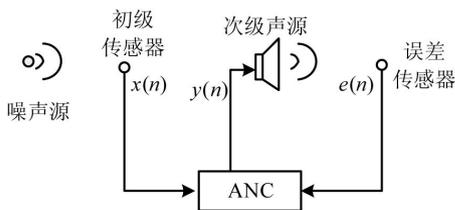


图1 单通道有源噪声前馈控制系统示意图

该系统控制(降低)噪声的步骤为:(1)由初级传感器获得噪声的参考信号 $x(n)$;(2)由处理器通过自适应滤波等算法,利用 $x(n)$ 产生用以抵消初级噪声的次级噪声信号 $y(n)$;(3)次级声源发出次级噪声信号,使其与噪声信号在空间内相干涉;(4)由误差传感器获得次级噪声与初级噪声干涉后的信号 $e(n)$;(5)由处理器根据 $e(n)$ 及 $x(n)$,调整自适应滤波器权系数,从而进一步降低误差信号,使误差传感器附近空间的噪声得到控制(降低)。

本文使用的 FLMS 算法^[3]中,需 2 次使用自适应滤波器,均采用 FIR 横向结构,自适应算法使用最常用的最小均方差算法,即 LMS 算法。

1.1 Filtered-XLMS (FLMS) 算法

考虑系统中各部分的频域响应特性和空间传递特征,参考图 1,得到系统框图,如图 2 所示。

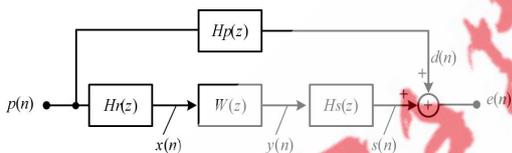


图2 有源噪声前馈控制系统框图

其中, $Hr(z)$ 、 $Hp(z)$ 、 $Hs(z)$ 分别是系统参考通路、初级通路和次级通路的传递函数。

由初级传感器获取的初级噪声参考信号为:

$$x(n) = p(n) \times Hr(n) \tag{1}$$

由 DSP 产生的次级噪声信号为:

$$y(n) = w(n) \times x(n) \tag{2}$$

由误差传感器获取的初级噪声信号为:

$$d(n) = p(n) \times Hp(n) \tag{3}$$

由误差传感器获取的次级噪声信号为:

$$s(n) = y(n) \times Hs(n) \tag{4}$$

(以上式中“ \times ”符号表示卷积运算,下同。)

将式(2)代入式(4),可得:

$$s(n) = \sum_{i=0}^{L-1} w_i(n)r(n-r) = \vec{r}^T(n)\vec{w}(n) \tag{5}$$

其中

$$\vec{r}(n) = [r(n), r(n-1), \dots, r(n-L+1)]^T = \vec{x}(n) \times Hs(n) \tag{6}$$

$r(n)$ 矢量是 FLMS 算法中的重要参数——滤波-X (Filtered-X)信号矢量。 $s(n)$ 和 $d(n)$ 只存在于算法推导过程中,实际无法获得,由误差传感器获得的是 $s(n)$ 和 $d(n)$ 的叠加信号——误差信号 $e(n)$:

$$e(n) = a(n) + d(n) \tag{7}$$

将式(5)代入得:

$$e(n) = d(n) + s(n) = d(n) + \vec{r}^T(n)\vec{w}(n) \tag{8}$$

采用 LMS 自适应滤波算法,构造目标函数^[4]:

$$J(n) = E[e^2(n)] \tag{9}$$

将式(8)代入式(9)推导可得:

$$J(n) = E[d^2(n)] + 2\vec{P}^T\vec{w}(n) + \vec{w}^T(n)\vec{R}\vec{w}(n) \tag{10}$$

其中 $\vec{P} = E[d(n)\vec{r}(n)]$; $\vec{R} = E[\vec{r}(n)\vec{r}^T(n)]$;

根据此目标函数,按照最陡下降法原理递推滤波器权系数,可以获得权矢量迭代公式:

$$\vec{W}(n+1) = \vec{W}(n) - 2\mu e(n)\vec{r}(n) \tag{11}$$

其中 μ 为收敛因子,在一些文献中,也称为步进长度。由式(11)知,只要求出 $r(n)$ 矢量,就可获得滤波器权系数,而由式(6)可知,要求得 $r(n)$ 矢量,必须获得次级通路传递函数。

1.2 次级通路建模

图 2 中, $x(n)$ 是由噪声传感器获得的噪声相关信号,若要获得 $Hs(n)$,须对级次通路进行建模,即对未知系统的系统辨识^[4]。次级通路建模分为自适应离线建模和自适应在线建模^[5],本文采用自适应离线建模,如图 3 所示。在离线建模的情况下,若次级通路发生变化,就需要重新训练。自适应离线建模使用 LMS 自适应滤波算法,获得 $Hs(n)$ 的估计值 $C(n)$,并以 $C(n)$ 代替 $Hs(n)$ 用于 FLMS 算法中。

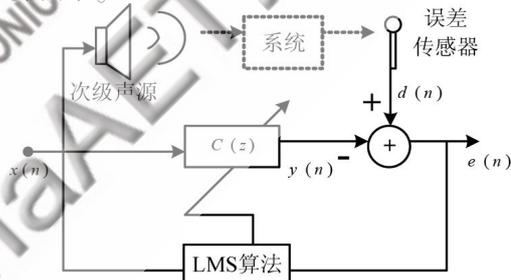


图3 次级通路建模框图

设滤波器权系数为 $C(n)$,构造目标函数:

$$J(n) = E[e^2(n)] \tag{12}$$

其中 $e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \vec{C}^T\vec{X}(n)$

依然根据最陡下降法原理递推,可以获得 $C(n)$ 迭代公式:

$$\vec{C}(n+1) = \vec{C}(n) + 2\mu e(n)\vec{X}(n) \tag{13}$$

2 系统算法与软件实现

由第 2 部分的算法推导,可获得 FLMS 算法整体框图,如图 4 所示。

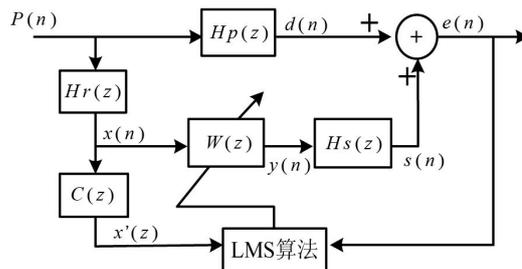


图4 FLMS 算法框图

硬件纵横

Hardware Technique

其中, $x'(n)$ 为通过 $C(n)$ 计算得到的 $r(n)$ 的估计值。

自适应离线建模的过程在一些文献中被称为“离线训练阶段”, 之后的噪声控制阶段被称为“在线噪声控制阶段”。训练阶段以白噪声作为训练对象, 白噪声由白噪声发生器产生。

LMS 算法中, 收敛因子 μ 控制着收敛速度, μ 值越大, 收敛速度越快, 但与此同时, 算法稳定性会降低, 这是此算法中, 收敛速度与算法稳定性之间的矛盾^[6]。要获得比较理想的 $C(n)$ 值, LMS 算法必须收敛, 并在算法收敛后, 取其相对稳定的值作为 $C(n)$ 值。为获得较好的稳定性, 本文系统中取较小的 μ 值, 离线训练阶段的时间, 由误差值和时间两方面控制, 即在误差均值小于阈值的前提下, 训练 5 s。

在噪声控制阶段, 加入异常判别, 当系统出现自激等异常情况时, 重新进入训练阶段。整体程序流程图如图 5 所示。

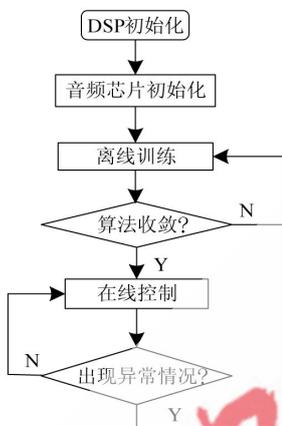


图 5 程序流程图

3 硬件系统

本系统主要器件包括 DSP 芯片 (TMS320VC5416)、音频编解码芯片 (AIC23)、运放 (NE5532) 和音频功放 (TDA2030) 硬件。硬件系统框图如图 6 所示。

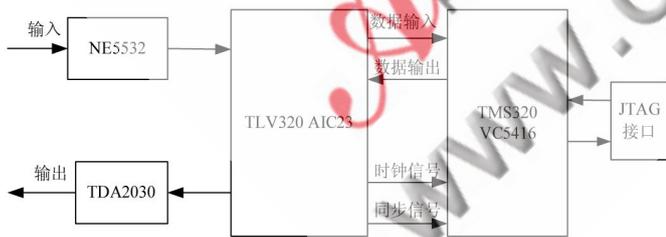


图 6 硬件系统框图

其他设备主要包括 2 台扬声器, 分别作为噪声源和次级声源; 2 部麦克风, 分别作为初级传感器和误差传感器; PC 机 1 台, 安装有 DSP 集成开发环境 CCS, 控制系统并采集分析实验数据。

4 实验结果

实验环境为 6 m×4.2 m×3 m 的封闭房间, 房间内无遮挡, 普通墙体 (无吸音材料)。实验中噪声由 DSP 产生, 通过本系统输出。模拟噪声源, 次级噪声源及 2 个传感器在房间的摆放位置如图 7 所示。

实验首先对单频和两频率叠加正弦信号噪声进行《微型机与应用》2009 年第 24 期

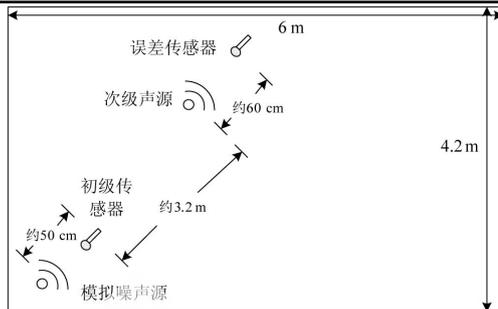


图 7 实验环境及设备摆放示意图

噪声控制, 在取得比较理想的结果后, 又通过本系统采集口琴的混音作为噪声, 进行噪声控制, 同样获得了较好的效果。以下实验数据图像, 通过 CCS 获取。

(1) 噪声为 160 Hz 单频正弦信号

图 8 和图 9 分别为在 160 Hz 噪声情况下, 启动噪声控制前后, 噪声信号频谱图 (左) 和噪声信号 (右)。实验结果表明, 启动噪声控制后, 160 Hz 频率点功率和噪声信号幅度大大降低, 经计算, 噪声降低 6 dB~9 dB。

(2) 噪声为 160 Hz 和 800 Hz 叠加正弦信号

对于 160 Hz 和 800 Hz 叠加噪声, 开启噪声控制后, 在 2 个频率点上, 都有 6 dB~9 dB 的降噪效果。图 10、图

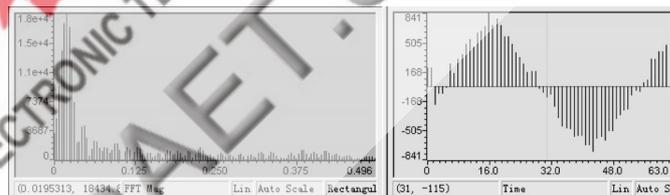


图 8 启动噪声控制前的噪声信号频谱和时域波形 (160 Hz)

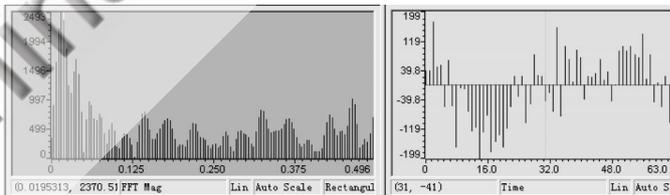


图 9 启动噪声控制后的噪声信号频谱和时域波形 (160 Hz)

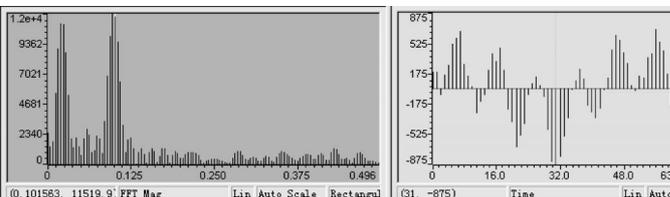


图 10 启动噪声控制前的噪声信号频谱和时域波形 (160 Hz 与 800 Hz 叠加)

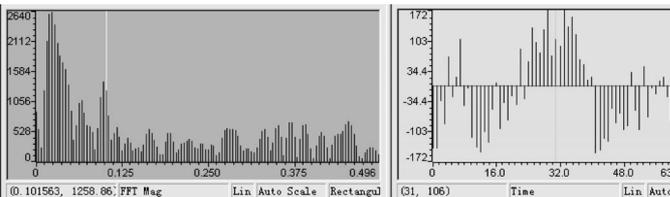


图 11 启动噪声控制后的噪声信号频谱和时域波形 (160 Hz 与 800 Hz 叠加)

(下转第 25 页)

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 21

(上接第 21 页)

11 为实验结果。

(3)通过本系统采集低音口琴声音,作为噪声进行实验,同样获得了降噪效果,由于噪声复杂度和混响程度的提高,降噪效果有所减弱,噪声降低 4 dB~6 dB。

实验结果及人耳在误差传感器附近(降噪空间)的实际监听,都表明了本文设计的有源噪声控制系统具备良好的噪声控制能力。在室内混响程度和噪声频率复杂度增加的情况下,降噪效果有所影响,在满足计算复杂度的前提下,增加滤波器阶数,可以比较有效地解决该问题,本文实验中滤波器阶数为 64。另外,单通道有源噪声控制系统,仅能在误差传感器附近形成降噪空间,若要扩大降噪空间,需要进一步研究多通道有源噪声控制系统设计和相关问题。

《微型机与应用》2009 年第 24 期

参考文献

《电子技术应用》 www.ChinaAET.com

- [1] 陈克文. 有源噪声控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [2] 张碧霞, 王龙健. 自适应噪声消除器及其应用 [J]. 电声技术, 2000(8):39-35.
- [3] SEN M K, ISSA P. Design of active noise control systems with the TMS320 family, Texas Instruments, 1996.
- [4] 张旭东, 陆明泉. 离散随机信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [5] VAN O M W R M. A method to identify the secondary path in active noise control systems [C]. Proceeding of First Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration, 1991.
- [6] 张璞, 黄瑞光. 自适应噪声抵消系统的算法讨论与 DSP 实现研究[J]. 噪声控制, 2003.

(收稿日期: 2009-08-17)

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 25