

文章编号 1004-924X(2014)12-3377-07

## 数字超声波信号中有色噪声的自适应滤波

崔园园\*, 王伯雄, 柳建楠, 王浩源

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**针对测试环境中常存在的超声波频段的有色干扰噪声,设计了一种基于横向滤波器和最小均方误差自适应滤波算法的自适应对消器结构,并提出了固定步长和自适应步长相结合的自适应滤波算法流程。该方法增设了一个接收环境噪声的专用探头来自动跟踪噪声特性的改变,无需手动设置自适应滤波器参数和期望信号。通过自适应步长调整算法与固定步长方法结合,该方法能够在实现良好滤波效果的同时兼顾快速跟踪环境的变化。实验表明,提出的方法可以有效滤除目标超声波信号频带之外频率点处的有色干扰噪声,信噪比改善幅度可达 16 dB;时间复杂度为  $O(n)$ ,可实现实时处理。本文方法可以在无人工干预下自动、实时、有效地滤除与超声波信号频率接近的有色干扰噪声,已被成功地应用于气体超声波流量测量中。

**关键词:**超声波信号;有色噪声;信号检测;自适应滤波;自适应步长

**中图分类号:**TH814.92 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142212.3377

## Adaptive filtering for colored noise in digital ultrasonic signals

CUI Yuan-yuan\*, WANG Bo-xiong, LIU Jian-nan, WANG Hao-yuan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

\* Corresponding author, E-mail: cuiyy08@mails.tsinghua.edu.cn

**Abstract:** For colored interference noise in digital ultrasonic signals at ultrasonic frequency band, an adaptive canceller was designed based on a transversal filter and the least mean square adaptive filtering algorithm. An adaptive filtering algorithm was proposed combining the fixed and adaptive step lengths. The proposed method could track automatically the changes of noise characteristics by adding a special probe to receive the environment noise without manually setting the parameters and the expected signals of the adaptive filter. By combining adaptive step method and fixed step method, the proposed method has good tracking and steady-state properties. Experiment results show that proposed method filters effectively out the colored noise located outside the frequency band of the target ultrasonic signal in real time and the signal-to-noise has improved up to 16 dB and the time complexity is  $O(n)$ . The method has been successfully applied to gas ultrasonic flow measurement and filters out the colored noise in real time automatically and effectively without the manual intervention.

**Key words:** ultrasonic wave signal; colored noise; signal detection; adaptive filtering; adaptive step-length

收稿日期:2014-05-29;修订日期:2014-07-21.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 11274199)

## 1 引言

超声波信号检测可用于工业场合下距离、裂痕、流量和风速等的测量<sup>[1-2]</sup>。进行实际测量时,超声波探头受选频特性的影响会将声信号中位于探头带宽内的频率成分接收为电信号,形成超声波频段的有色干扰噪声,它是影响超声波信号质量的关键因素。

利用模拟电路搭建带通滤波器或高通滤波器是超声波信号滤波的最直接和最常用的方法<sup>[3]</sup>。这种方法能够滤除大部分的噪声信号,但却无法滤除频率接近信号频率的干扰噪声成分。普通的数字滤波器如切比雪夫、巴普沃斯滤波器的滤波效果上也与模拟滤波器类似<sup>[3]</sup>。在这种情况下,国内外学者开展了对基于小波变换的滤波方法在超声波信号处理上应用的研究,所采用的小波基有渐进小波基<sup>[4]</sup>、匹配小波基等<sup>[5-7]</sup>。小波分析的优点是能够以非均匀的方式对时间轴和频率轴进行划分,同时满足信号中短时高频成分的足够时间分辨率和缓变低频成分的足够频率分辨率,其缺点是计算量较大,实时性差<sup>[7-8]</sup>。此外,小波滤波中需要人工设定固定阈值对各小波基进行选择,算法对环境变化和信号变化的适应性差,从而限制了其在环境变化迅速的场合的应用。

自适应滤波方法<sup>[9]</sup>能够随着环境变换而自适应地调整自身参数,因此非常适用于超声波信号去噪。Sabatini 等人使用 Laguerre 方法对不同信号源所产生的超声波信号进行建模和分类。该方法采用 Laguerre 函数构成的特征空间对不同采样率和不同信噪比条件下的信号进行辨别,本质上是一种自适应滤波方法<sup>[10]</sup>。余厚全等人采用基于有限冲激响应(Finite Impulse Response, FIR)横向结构的递归最小二乘(Recursive Least Squares, RLS)自适应滤波算法对超声换能器的传输特性进行校正,通过不同温度和压力条件下换能器的传输特性的变化逆函数来校正信号误差,但该方法计算量较大,实时性不好<sup>[11]</sup>。Kim 等人先后设计了最小均方误差(Least Mean Square, LMS)自适应滤波方法和多级 LMS 自适应滤波方法,以强化超声波信号的去噪效果<sup>[12-13]</sup>。这类方法是通过在另一个位置安放传感器接收延迟的超声波信号来获取参考信号,滤除的噪声是

与参考信号中的噪声不相关的噪声频率成分,即超声波散射噪声。Carullo 等人通过采用一个两层神经网络调整自适应滤波器的参数来计算超声脉冲信号渡越时间。这种方法存在收敛问题,需要利用先验信息对网络进行训练<sup>[14]</sup>。上述的大部分自适应滤波方法均需要基于经验进行人工介入,另外,现有的自动获取期望信号的方法也无法滤除环境中严重干扰信号质量的有色噪声。此外,上述算法中的步长参数均采用固定值,虽然稳态特性良好,却无法保证环境噪声变化时算法的跟踪特性。

本文提出了一种能够滤除超声波频段有色噪声的自适应滤波方法。该方法通过基于有限冲击响应横向滤波器结构的自适应对消器滤除有色噪声,无需事先设置参数和期望信号。针对超声波信号的特点,在接收超声波信号之前的空闲阶段引入步长自适应调整方法,以在噪声特性变化时实现快速跟踪;在超声波信号到来的阶段采用固定步长算法以保证滤波器良好的稳态特性。这种将自适应步长和固定步长相结合的新算法能够兼顾跟踪特性和稳态特性。

## 2 自适应步长和固定步长相结合的自适应对消器原理

### 2.1 横向滤波器 LMS 算法

自适应滤波器的结构包括有限冲击响应(FIR)和无限冲击响应(IIR)两种<sup>[15]</sup>。由于 IIR 滤波器为非线性相位且存在稳定性问题,故本文采用 FIR 横向结构作为自适应滤波器的结构,其滤波器输出可由下式得出:

$$\hat{d}(n | l_n) = \mathbf{w}^T(n) \mathbf{u}(n) = \sum_{i=0}^{M-1} \omega_i(n) u(n-i). \quad (1)$$

设计最优化滤波器,即调整滤波器参数使得估计误差的均方值最小。在此情形下,算法代价函数  $J = E[e(n) e^*(n)] = E[|e(n)|^2]$  的梯度函数  $\nabla J$  的所有元素应同时等于零,即最佳滤波器参数  $\omega_{\text{opt}}(n)$  应满足:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial \mathbf{w}(n)} \right|_{\mathbf{w}(n) = \omega_{\text{opt}}(n)} = 0. \quad (2)$$

由式(2)可得最佳抽头的权向量为:

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}}(n) = \mathbf{R}^{-1}(n) \mathbf{p}(n), \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{R}(n)$  为抽头输入向量  $\mathbf{u}(n)$  的自相关函数:

$$\mathbf{R}(n) = E[\mathbf{u}(n)\mathbf{u}^H(n)] = \begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \cdots & r(M-1) \\ r^*(1) & r(0) & \cdots & r(M-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r^*(M-1) & r^*(M-2) & \cdots & r(0) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中:  $r(k)$  为相隔  $k$  个延迟的滤波器输入值之间的互相关函数, 即:  $r(k) = E[u(n-i-k)u^*(n-i)]$ 。式(3)中,  $\mathbf{p}(n)$  为抽头输入向量  $\mathbf{u}(n)$  和期望响应  $d(n)$  的互相关函数:

$$\mathbf{P}(n) = E[\mathbf{u}(n)d^*(n)] = [p(0), p(-1), \cdots, p(1-M)]^T, \quad (5)$$

其中:  $p(k)$  为期望响应与相隔  $k$  个延迟的滤波器输入值之间的互相关函数, 即:  $p(k) = E[u(n-k) \cdot d^*(n)]$ 。

由于直接获得式(3)的方程解运算复杂, 故本文采用最小均方误差算法进行迭代求解。LMS 算法是一种基于梯度的迭代算法, 它用瞬时估计代替最速下降算法中的时间平均值, 迭代公式为:

$$\boldsymbol{\omega}(n+1) = \boldsymbol{\omega}(n) - \frac{1}{2} \mu \nabla J = \boldsymbol{\omega}(n) + \mu \mathbf{u}(n) e^*(n), \quad (6)$$

LMS 算法的计算复杂度为  $O(n)$ , 模型简单且易实现。

## 2.2 用于超声波信号的自适应干扰对消器

本文设计了自适应干扰对消器作为消除超声波信号噪声的实际手段, 其原理如图 1 所示。

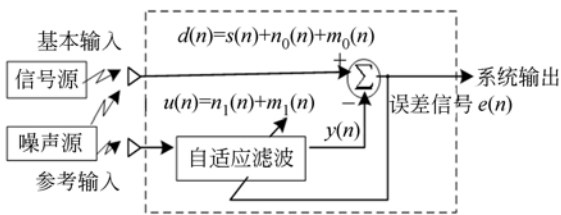


图 1 自适应干扰对消原理图

Fig. 1 Principle of adaptive interference cancellation

将自适应干扰对消器应用于超声波信号去噪时, 需要有两个接收传感器。一个传感器接收被噪声污染的超声波信号, 用于作为基本输入, 另一个传感器只接收环境中的噪声, 用于作为参考输入。图 1 虚线框中部分为自适应对消器结构。选取基本输入作为自适应滤波器的期望响应信号  $d$

$(n)$ ; 参考输入作为滤波器的输入信号  $u(n)$ , 则滤波器的误差信号  $e(n)$  即为要获取的滤波后信号。其中: 期望响应信号  $d(n)$  满足:

$$d(n) = s(n) + m_0(n) + n_0(n), \quad (7)$$

输入信号  $u(n)$  满足:

$$u(n) = m_1(n) + n_1(n). \quad (8)$$

两式中,  $n_0(n)$  和  $n_1(n)$  为来自相同环境噪声源的具有良好相关性的噪声, 且两者均与无噪超声波信号  $s(n)$  不相关。  $m_0(n)$  和  $m_1(n)$  为互不相关且与其他信号成分不相关的高斯白噪声。

假设噪声为平稳随机过程, 同时假设滤波器为无限长、双边的横向滤波器, 并在最小均方误差准则下设计为最佳滤波器, 则由自适应滤波理论得到的误差性能曲面为:

$$J(\boldsymbol{\omega}(n)) = \sigma_d^2 - \mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} + (\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega}_0)^H \mathbf{R} (\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega}_0). \quad (9)$$

这是一个典型的二次曲面, 曲面的最小值为  $J_{\min} = \sigma_d^2 - \mathbf{p}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}$ , 式中  $\sigma_d^2$  为期望信号的方差。满足此最小值的权向量  $\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}}$  为最佳抽头权向量, 即式(3)给出的自适应滤波器的维纳解。在频域内,  $\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}}$  也可用能量谱表示为:

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}}(z) = \frac{\phi_{ud}(z)}{\phi_{uu}(z)}. \quad (10)$$

假设  $n_1(n)$  为噪声  $n_0(n)$  与冲击响应  $h(n)$  的卷积和, 则噪声的自相关谱之间满足关系:  $\phi_{n_1 n_1}(z) = \phi_{n_0 n_0}(z) |H(z)|^2$ 。基于前文中关于信号成分间相关性的假设, 式(10)可以表示为:

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}}(z) = \frac{\phi_{n_0 n_0}(z) H(z)}{\phi_{m_1 m_1}(z) + \phi_{n_0 n_0}(z) |H(z)|^2}. \quad (11)$$

可见, 最佳权向量  $\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}}(z)$  与环境噪声和参考输入中的高斯白噪声相关, 与无噪超声波信号和基本输入中的高斯白噪声无关, 下面分别考虑两种特殊情形。

假设环境中只有高斯白噪声, 而不存在影响输入的相关噪声, 则由式(11)可知, 最佳权向量为  $\mathbf{0}$ 。此时自适应滤波器关闭, 输出为混有高斯白噪声的超声波信号, 信噪比没有改善。

若环境中不存在高斯白噪声, 仅存在影响输入的相关噪声, 则由式(11)可知:

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}}(z) = \frac{1}{H(z)}. \quad (12)$$

自适应滤波器的输出刚好抵消原始输入中的噪声, 滤波后信号的信噪比大为增强。

综上,在将自适应干扰对消器应用于超声波信号去噪时,若调整滤波器权向量使其达到或接近维纳解,则滤波器输出结果的均方误差处于误差性能曲面的最小值处。此时,可以很好地消除与无噪超声波信号不相关的非高斯白噪声,而系统仍将输出高斯白噪声,从而实现了消除环境噪声的目的。

### 2.3 自适应滤波算法的步长选择

式(6)中的步长参数  $\mu$  是影响自适应算法收敛速度和跟踪能力的一项重要参数。步长变大有利于 LMS 算法的快速建立,却将导致稳态失调的增大。因此,要结合实际情况选择步长  $\mu$ 。

在超声波飞行时间测量中,自适应滤波算法的输入向量为环境中的噪声干扰。除非外在环境发生了某些变化改变了噪声的统计特性,否则通常情况下该输入为平稳随机过程。为了使自适应滤波算法能更好地跟踪环境中噪声特性的改变,本文算法在接收声信号的时间区间内采用步长很小的 LMS 自适应滤波算法以减小超声波信号处的均方误差;在接收声信号的区间之外的空闲阶段,利用步长自适应调整的 LMS 自适应滤波算法对时变环境进行跟踪。该算法除了可以自适应地调整 LMS 滤波器参数之外,还能自适应地调整步长,故能够实现快速跟踪。这种带有自动增益的 LMS 算法的基本思想是利用代价函数  $J(\omega(n))$  将步长参数的随机标量梯度作为步长增量来调整步长。更新步长参数的关系式为:

$$\mu(n+1) = \mu(n) - \alpha \hat{\nabla}_{\mu}(n), \quad (13)$$

式中:  $\hat{\nabla}_{\mu}(n)$  为标量梯度  $\nabla_{\mu}(n)$  的估计值,  $\alpha$  为数值很小的正学习速率。根据定义,标量梯度可写为:

$$\nabla_{\mu}(n) = -\frac{1}{2} E[\Psi^H(n) \mathbf{u}(n) e^*(n) + \mathbf{u}^H(n) \Psi(n) e(n)], \quad (14)$$

式中:  $\Psi(n)$  为抽头权向量相对于步长参数的梯度,它可用梯度  $\hat{\Psi}(n)$  进行估计。它们分别为:

$$\Psi(n) = \frac{\partial \omega(n)}{\partial \mu}, \quad (15)$$

$$\hat{\Psi}(n) = \frac{\partial \omega(n)}{\partial \mu(n)}. \quad (16)$$

最终,标量梯度的瞬时估计值可写为:

$$\hat{\nabla}_{\mu}(n) = -\frac{1}{2} [\hat{\Psi}^H(n) \mathbf{u}(n) e^*(n) + \mathbf{u}^H(n) \hat{\Psi}(n) e(n)] = -\text{Re}[\hat{\Psi}^H(n) \mathbf{u}(n) e^*(n)]. \quad (17)$$

## 3 自适应滤波算法流程

本文自适应滤波算法的流程分为两个阶段。

第一阶段为在接收超声波信号的时间区间之外的空闲阶段,利用基于 FIR 滤波器结构的带自动增益的 LMS 自适应滤波算法实现对环境噪声特性的快速跟踪。此时的算法可总结为如下流程:从初始值  $\hat{\omega}(0)$ 、 $\mu(0)$  和  $\hat{\Psi}(0)$  或上一步的计算值  $\hat{\omega}(n)$ 、 $\mu(n)$  和  $\hat{\Psi}(n)$  出发,分别计算:

(1) 当前估计误差  $e(n)$ :

$$e(n) = d(n) - \hat{\omega}^H(n) \mathbf{u}(n), \quad (18)$$

(2) 抽头权向量的更新值  $\hat{\omega}(n+1)$ :

$$\hat{\omega}(n+1) = \hat{\omega}(n) + \mu(n) \mathbf{u}(n) e^*(n). \quad (19)$$

(3) 步长参数的更新值  $\mu(n+1)$ :

$$\mu(n+1) = [\mu(n) + \text{Re}[\hat{\Psi}^H(n) \mathbf{u}(n) e^*(n)]]_{\mu_{-}^{\pm}}^{\mu_{+}^{\pm}} \quad (20)$$

(4) 抽头权向量相对于步长参数的梯度的更新值  $\hat{\Psi}(n+1)$ :

$$\hat{\Psi}(n+1) = [\mathbf{I} - \mu(n) \mathbf{u}(n) \mathbf{u}^H(n)] \hat{\Psi}(n) + \mathbf{u}(n) e^*(n), \quad (21)$$

如此反复进行。第三步中的  $\mu_{-}$  和  $\mu_{+}$  分别代表截取的下限和上限,在本文中设置为  $\mu_{-} = 0$ ,  $\mu_{+} = 0.5$ 。

变步长算法能够快速将滤波器抽头权向量调整到  $\omega_{\text{opt}}(z)$  附近,然而通常情况下步长最优值偏大。为了减小自适应滤波算法的稳态失调,下一阶段采用步长参数较小的固定步长 LMS 自适应滤波算法。考虑到切换步长时,系统需要进行调整,故将算法切换安排在系统不执行接收信号任务的空闲阶段。完成算法调整后,系统执行接收信号的任务,完成对超声波回波信号的自适应去噪。固定步长的自适应滤波算法的流程为:从上一步的计算值  $\omega(n)$  出发,分别计算:

(1) 当前估计误差  $e(n)$ :

$$e(n) = d(n) - \omega^H(n) \mathbf{u}(n), \quad (22)$$

(2) 抽头权向量的更新值  $\omega(n+1)$ :

$$\omega(n+1) = \omega(n) + \mu \mathbf{u}(n) e^*(n). \quad (23)$$

如此反复进行。本文中,固定步长参数  $\mu$  设置为 0.02。经统计,复乘运算与复加运算的复杂度均为  $O(n)$ 。

### 4 测量实验及结果

#### 4.1 实验室干扰实验

为了检验本文算法的性能,在实验室环境下做了干扰实验。超声波飞行时间测量系统架构如图 2 所示。在探头配置上,将探头 1 作为发射探头和一次回波接收探头,探头 2 作为超声波信号接收探头,探头 4 作为参考探头。将探头 3 进行偏转作为环境干扰源。通过信号发生器产生一系列的特定频率的信号,施加到探头 3 上。这样,探头 3 就产生了其它频率的环境干扰噪声信号,该干扰能够被探头 1、2 和其参考探头 4 接收到。本实验的目的在于检验接收探头所接收到的受干扰的信号在经过自适应滤波处理后信号质量是否得到了提高。

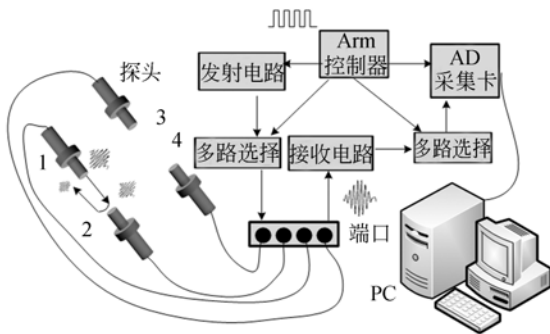
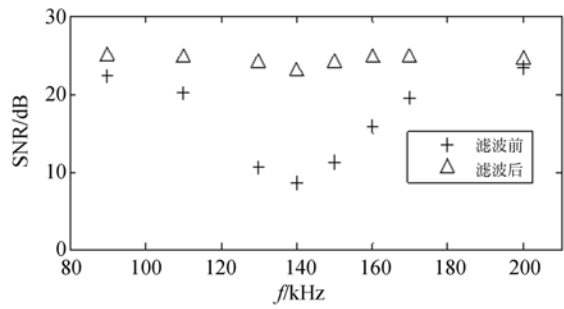


图 2 测量系统外部构造示意图

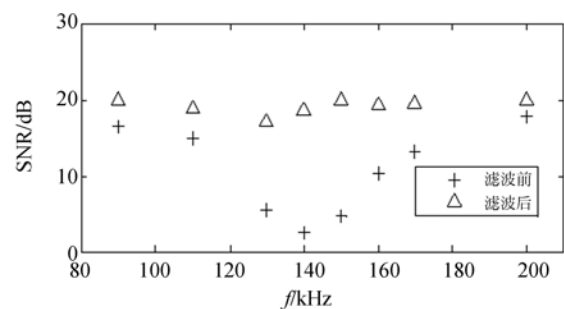
Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

实验显示,本文所提的自适应滤波算法可以对处于超声波频段的有色噪声进行实时滤波,即在采样时间间隔内即可完成对上一时刻采样点的滤波处理。图 3 分别统计了环境中干扰噪声频率为 90、110、130、140、150、160、170 和 200 kHz 的情况下探头 3 的接收信号和探头 1 的回波信号在滤波前后的信噪比(超声波信号频率为 145 kHz)。由于探头的选频作用,虽然滤波前各频率点处信噪比不同,然而,滤波后信号的信噪比得到了很好的改善,在各干扰频率下几乎相同。此外,实验显示:利用 MATLAB 进行滤波处理时,处理 4 096 个数数据点在空闲阶段需耗时 0.17 s,在系统接收阶段需耗时 0.06 s,均远小于采样时长 0.82 s。故该方法能实现边采样边处理,可满足实时性的要求。



(a) 滤波前后直接接收信号的信噪比

(a) SNR of signal received directly before and after filterings



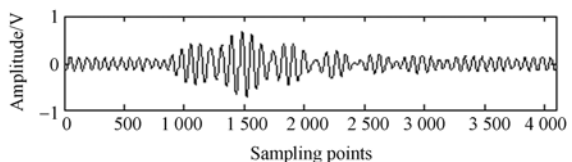
(b) 滤波前后一次回波信号的信噪比

(b) SNR of once echo signal before and after filterings

图 3 不同干扰噪声下的信噪比随频率变化曲线

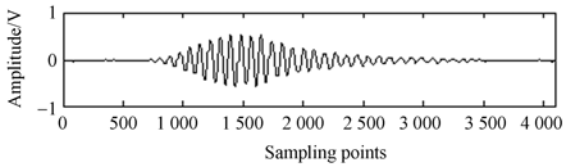
Fig. 3 SNRs vs frequency curves in different interference noise frequencies

图 4 对比了在 140 kHz 的噪声干扰下,本文算法、自适应步长算法以及固定步长算法的滤波效果。图 4(c)显示自适应步长算法虽然能够保证对噪声的快速跟踪,但稳态特性欠缺导致超声波信号产生畸变。与此相反,图 4(d)中的固定步长算法的跟踪特性较差,信号到达时刻滤波算法仍未收敛到最佳权系数状态,干扰噪声仍然存在。图 4(b)中的本文算法综合了二者的优点,同时兼顾了跟踪性能和稳态性能。



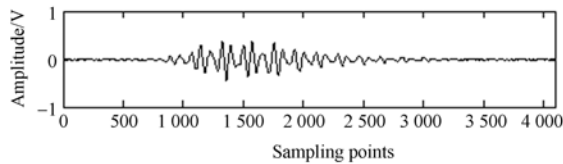
(a) 原始信号

(a) Original signal



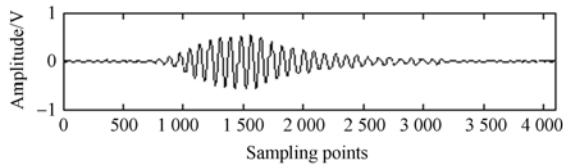
(b) 本文算法的滤波效果

(b) Results of proposed algorithm



(c) 自适应步长调整算法的滤波效果

(c) Results of adaptive step-adjusting algorithm



(d) 固定步长算法滤波效果

(d) Results of fixed step algorithm

图 4 不同步长算法的滤波效果对比图

Fig. 4 Filtering results of different step-adjusting algorithms

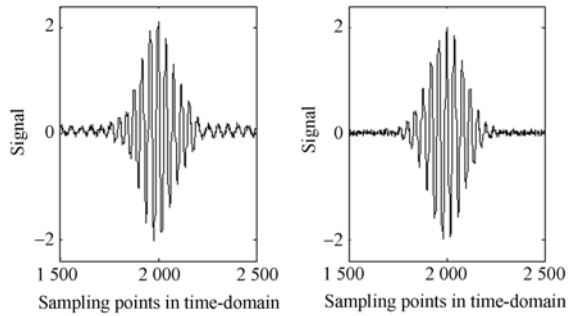
#### 4.2 气体超声波流量测量实验中信号质量的改善

在气体超声波流量测量中,当气流经过管道中的一些调节装置,如阀门、疏流器、局部凸起结构等时会产生高频干扰噪声。由于大部分超声波流量计均配备有多个传感器,以构成多个声道,故将某时刻不执行超声波信号接收任务的传感器用于接收噪声,构成自适应对消器中的参考信号来源。因此,在气体超声波流量测量中添加自适应滤波模块无需增加硬件成本。图 5(a)为某次现场采集的滤波前信号,由于超声波探头的选频特性,信号中只含有频率与超声波信号频率接近的设备干扰噪声和白噪声。图 5(b)为添加了自适应滤波处理模块后获取的信号。可见,有色噪声

#### 参考文献:

- [1] 王鹏飞. 弯曲振动压电超声换能器机电耦合模型的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
WANG P F. *Research on electromechanical coupling model of piezoelectric ultrasonic transducer working at bending vibration mode* [D]. Harbin:

被很好地滤除。存留的白噪声能够通过后续时间测量过程中的互相关和自相关算法滤除。在气体流量测量中,采用自适应滤波滤除有色噪声可使得超声波飞行时间测量精度从亚微秒级改善至纳秒级,进而提高流量测量精度,增强流量测量对环境的抗干扰能力。



(a) 滤波前的超声波信号

(b) 滤波后的超声波信号

(a) Ultrasonic signal received directly

(b) Ultrasonic signal filtered by proposed algorithm

图 5 气体超声波流量测量实验结果

Fig. 5 Results in ultrasonic flow measurement

## 5 结 论

本文对滤除超声波频段有色噪声的自适应滤波方法进行了研究,设计了一种基于横向滤波器和 LMS 自适应滤波算法的自适应对消器结构,提出了将固定步长和自适应步长相结合用于超声波信号去噪的算法,该算法能够兼顾算法跟踪环境变化的特性和采集信号阶段的稳态特性。实验表明,本文方法可以滤除目标超声波信号频带之外频率点处的有色干扰噪声,信噪比改善幅度可达 16 dB;方法的时间复杂度为  $O(n)$ ,能够满足实时性要求。将本文算法应用于气体超声波流量测量时,可利用各个传感器轮流为其余传感器收集噪声,无需增加硬件成本,且能够显著改善信号质量,进而提高测量精度。

Havin University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)

- [2] 张金,崔园园,吴学伍,等. 基于时间放大技术的新型时间电压转换器[J]. 光学精密工程,2013,21(12): 3223-3230.  
ZHANG J, CUI Y Y, WU X W, et al. Time to voltage converter based on time amplifiers [J].

- Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3223-3230. (in Chinese)
- [3] 尤政,杨冉,张高飞,等. 激光测距系统整形模块和低通滤波模块优化设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10):2527-2533.  
YOU Z, YANG R, ZHANG G F, *et al.*. Optimization of shaping circuit and low-pass filter in laser ranging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2527-2533. (in Chinese)
- [4] CHAPA J O, RAO R M. Algorithms for designing wavelets to match a specified signal [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, 48(12): 3395-3406.
- [5] HAN X H, CHANG X M. An intelligent noise method for chaotic signals based on genetic algorithms and lifting wavelet transforms [J]. *Information Science*, 2013, 218(1):103-118.
- [6] LAZARO J C, SAN EMETERIO J L, RAMOS A, *et al.*. Influence of thresholding procedures in ultrasonic grain noise reduction using wavelets [J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(1-8):263-267.
- [7] 耿森林,尚志远,石焕文,等. 基于小波变换的激光超声信号处理[J]. *云南大学学报:自然科学版*, 2005, 27(1):44-46, 51.  
GENG S L, SHANG ZH Y, SHI H W. Laser ultrasound signal processing based on Wavelet Transform [J]. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition*, 2005, 27(1):44-46, 51. (in Chinese)
- [8] 梁永麟. 基于小波分析的超声波检测信号处理研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2012.  
LIANG Y L. *Research on ultrasonic signal processing based on wavelet analysis* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [9] KARABOGA N, LATIFOGLU F. Adaptive filtering noisy transcranial Doppler signal by using artificial bee colony algorithm [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26(2):677-684.
- [10] SABATINI A M. A digital-signal-processing technique for ultrasonic signal modeling and classification [C]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, 50(1):15-21.
- [11] 余厚全,黄载禄,屈万里. 基于 RLS 算法的超声换能器温度压力特性校正[J]. *仪器仪表学报*, 1997, 18(4):378-383.  
YU H Q, HUANG Z L, QU W L. Temperature and pressure characteristic correction of ultrasonic transducer based on RLS algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1997, 18(4): 378-383. (in Chinese)
- [12] A1 BAE S, KIM J, UDPA L, *et al.*. A new adaptive grain noise cancellation filtering technique [J]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation of Materials*, 1997, 17:759-66.
- [13] KIM J, UDPA L, UDPA S. Multi-stage adaptive noise cancellation for ultrasonic NDE [J]. *NDT&E International*, 2001, 34:319-328.
- [14] CARULLO A, FERRARIS F, GRAZIANI S, *et al.*. Ultrasonic distance sensor improvement using a two-level neural network [J]. *NDT & E International*, 1997, 30(5):326-330.
- [15] 郭宁,吕俊伟,邓江生. 光电跟踪系统纯角度滤波器的设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1818-1824.  
GUO N, LV J W, DENG J S. Design of filter only by angle information in opto-electronic tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1818-1824. (in Chinese)

#### 作者简介:



崔园园(1987—),女,山东聊城人,博士,2008年于中国科技大学获得学士学位,2013年于清华大学获得博士学位,现于清华大学精密仪器系从事博士后研究工作,主要从事超声波流量测量技术与成像技术的研究。E-mail: cui-yy08@mails. tsinghua. edu. cn

#### 导师简介:



王伯雄(1947—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,1970年、1982年于清华大学分别获得学士、硕士学位,主要从事精密仪器与测试技术, MEMS 技术、光学测量技术、生物医学技术方面的研究。E-mail: wangbx@mail. tsinghua. edu. cn