

文章编号:2095-0411(2015)02-0064-04

# 基于 FxLMS 算法和预测滤波器的数字耳机降噪研究<sup>\*</sup>

郇 战,戴永惠,王振海,陶亚辉

(常州大学 信息科学与工程学院,江苏 常州 213164)

**摘要:**通常数字降噪耳机的自适应滤波器采用最小均方差(LMS)、归一化最小均方差(NLMS)等算法,但是由于降噪耳机电路中存在次级通道延迟和 AD/DA 转换延迟,导致这些滤波器输出信号无法与噪声信号协调起来。FxLMS 算法能够有效补偿次级通道延迟,同时在 FxLMS 滤波器基础上,增加预测滤波器用于补偿 AD/DA 转换延迟。仿真中,用增加预测滤波器的 FxLMS 滤波器对已采样的发动机噪声进行降噪,并将其降噪效果与 LMS 自适应滤波器的降噪效果进行比较。结果表明,在处理低频噪声时,改进后的 FxLMS 滤波器降噪效果优于 LMS 自适应滤波器。

**关键词:**数字降噪耳机;自适应滤波器;滤波- $x$  最小均方差;预测滤波器

**中图分类号:**TP 273+2

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.2095-0411.2015.02.014

## Digital Headphone Noise Cancellation Research Based on FxLMS Algorithm and Prediction Filter

HUAN Zhan, DAI Yong-hui, WANG Zhen-hai, TAO Ya-hui

(School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** The adaptive filter based on LMS and NLMS algorithms is usually used to remove the noise in digital headphones. Because of the latency of secondary-path and AD/DA conversion, these filter output signal can't collaborate with the noise. FxLMS algorithm can compensate for secondary-path delay effectively. We combined the prediction filter with FxLMS filter to compensate for AD/DA conversion delays. In the simulation, the FxLMS filter with prediction filter was used to reduce the sampled noise of engine and the noise cancellation effect was compared with LMS adaptive filter. The results indicate that the improved FxLMS filter is superior to the LMS adaptive filter.

**Key words:** digital noise cancellation headphone; adaptive filter; filtered- $x$  least mean square; prediction filter

20 世纪美国 Bose 公司研发主动降噪耳机,最初应用于民航和军事领域,发展至今主动降噪耳机已逐步走进人们的日常生活。随着生活水平的提高,人们对享受音乐质量的要求也越来越高,所以不断改进数字降噪技术是非常必要的而且具有广阔的市场前景。

由于被动降噪技术很难滤除低频噪声,因此,主

动降噪系统在应对嘈杂的环境噪声效果明显而且效率比较高,其中数字降噪滤波器能够应对更加复杂的环境噪声<sup>[1]</sup>。在有源降噪控制领域,滤波- $x$  最小均方差(FxLMS)算法相比较常用的最小均方差(LMS)和归一化最小均方差(NLMS)等算法而言,是比较常用的自适应控制算法,该算法的主要优点有:第一, FxLMS 算法都能根据不同环境调整结

<sup>\*</sup> 收稿日期:2014-12-20。

作者简介:郇战(1969—),男,陕西咸阳人,硕士,副教授,主要从事数字媒体及嵌入式控制研究。

构;第二,算法容易理解和描述,其运算结构易与标准 DSP 硬件匹配;第三, FxLMS 算法的鲁棒性较高。同时考虑到在数字降噪耳机系统中除了次级通道延迟, AD/DA 转换延迟在一定程度上限制了 FxLMS 算法的降噪效果,所以研究中对 FxLMS 的滤波系统进行改进,增加预测滤波器,用于补偿数模转换延迟<sup>[2]</sup>。

## 1 数字降噪耳机系统结构

一般数字滤波器系统中,不能直接对采集的音频信号进行算法分析,需要将采集的模拟信号转换成数字信号,而且实际输入信号是 AD 转换过的数字信号,若一次 AD、DA 转换分别延迟  $M$ 、 $N$  个采样点,那么整个过程至少存在  $M+N$  个采样点的延迟<sup>[3]</sup>。同时主动噪声控制系统的输出信号不是直接与初级噪声信号相加,而首先要通过扬声器转换成次级声音信号,用以抵消初始噪声;经过一定的传播延迟,再把完成抵消干涉后的残余振动噪声经过误差传感器转换成电信号,才得到误差信号。从扬声器等发声元器件到误差传感器之间的通路称为次级通道。次级通道的存在,使误差梯度的瞬时测量值不再是真实的梯度的无偏估计<sup>[4]</sup>。

本文采用滤波器是对一般自适应滤波器进行改进,利用 FxLMS 算法对输入信号和误差信号进行分析,得到一组权值系数,再将这组权值系数对预测滤波器的输出信号进行修改,最终滤波器产生一个与原始噪声信号尽可能相同的信号,从而抵消噪声。本文研究的数字降噪耳机系统如图 1 所示,整个降噪系统的处理过程主要分为输出信号的计算和滤波器权值更新 2 个部分。其中  $u(t)$  为外部环境噪声,由数字降噪耳机的外部麦克风采集的。 $P(z)$  低通滤波函数,相当于耳机的被动消噪(耳罩),  $S(z)$  为次级通道函数,即从扬声器等元

传递函数是作为已知的。与一般 FxLMS 算法自适应滤波器不同,本文研究中,预测滤波器的输出信号  $x'(n)$  经次级通道函数后,作为 FxLMS 算法滤波参考信号,同时 FxLMS 计算出的权值系数对  $x'(n)$  进行修改<sup>[5]</sup>。

## 2 FxLMS 算法和预测滤波器

相比 LMS 自适应滤波器,本研究主要考虑到数字降噪耳机在实际应用中存在 AD 转换延迟和次级通道函数  $S(z)$  延迟,这就导致滤波器输出信号无法及时与噪声信号协调起来。采用滤波- $x$  均方差算法与预测滤波器解决这 2 种延迟。

### 2.1 FxLMS 算法

对于次级通道函数的延迟 Morgan 提出在滤波参考信号通道放置一个相同的滤波器来对算法的权值进行修改,这就是 FxLMS 算法<sup>[6-7]</sup>。

假设原始噪声信号为  $u(t)$ , 滤波器产生的反向噪声信号为  $y(t)$ ,  $x(t)$  为噪声信号经过初级通道后的低频噪声信号,  $p(n)$  为低通滤波传递函数,则

$$x(t) = u(t) * p(t) \quad (1)$$

其中“ $*$ ”表示卷积,由于次级通道的存在,所以实际与原始噪声信号抵消干涉的反向噪声信号为  $y'(t)$ , 如图 1 所示,  $\Delta a$  为 AD 转换延迟的采样点数,  $\Delta d$  为 DA 转换延迟的采样点数,  $\Delta t$  为:

$$\Delta t = \Delta a + \Delta d \quad (2)$$

则误差传感器传输到滤波器中的实际误差信号  $e(n - \Delta a)$  可以表示为:

$$e(n - \Delta a) = x(n - \Delta a) - y'(n - \Delta t) \quad (3)$$

FxLMS 算法用到的是预测滤波器的输出值,若 FIR 滤波器的阶数为  $k$ , 则滤波器在  $n$  时刻的输出信号  $y(n)$  为:

$$y(n) = \mathbf{x}'^T(n) \boldsymbol{\omega}(n) \quad (4)$$

其中  $\mathbf{x}'^T$  为预测滤波器输入到 FxLMS 滤波器中的一组信号数据。

滤波器输出信号  $y(n)$  经过次级通道后为

$$y'(n) = y(n) * s(n) \quad (5)$$

$s(n)$  为次级通道函数,  $\mathbf{r}(n)$  为滤波后参考信号向量:

$$\mathbf{r}(n) = \mathbf{x}'^T(n) \mathbf{s}(n) \quad (6)$$

FxLMS 算法中,原始噪声信号  $\mathbf{x}(n)$ 、次级通道函数  $\mathbf{s}(n)$  是已知的,仿真中  $\mathbf{s}(n)$  可以利用  $L$  阶 FIR 滤波器进行建模,即

$$\mathbf{s}(n) = [s(n), s(n-1), \dots, s(n-L+1)]^T \quad (7)$$

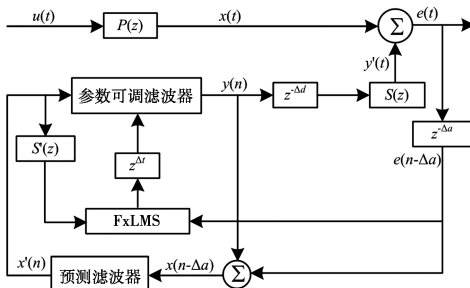


图 1 数字降噪耳机系统结构图

Fig. 1 System structure of digital noise reduction headphones

件到误差传感器之间的传递函数;在仿真中这 2 个

将式(3)带入式(4),整理可以得到

$$\mathbf{y}'(n) = \mathbf{r}^T(n) * \boldsymbol{\omega}(n) \quad (8)$$

FxLMS 的权值系数的迭代推导公式为:

$$\boldsymbol{\omega}(n+1) = \boldsymbol{\omega}(n) - 2\mu e(n)\mathbf{r}(n) \quad (9)$$

其中: $\mu$  为收敛系数,取初始权值的值为 0,通过得到的权值系数能够确定滤波器的输出信号  $\mathbf{y}(n)$ 。由于 AD/DA 延迟的存在,图 1 中 FxLMS 算法的输入值就有所变化,对于权值的计算就需要进行改进,则式(8)改写成:

$$\boldsymbol{\omega}(n+1) = \boldsymbol{\omega}(n - \Delta t) - 2\mu e(n - \Delta t)\mathbf{r}(n) \quad (10)$$

## 2.2 预测滤波器

在实际数字降噪耳机系统中,AD/DA 转换的延迟也是不能忽略的,一定程度上限制了 FxLMS 算法的降噪效果,针对 AD/DA 转换延迟,可以通过设置预测滤波器来解决<sup>[8-9]</sup>。如图 1 所示,预测滤波器的输出信号为  $x'(n)$ ,假设滤波器为  $p$  阶,则  $x'(n)$  可以表示为:

$$x'(n) = - \sum_{i=1}^p a_i x(n - \Delta a - i) \quad (11)$$

其中  $a_i$  为预测系数,可以通过线性预测算法确定:

$$E_n = \sum_n [x(n) - \sum_{k=1}^p w_k x(n-k)]^2 \quad (12)$$

当均方差  $E_n$  达到最小时,预测效果最佳,此时  $E_n$  关于  $a_k$  的偏导数为 0。

若  $R(k)$  为噪声信号的自相关函数,则

$$R(k) = - \sum_{i=1}^p a_i R(|i-k|) \quad (13)$$

式中  $k=1,2,\dots,p$ 。

自相关矩阵以主对角线对称,该方程可以通过 Levinson-durbin 算法快速求解<sup>[10]</sup>,从而得到唯一的一组线性预测系数。

## 3 仿真结果与分析

本次仿真将语音信号与发动机噪声混合,结合 FxLMS 算法和线性预测算法利用 Matlab 对噪声信号进行预测并输出反相噪声信号,达到降噪的目的。同时设计 LMS 自适应滤波器,对该混合音频信号降噪,与本文研究的滤波器进行比较。

仿真中所采用的发动机噪声时长为 3s,首先需要设置预测滤波器,利用预测滤波器对发动机噪声进行预测,通过仿真选择合适阶数的预测滤波器。为了更加清晰的显示噪声的预测情况,不妨取第

200 帧噪声信号的预测波形,图 2 为预测滤波器预测的噪声波形,从图中可以看出,随着滤波器阶数的提高,预测噪声的波形越接近于原始噪声信号,但同时考虑到阶数越高,运算速度越慢,所以仿真中通过比较各阶数滤波器的预测情况和运算速度,最终决定采用六阶滤波器。

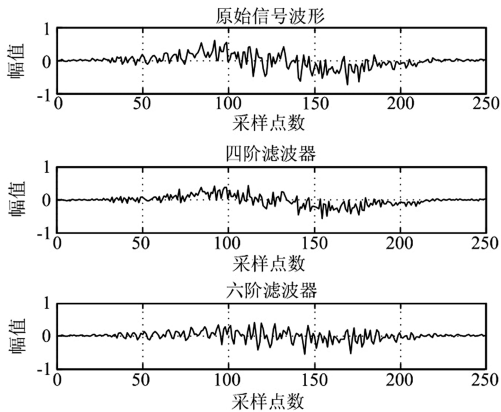


图 2 预测滤波器  
Fig. 2 Prediction filter

考虑到次级通道延迟和 AD/DA 转换延迟,其中次级通道延迟设置 2 个采样点(滤波参考信号),AD 转换延迟 2 个采样点(误差信号),DA 延迟 1 个采样点(降噪系统的输出信号)。因为在 LMS 滤波器中没有对延迟进行补偿,所以输出信号会被延迟 5 个采样点与输入信号  $x(n)$  叠加。

增加预测滤波器后的 FxLMS 滤波器的降噪效果如图 3 所示,从图中可以看出,滤波器后噪声信号的幅值都明显降低,且滤波后信号的波形与原始语音信号非常接近。<sup>[11]</sup>

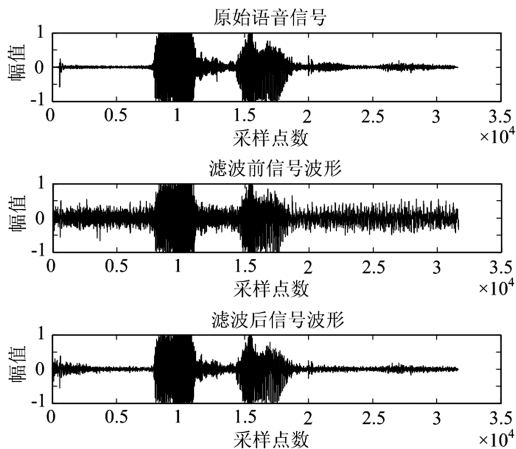


图 3 信号波形图  
Fig. 3 Waveform figure of signal

图 4 为原始噪声信号、本文研究方法滤波后和 FxLMS 滤波后噪声信号的频谱图。从图中可以看

出,相比传统 FxLMS 降噪方法,本文研究的滤波器滤波后的残留噪声的强度更低。

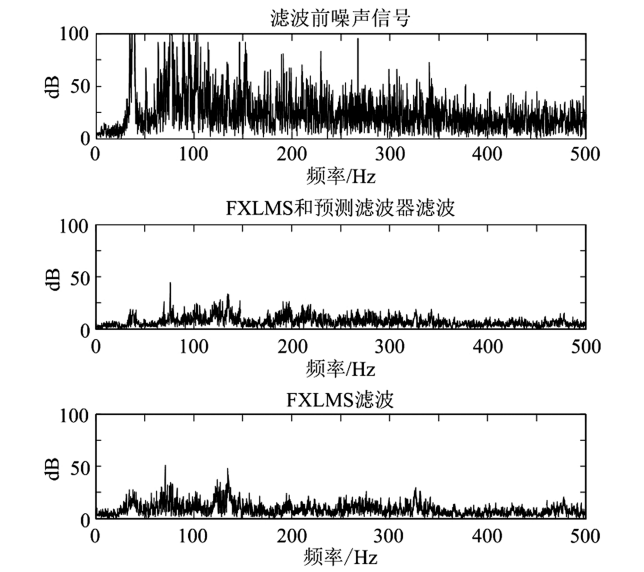


图 4 频谱图  
Fig. 4 Frequency spectrogram

用本文研究方法滤波后的噪声信号相比原始信号,降低了 17~40dB;整体而言,在低频段,用本文的研究方法降噪效果相比传统的 FxLMS 降噪,降噪效果更加明显。因为同时考虑到次级通道延迟和 AD/DA 转换延迟,仿真中设置延迟不同采样点数,将 3 种滤波器的降噪效果进行对比,结果如图 5 所示。从图中可看出,如果仿真中不设置延迟样本数时,3 种滤波器的降噪效果比较接近;当出现第 1 个延迟采样点时,降噪效果都有所下降,但是 LMS 滤波器的降噪效果降低较大,本文研究的滤波器和传统的 FxLMS 滤波器的降噪效果也略有下降,随着延迟采用点数的增加,3 种滤波器的降噪效果都有所降低,总体而言,本文研究的 FxLMS 和噪声预测滤波器的降噪效果更好。

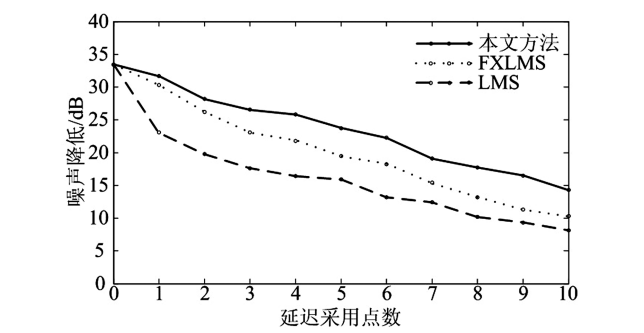


图 5 噪声降低与延迟采样点数

Fig. 5 Noise reduction and delayed sampling points

## 4 结 论

本文是在基于 FxLMS 算法的自适应滤波器基础上进行改进研究,预测原始噪声信号,然后更新 FxLMS 算法的权值,使得降噪系统输出的噪声反向信号能够与实际噪声信号协调起来,补偿 AD/DA 转换延迟和次级通道延迟。仿真结果中,从时域看,改进后 FxLMS 降噪相比 LMS 滤波器,噪声降低的幅值要略大于 LMS 滤波器。从频域角度上看,改进后 FxLMS 降噪效果与原始信号相比,在整个低频段噪声能量降低非常明显,同时相比 LMS 滤波器,残留噪声的能量更低。所以处于低频噪声污染的环境时,如飞机引擎,交通噪声,变压器等,改进后 FxLMS 数字降噪耳机的降噪效果要更具有优势。

## 参考文献:

[1]Akhtar M T,Abe M,Kawamata M.A new variable step size LMS algorithm -based method for improved online secondary path modeling in active noise control systems[J].IEEE Transactions on Audio,Speech, and Language Processing,2006,14(2):720-726.

[2]张锋,李以农,丁庆中.FxLMS 算法的实现及硬件在环仿真验证[J].重庆大学学报,2013,36(8):26-32.

[3]Kuo S M,Mitra S,Gan W S.Active noise control system for head-phone applications[J].Control Systems Technology,IEEE Transactions on,2006,14(2):331-335.

[4]于华民,朱海潮,施引.自适应逆控制 FxLMS 算法有源噪声控制仿真研究[J].海军工程大学学报,2003,15(5):22-25.

[5]Krishnamurthy N,Mansour M M,Cole R.Implementation challenges for feedback active noise cancellation[C].Dallas,ICASSP,2012:1649-1652.

[6]孙旭,陈端石.次级通道模型误差下滤波 X 型最小均方差算法性能的分析[J].声学学报,2003,28(1):73-78.

[7]陈玉明,谢斐星,吴克寿,等.基于邻域关系的网络入侵检测特征选择[J].常州大学学报(自然科学版),2014,26(3):1-5.

[8]陈辉,王永良,花良发.线性预测类算法解相干性能分析[J].系统工程与电子技术,2005,27(1):155-158.

[9]Kannan Govind,Milani Ali A,Panahi Issa M S,et al.An efficient feedback active noise control algorithm based on reduced-order linear predictive modeling of FMRI acoustic noise [J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering,2011,58(12):3303-3309.

[10]张永春,王明江.线性预测编码中 Levinson-Durbin 算法的 ASIC 实现[J].计算机与数字工程,2005,33(9):119.

[11]陈黎霞,李亚萍,姚淑霞.基于 LMS 算法和 Matlab 的自适应滤波器的设计[J].华北水利水电学院学报,2008,29(4):51-53.

(责任编辑:李艳)