

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905336

# 直线型光纤 Sagnac 干涉仪声传感器及其去噪方法研究\*

何乐<sup>1,2,4</sup>, 丰鑫<sup>1,2</sup>, 吴华明<sup>1,2</sup>, 黄丽贞<sup>3</sup>, 肖永生<sup>3</sup>

(1. 无损检测与光电传感技术及应用国家地方联合工程实验室 无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063;  
2. 南昌航空大学测试与光电工程学院 江西省光电检测技术工程实验室 南昌 330063; 3. 南昌航空大学信息工程学院  
南昌 330063; 4. 华中科技大学光学与电子信息学院 武汉 430074)

**摘要:** 光纤声传感器可广泛应用于能源和安防等重要领域,但其噪声复杂进而影响测量精度和稳定性,针对此问题,基于直线型光纤 Sagnac 干涉仪声传感系统,提出了一种改进小波阈值去噪方法,在此基础上,结合信号特征还设计了一种综合滤波方案,以提高系统语音探测质量。以实测语音信号为例,所提算法能将信号 Allan 方差值减小到  $8.24 \times 10^{-14}$ , 而类间距判据值增大为 6.91,有效改善了语音信号的质量。所提方法可广泛应用于声音传感领域,且对于光纤干涉仪声传感系统后期声源定位的准确性也具有重要意义。

**关键词:** 光纤声传感器;小波阈值算法;去噪;Allan 方差;类间距

**中图分类号:** TH744.3      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 140.3035

## Research on acoustic sensor based on linear optical fiber Sagnac interferometer and its de-noising method

He Le<sup>1,2</sup>, Feng Xin<sup>1,2</sup>, Wu Huaming<sup>1,2</sup>, Huang Lizhen<sup>3</sup>, Xiao Yongsheng<sup>3</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Non-Destructive Testing and Optoelectronic Sensing Technology and Applications, Nanchang 330063, China; 2. Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, School of Measuring and Optical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 3. School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 4. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Fiber optic acoustic sensors can be widely used in energy source, security defense and other important fields, however their noise is complex, which affects the measurement accuracy and stability. Aiming at this problem, in this paper, an acoustic sensor system based on linear fiber optic Sagnac interferometer is demonstrated, and an improved wavelet threshold de-noising algorithm is proposed. Furthermore, on this bases, combining with the signal characteristics, a synthesis filtering scheme is designed to improve the speech detection quality of the system. Taking the actually measured speech signal as an example, with this algorithm the Allan variance of the signal is reduced to  $8.24 \times 10^{-14}$ , while the class spacing criterion is increased to 6.91, which effectively improve the quality of detected speech signal. The proposed algorithm can be widely used in acoustic sensing field, and has great significance for the accuracy of the later stage acoustic source localization for the optical fiber interferometer acoustic sensing system as well.

**Keywords:** fiber optic acoustic sensor; wavelet threshold algorithm; de-noising; Allan variance; class spacing

收稿日期:2019-07-04      Received Date:2019-07-04

\* 基金项目:国家自然科学基金(11964019,11264031)、江西省青年科学基金重大项目(20143ACB21011)、航空科学基金(2017ZC56003,20162856004)、无损检测技术教育部重点实验室基金(EW201980090,ZD201629004)、江西省自然科学基金(20192BAB202006,20192BAB207001,20151BAB207054)、江西省教育厅科技项目(GJJ170594)、江西省图像处理与模式识别重点实验室开放基金(ET201908119)、南昌航空大学研究生创新专项基金(YC2017051)项目资助

## 0 引言

光纤传感器由于其抗电磁场和地球环流的干扰能力强、可靠性好、可长距离传输、安全性高等优点,被广泛用于测量温度、压力和应变等物理量;其中,基于光纤声传感器(fiber acoustic sensor, FAS)自身特性,将其用于传感可以有效解决传统电声传感器难以在强电磁干扰、潮湿和腐蚀等极端现场使用的问题,可广泛应用于医疗、航空、能源和安防等重要领域<sup>[1-2]</sup>。目前国内国外针对光纤声传感器提出了多种设计方案,主要可归纳为:基于 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的语音传感装置、基于 Sagnac 光纤干涉仪的语音传感系统、基于 FBG 光纤振动传感器的语音传感装置和基于  $\varphi$ -OTDR 光纤振动传感器的语音传感系统等<sup>[3-6]</sup>。基于 Sagnac 原理的相位调制型光纤声传感器,因其具有不存在相位衰落、对光源线宽要求低等优点而广受关注。如周书铨等<sup>[7]</sup>研究了微弯光纤麦克风理论和实验模型,但是其频响特性和动态范围还需进一步加强;吴东方等<sup>[8]</sup>利用 3×3 光纤耦合器,设计了一种基于 Sagnac 光纤干涉仪的语音传感器,但是该系统解调复杂,定位误差较大;刘冲等<sup>[9]</sup>设计了一种 Sagnac/ $\Phi$ -OTDR 混合型光纤语音传感器,但该系统无法将语音与定位结果对应起来。基于 3 dB 耦合器,周正仙等<sup>[4]</sup>设计了一种干涉型光纤语音传感器,并研究了其降噪方法,但是该光纤声传感器存在光的互异性,从而导致信号互相抵消,产生相位差衰变,不能产生干涉信号输出的缺点。为了克服上述缺点,基于 3×3 耦合器,白清等<sup>[2]</sup>和 Wang 等<sup>[1,10]</sup>研究了 Sagnac 光纤干涉仪的“零频”定位精度问题。不同于上述文献,基于 3×3 耦合器,本文重点研究了直线型 Sagnac 光纤干涉仪语音传感及去噪问题。

语音信号在传输过程中不可避免的会遭受噪声的干扰,因此在复杂环境下的测量精度和准确度成为影响其实际应用的重要因素,因而有必要进行噪声滤除。传统的滤波算法主要是根据噪声频率特性对其进行处理。小波变换则是在时域和频域中对信号的局部变换,由于能较好地体现信号的相关性,从而可在一定程度上去除与信号源同频的噪声,而成为信号处理中最实用的方法之一<sup>[11]</sup>。

鉴于以上事实,为提高 FAS 在复杂环境下的测量准确度,针对其输出信号及所含噪声特性,基于现有小波阈值去噪算法,本文提出了一种改进小波阈值去噪算法,在此基础上,结合信号特征还设计了一种综合滤波方案。理论分析及实验测试结果表明,本文算法较传统去噪方法效果有明显改善,这能为 FAS 推广应用起到重要的推动作用。

## 1 Sagnac 干涉型光纤声传感器

如上所述,由于传统的基于 2×2 耦合器的 Sagnac 干涉型光纤传感器存在缺陷,故本文采用了基于 3×3 耦合器的直线型 Sagnac 光纤干涉仪语音传感系统,如图 1 所示。

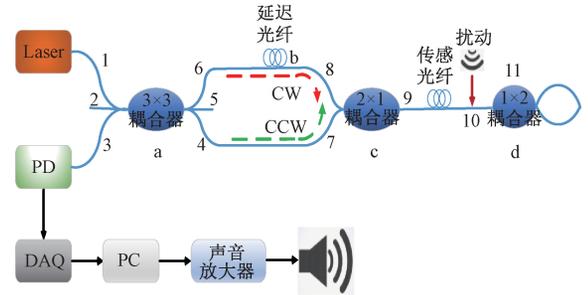


图 1 直线型 Sagnac 光纤干涉仪语音传感系统

Fig.1 The speech sensor system based on linear optical fiber Sagnac interferometer.

图 1 所示的语音传感系统包括:宽带光源(Laser)、光电探测器(PD)、3×3 耦合器、延时光纤、2×1 和 1×2 耦合器、传感光纤。

首先,光源经 3×3 耦合器被分为 3 束相干光,其中两束接入光纤,分别被分成沿顺时针(CW)和逆时针(CCW)行进的光束。然后,沿顺时针方向行进的光再经延迟光纤和 2×1 耦合器;而沿逆时针方向行进的光束则直接经过 2×1 耦合器,这两路光然后被耦合进传感光纤,最后被传感光纤末端的 1×2 耦合器返回两路光。两束光返回后,再经 2×1 耦合器和 3×3 耦合器被光电二极管接收变成电信号,该信号由数据采集卡输入电脑进行分析与去噪。此系统中 1×2 耦合器的作用类似反射镜,利用它可形成直线型 Sagnac 光纤干涉仪语音传感系统。

由上述分析可知,图 1 所示的系统主要光路为<sup>[12]</sup>:

- 1) 1-6-延迟光纤(b)-8-9-10-11-10-9-7-4-3(CW 光路)
- 2) 1-4-7-9-10-11-10-9-8-b-6-3(CCW 光路)
- 3) 1-6-b-8-9-10-11-10-9-8-b-6-3
- 4) 1-4-7-9-10-11-10-9-7-4-3

在以上光路中,光路 1) 与光路 2) 光程相等,其满足干涉条件,能够在 3×3 耦合器中发生干涉,后经光电探测器转换为电信号,该信号经采集卡输入电脑进行分析与去噪。

## 2 小波阈值去噪理论

小波阈值去噪的主要步骤有<sup>[13]</sup>:小波分解、阈值处理以及信号重构。其中,滤波的关键就是对小波系数的

阈值量化处理,去噪的效果受以下因素影响:小波基函数、分解尺度、阈值及阈值函数的选取<sup>[14]</sup>。

## 2.1 小波基函数及分解层数选取

对于小波分解而言,不同小波基函数具有不同的构造方式及特性,其去噪效果也各不相同;在工程应用中,主要通过信号处理的结果与理论分析的误差对小波去噪的效果进行判断,从而选择适当的小波基函数。

另外,去噪效果也会随小波分解层数的改变而变化,理论上分解层数越多,越容易实现信号与噪声的分离,然而分解层数过多易造成信号失真,而当分解层数过低时在进行滤除噪声处理的同时也滤除了部分有用信号<sup>[15]</sup>。目前大多是根据去噪效果从而确定适合的分解层数。

通过对比分析不同阶数的 db 小波基函数、coif 小波基函数、sym 小波基函数去噪效果,以及比较分解重构后的平均误差和最大误差,本文采用 sym5 小波基函数、4 层分解进行去噪处理。

## 2.2 改进小波阈值函数的设计

阈值函数是对小波分解系数处理策略的体现,在实际工程应用中,传统的小波阈值函数主要有硬阈值函数和软阈值函数<sup>[16]</sup>。硬阈值函数在阈值处会由于不连续而易引起 Pseudo-Gibbs 振荡现象;软阈值函数在阈值处连续性较好,然而量化处理后的小波系数存在恒定偏差问题,从而导致部分有用信号丢失;鉴于此,文献<sup>[17]</sup>提出了一种改进的阈值函数,但其消除恒定偏差效果有限。

为了进一步降低恒定偏差,提升小波阈值去噪效果,本文进一步优化设计了阈值函数,其表现形式为:

$$y(x, \lambda) = \begin{cases} x - \frac{\lambda}{2} \left[ \frac{\lambda}{x} + \frac{ax}{\lambda [\exp(|x| - \lambda) + a - 1]} \right] & |x| \geq \lambda \\ 0 & |x| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

对此阈值函数分析可知:

1) 函数性质:根据函数奇偶性定义分析可知该函数为奇函数,这与传统的软硬阈值函数特性一致;另外,根据函数连续性定义分析可知该函数在  $|x| = \lambda$  处连续,这可以改善由硬阈值函数不连续导致的振荡现象;再者,由分析可知该阈值函数渐近线为  $y = x$ , 因此当小波系数较大时,可以有效改善软阈值函数所造成的恒定偏差问题,如图 2 所示。由图 2 可知,本文的改进阈值函数恒定偏差最小。

2) 理论对比:由于  $|x| \geq \lambda$ , 经计算分析可知:

$$\frac{1}{2} \left[ \frac{\lambda}{x} + \frac{a \operatorname{sign}(x)}{\exp(|x| - \lambda) + a - 1} \right] \leq \frac{1}{2} \left\{ \frac{\lambda}{x} + \frac{x a \operatorname{sign}(x)}{\lambda [\exp(|x| - \lambda) + a - 1]} \right\} \quad (2)$$

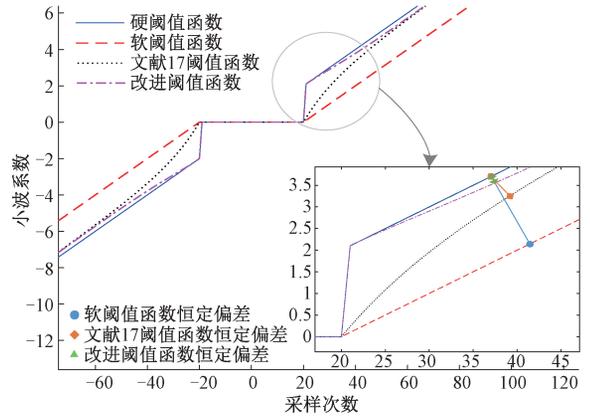


图 2 4 种阈值函数的比较

Fig.2 Comparison diagram of four threshold functions

由式(2)可知此阈值函数能更好的降低信号处理后的小波系数恒定偏差。

## 2.3 改进的阈值处理规则

阈值的选取极大程度的关系到滤波的质量,常见的阈值选取方法有:基于无偏似然估计原理的自适应阈值选择 (rigsure)、启发式阈值 (heursure)、固定阈值法 (sqtwolog)、和极大极小阈值 (minimaxi)<sup>[17]</sup>。从整体和局部处理的关系上,阈值处理又可分为全局阈值处理与分层阈值处理。全局处理即对各层高频系数将根据同一阈值无差别地滤波,而分层处理则是根据信号特性对每一层高频系数基于一个阈值有分别地滤波,理论上分层处理能更加灵活地处理含噪信号中的噪声。具体选择何种阈值估算方式和阈值处理方式,须通过对系统信号特性进行分析才能确定。

### 1) 阈值处理方案

为保证去噪效果,文献<sup>[18]</sup>提出了保留最高层低频系数,而对各层高频系数进行阈值量化处理的方案,基于该阈值处理方案,本文提出了一种改进的处理规则。由 FAS 输出信号特性可知,其噪声信号常处于高频段,且随着分解层数的增加,噪声系数会随之减小;若对所有高频系数采用同一阈值进行处理,不可避免地会过多滤除纯净信号<sup>[19]</sup>。因此若将全局处理改为结合信号特性,对每一层高频系数采用不同的阈值进行滤波,可降低处理所产生的恒定误差,能灵活的实现去噪。

由文献<sup>[20]</sup>对信号和噪声在小波变换下的特性分析可知:

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \max \{ |WT_{2^j} x_n(t)| \} > \max \{ |WT_{2^m} x_n(t)| \} \quad (3)$$

式中:  $WT_{2^m} x_n(t)$  为第  $j+1$  层的小波分解系数。分析可知,第  $j+1$  层的噪声小波系数最大值满足恒小于第  $j$  层最大值的  $\sqrt{2}/2$  倍的关系。因此若基于该式设置阈值,更能

体现噪声随小波分解层数的增大而减小的变化特性,保证去噪效果。

2) 阈值选取

根据语音信号的特征和本 Sagnac 光纤语音传感系统的特点,为了避免产生“过扼杀”现象<sup>[21]</sup>,本文将信号长度改为第一层高频系数长度,其更符合 FAS 应用需求。基于上述分析,本文提出了一种改进阈值形式:

$$\begin{cases} \lambda_j = \frac{\text{median}}{0.6745} \sqrt{2 \ln N_1} & j = 1 \\ \lambda_j = \frac{\sqrt{2}}{2} \lambda_{j-1} & j > 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $N_1$  为第一层高频系数长度;  $\lambda_j$  为第  $j$  层高频系数阈值;  $\text{median}$  为第  $j$  层高频系数的中值。分析可知,该阈值反映了不同分解层数间阈值的关系,满足噪声系数随分解层数变化的规律,且可通过改进第一层系数阈值表达式使其更加符合 FAS 输出信号特性。

### 3 结果与分析

#### 3.1 信号滤波效果评价

现将上述的改进小波阈值去噪算法应用于 FAS 系统中,分析其对含噪信号去噪改善效果。为了更加贴近实际情况,本文将借鉴 Allan 方差法和类间距定义来评价信号去噪效果。

1) Allan 方差常用于噪声特性分析,其可以表示为不同噪声类型的平方和<sup>[22-23]</sup>,其定义为<sup>[24]</sup>:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2(J-1)} \sum_{k=1}^{J-1} [\bar{\omega}_{k+1}(m) - \bar{\omega}_k(m)]^2 \quad (5)$$

式中:  $k = 1, 2, \dots, J$ ;  $J$  为信号分组总数,  $J$  越大,其测量精度越高;  $\bar{\omega}_k(m)$  为每组数据平均值的随机变量集合,满足关系式<sup>[24]</sup>:

$$\bar{\omega}_k(m) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \omega_{(k-1)m+i} \quad (6)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $\omega$  为输出信号数据。分析可知,Allan 标准差越小,所含噪声越少。

2) 类间距判据反映了类别可分离性,其表达式满足<sup>[25]</sup>:

$$S_b = \frac{1}{n_i n_j} \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \delta(\mathbf{X}_k^i \mathbf{X}_l^j) \quad (7)$$

式中:  $n_i$  为  $\omega_i$  类中所包含的样本数;  $\mathbf{X}_k^i$  为  $\omega_i$  中第  $k$  个样本向量;  $\delta$  为两向量间的欧氏距离,满足关系式<sup>[25]</sup>:

$$\delta(\mathbf{X}_k^i \mathbf{X}_l^j) = (\mathbf{X}_k^i - \mathbf{X}_l^j)^T (\mathbf{X}_k^i - \mathbf{X}_l^j) \quad (8)$$

类间距越大,其可分离性越好,所含噪声越少;反之亦然。

由上述分析可知,在进行信号滤波效果评价时,  $\sigma^2$

越小且  $S_b$  越大,其去噪效果越好。基于此,本文将采用 Allan 标准差和类间距判据从定量角度对滤波效果进行分析,而选用去噪前后输出波形图和频谱图从定性角度对滤波效果进行评价。

#### 3.2 去噪效果理论分析

首先,从理论上分析改进小波阈值去噪算法对含噪语音信号去噪改善效果。本文以一段纯净语音信号叠加高斯白噪声为例,分析其对含噪信号去噪的改善效果。图3所示为上述语音信号经不同去噪方法处理后的输出波形,分别是硬、软阈值函数结合固定阈值的规则算法、文献[17]提出的改进阈值算法、本文的改进小波阈值算法以及根据信号特征将本文改进小波阈值去噪算法与带通滤波方法相结合的综合滤波方案。

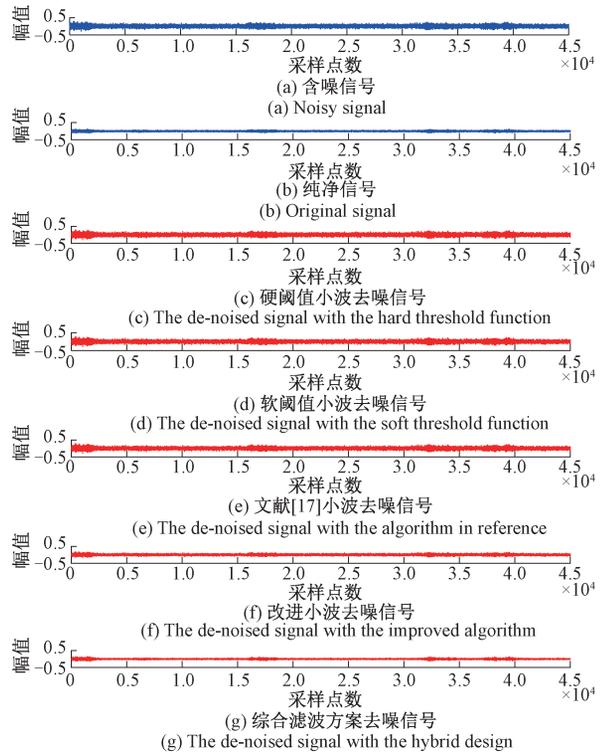


图3 不同去噪算法处理后波形

Fig.3 The processed waveform for different de-noising algorithms

由图3可知,本文所提出的改进小波阈值算法相较于其他3种算法其去噪效果更明显,能更好地还原纯净信号,而综合滤波方案则在其基础上进一步改善了滤波效果。

为了定量分析上述不同去噪算法的滤波效果,本文还分别计算了经各种滤波算法处理后信号的 Allan 标准差( $\sigma^2$ )和类间距判据( $S_b$ ),结果如表1所示。

由表1可知,当初始信号相同时,本文的改进小波阈值算法处理后的信号 Allan 方差值小于软、硬阈及文献[17]处理结果,而综合滤波方案处理后的信号 Allan 方

差值最小;改进小波阈值算法处理后的信号类间距判据值大于软、硬阈值及文献[17]处理结果,而经综合滤波方案处理后的信号类间距判据值最大,这从理论上说明了,本文提出的改进小波阈值算法较其他3种滤波算法可以更好地实现滤除噪声的目的,验证了其有效性。

**表1 不同方法去噪后信号 Allan 方差值和类间距判据对比**  
**Table 1 The comparison of Allan variance and class spacing criterion for the signal de-noised with different de-noising algorithms**

算法	$\sigma^2$	$S_b$
硬阈值算法	$3.90 \times 10^{-8}$	0.002 6
软阈值算法	$4.04 \times 10^{-8}$	0.002 1
文献阈值滤波	$3.96 \times 10^{-8}$	0.024 7
改进小波阈值	$2.31 \times 10^{-9}$	0.718 4
综合滤波方案	$4.79 \times 10^{-13}$	1.115 8

**3.3 语音信号实测及去噪分析**

图4所示为直线型 Sagnac 光纤干涉仪语音信号测试户外布线效果。测试中,光源采用中心波长为1548 nm 的 ASE 宽谱光源,输出功率为0.8 mW,传感光纤为单模光纤,数据采集卡为NI PCI-6220。为验证去噪效果,选取了实测的两段语音信号进行试验。



图4 语音信号测试户外布线效果

Fig4 The outdoor optical fiber layout diagram for speech signal test

图5、6所示为两段实测语音信号经不同去噪方法处理后的输出波形。分别是常规小波滤波法(硬阈值结合固定阈值规则)、文献[17]提出的改进阈值算法、本文的改进小波阈值去噪算法以及综合滤波方案。

对图5和6分析可看出,实测采样信号中,有用信号部分被噪声覆盖,4种滤波方法对实测信号都有一定去噪效果,但常规方法去噪的同时也滤除了大部分有用信号,且处理后剩余噪声仍然较多;文献[17]小波去噪虽有改进但滤波效果有待进一步提高;而本文改进小波阈值去噪方法的输出波形毛刺更少,仅含少量噪声信号,且

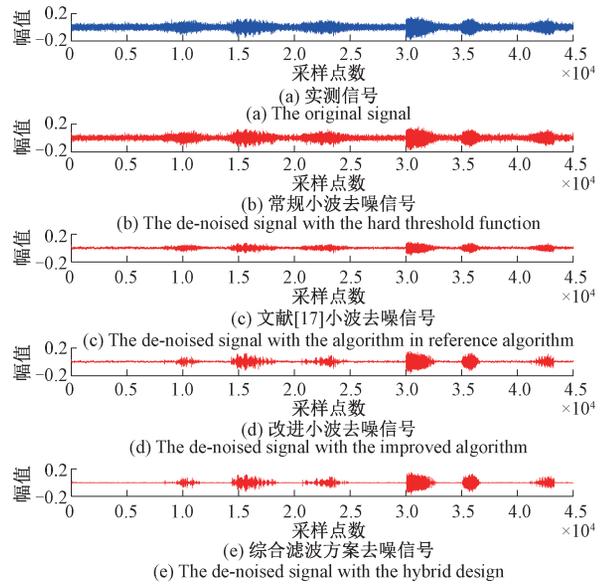


图5 实测信号1经不同去噪方法处理后波形  
 Fig.5 The waveform of the actually measured signal 1 processed with different de-noising algorithms

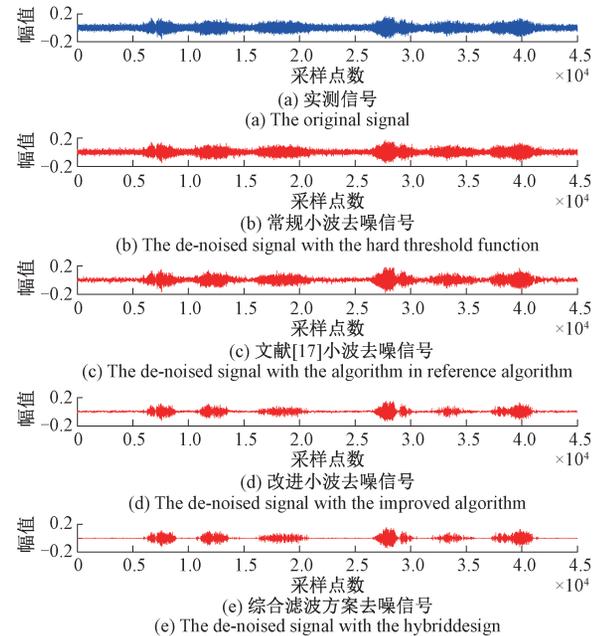


图6 实测信号2经不同去噪方法处理后波形  
 Fig.6 The waveform of the actually measured signal 2 processed with different de-noising algorithms

在去除噪声的同时保留了更多有用信号;而经综合滤波方案处理后输出信号更加平滑,有效改善了小波去噪部分噪声滤除不完全的缺陷。

为了更进一步对比分析上述几种滤波方法的去噪效果,对上述几种滤波方法输出波形频谱图进行分析,如图7、8所示。

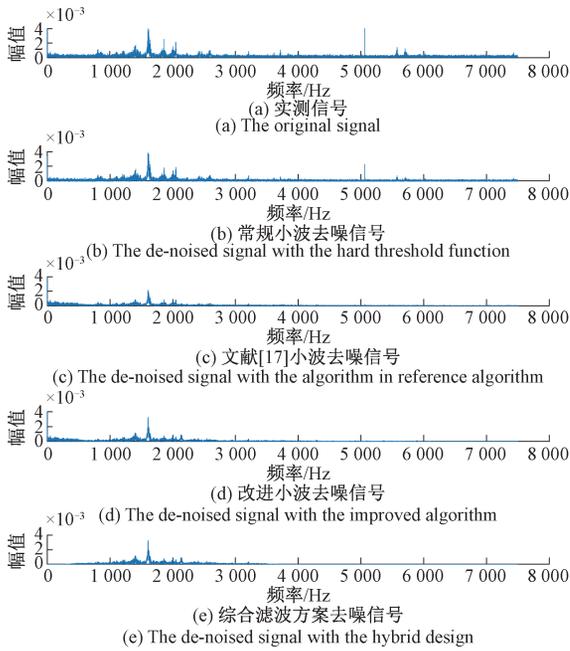


图7 经不同方法去噪处理后实测信号1频谱

Fig.7 The spectrogram of the actually measured signal 1 processed with different de-noising algorithms

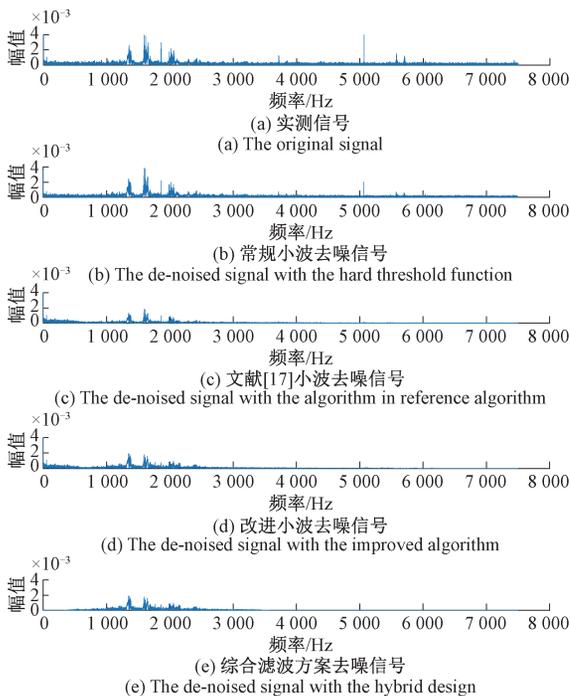


图8 经不同方法去噪处理后实测信号2频谱

Fig.8 The spectrogram of the actually measured signal 2 processed with different de-noising algorithms

对比分析图7和8可知,4种去噪方法对实测语音信号进行去噪处理后均能实现滤除部分噪声,但常规小

波去噪法处理后仍有大部分噪声没有滤除;而文献[17]小波去噪法在滤除噪声的同时也滤去了部分有用信号;另外,从幅值上来看,改进的阈值滤波方法可以在滤除大部分噪声的同时极大地保留有用信号;而综合滤波方案可以在其基础上有效去除频率在0~500 Hz之间及3000 Hz以上的噪声,这是单纯使用小波去噪所不能实现的效果。由去噪处理后实测信号输出波形分析可知,经常规小波去噪法处理后仍存在噪声,这说明未滤除的噪声与有用信号频率相一致,然而再对比改进小波阈值去噪输出波形,发现该方法对同频的噪声亦具有良好的抑制作用。

综上所述,通过对去噪后信号的时域分析和频域分析,可以明显看出在不同噪声强度情况下,本文提出的改进小波阈值去噪方法其去噪效果较另两种滤波方法去噪效果更好。更进一步的若将此算法与带通滤波相结合,既能改善小波去噪效果不完全的缺陷,也能弥补带通滤波造成的信号失真及噪声有用信号无差别过滤的问题。

定量分析常规小波滤波算法、文献[17]改进阈值算法、本文的改进小波阈值算法及综合滤波方案去噪效果,即分析处理后信号的Allan标准差和类间距判据,结果如表2和3所示。

表2 不同滤波算法去噪后Allan标准差对比

Table 2 The comparison of Allan variance for the signal de-noised with different filtering algorithms

算法	$\sigma^2$	
	信号1	信号2
常规小波算法	$1.91 \times 10^{-8}$	$3.88 \times 10^{-8}$
文献阈值算法	$1.06 \times 10^{-8}$	$3.25 \times 10^{-8}$
改进阈值算法	$1.92 \times 10^{-9}$	$3.89 \times 10^{-9}$
综合滤波方案	$3.59 \times 10^{-14}$	$8.24 \times 10^{-14}$

表3 不同滤波方案去噪后类间距判据对比

Table 3 The comparison of class spacing criterion for the signal de-noised with different filtering algorithms

算法	$S_b$	
	信号1	信号2
常规小波算法	0.011 4	0.017 0
文献阈值算法	0.013 6	0.018 6
改进阈值算法	0.015 0	0.027 6
综合滤波方案	4.443 3	6.910 0

对表2和3数据分析表明,基于本文提出的改进小波阈值去噪算法,结合带通滤波器的综合滤波方案在4种方法中去噪效果最好,其Allan方差值减小而类间距判

据值增大,证明本文的改进算法能有效去除噪声,这对于该传感系统后期声源定位的准确性具有重要意义。

## 4 结 论

本文首先从阈值函数、处理方式、选取规则和设置4个方面进行分析,并据此提出一种改进的小波阈值去噪方法。根据对实测语音信号处理表明,该算法在实际运用中可以较好地弥补常规滤波设计的不足,能有效地进行去噪,且对于和有用信号同频的噪声也具有较好的去噪效果,更加符合实际工程需求,充分证明了该滤波设计的优越性。

本文研究工作仅仅是对实际 FAS 系统信号处理的初步探索,还需要进一步的测试和深入研究。例如,若能根据 FAS 输出信号特性构造一个小波基函数对其进行滤波处理,其滤波效果会更加理想。另外,本文提出的改进阈值函数及阈值选取规则只是在某些特定环境下得到的较为理想的方案,尚不具有普适性,因此还需进一步对阈值函数进行分析,寻求一种较为普适的阈值函数,并针对这个阈值函数确定适合的阈值。接下来将针对这两方面开展研究工作,以期进一步改善去噪效果。

## 参考文献

- [ 1 ] WANG Y C, GONG L SH, JIN B Q, et al. Distributed optical fiber sensor using Sagnac for acoustic detection [J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2017, 8(1): 84-88.
- [ 2 ] 白清,王云才,刘昕,等. 基于分布式光纤的温度、振动、声音、应变的监测技术与实现 [J]. *激光杂志*, 2018, 39(3): 47-54.  
BAI Q, WANG Y C, LIU X, et al. Monitoring technology and implementation of temperature, vibration, acoustics and strain utilizing distributed optical fibers [J]. *Laser Journal*, 2018, 39(3): 47-54.
- [ 3 ] TOSI D, BRAGLIA A, NERI A, et al. Realization of an optical fiber Bragg grating microphone [C]. *Instrumentation & Measurement Technology Conference*, 2011.
- [ 4 ] 周正仙,邹翔,袁扬胜,等. 干涉型光纤语音传感器及语音降噪方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(11): 2715-2724.  
ZHOU ZH X, ZOU X, YUAN Y SH, et al. Research on interferometric optical fiber acoustic sensor and noise reduction method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(11): 2715-2724.
- [ 5 ] WU Y Q, GAN J L, LI Q Y, et al. Distributed fiber voice sensor based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 6803810.
- [ 6 ] WANG H, XIE ZH W, ZHANG M L, et al. A miniaturized optical fiber microphone with concentric nanorings grating and microsprints structured diaphragm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78: 110-115.
- [ 7 ] 周书铨,盛灵惠,黄颂翔,等. 光纤声传感器研究 [J]. *声学学报*, 1995, 20(6): 469-472.  
ZHOU SH Q, SHENG L H, HUANG S X, et al. Fiber optic acoustic sensor [J]. *Chinese Journal of Acoustic*, 1995, 20(6): 469-472.
- [ 8 ] 吴东方. Sagnac 干涉式光纤声传感器及其定位技术研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2008.  
WU D F. Research on Sagnac interferometric fiber-optic acoustic sensors and its positioning technology [D]. Shanghai: Fudan University, 2008.
- [ 9 ] 刘冲冲. Sagnac/ $\Phi$ -OTDR 混合型光纤语音传感器及其语音降噪方法研究 [D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2017.  
LIU CH CH. Study of Sagnac/ $\Phi$ -OTDR hybrid speechsensor and corresponding speech denoising method [D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2017.
- [ 10 ] WANG H, SUN Q ZH, LI X L, et al. Improved location algorithm for multiple intrusions in distributed Sagnac fiber sensing system [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7587-7597.
- [ 11 ] 陈家益, 战荫伟, 曹会英, 等. 连续可微阈值函数与尺度阈值的小波去噪 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(10): 169-176.  
CHEN J Y, ZHAN Y W, CAO H Y, et al. Wavelet denoising based on continuous differentiable threshold function and scale threshold [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(10): 169-176.
- [ 12 ] 王宇, 吴瑞东, 王东, 等. 分布式光纤振动传感系统的多级零频点定位研究 [J]. *传感技术学报*, 2017, 30(5): 655-659.  
WANG Y, WU R D, WANG D, et al. Study on multiple null frequency location of distributed optical fiber vibration sensing system [J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2017, 30(5): 655-659.
- [ 13 ] CUI H M, ZHAO R M, HOU Y L. Improved threshold denoising method based on wavelet transform [J]. *Physics Procedia*, 2012, 33: 1354-1359.
- [ 14 ] 吕品, 刘建业, 赖际舟, 等. 光纤陀螺实时小波去噪中的阈值选取 [J]. *弹箭与制导学报*, 2009, 29(1): 18-22.  
LYU P, LIU J Y, LAI J ZH, et al. Research on threshold algorithm in real-time wavelet de-noising of

- FOG [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(1):18-22.
- [15] 韩凯. 基于小波滤波的陀螺仪信号噪声处理 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2015.  
HAN K. The denoising of gyroscope signal by wavelet filter [D]. Xi'an: Xidian University, 2015.
- [16] 王涛,沈永辉,姚建铨. 基于小波阈值法的激光雷达回波信号去噪研究[J]. 激光技术, 2019, 43(1):67-72.  
WANG T, SHEN Y H, YAO J Q. Research on laser radar echo signal denoising based on wavelet threshold method [J]. Laser Technology, 2019, 43(1):67-72.
- [17] 王异凡,朱冠霖,王兆强,等. 基于改进小波阈值的 GIS 局部放电在线监测白噪声干扰抑制研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3):37-43.  
WANG Y F, ZHU G L, WANG Z Q, et al. Research on white noise interference suppression of GIS partial discharge on-line monitoring based on improved wavelet threshold [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3):37-43.
- [18] 傅建平. 小波去噪方法在光纤电流互感器中的应用研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2019.  
FU J P. Application research of wavelet denoising method in fiber current transformer [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.
- [19] YADAV A K, ROY R, KUMAR A P, et al. De-noising of ultrasound image using discrete wavelet transform by symlet wavelet and filters [C]. International Conference on Advances in Computing. 2015:1204-1208.
- [20] 王旭,王昶. 一种改进小波阈值去噪方法的研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(10):52-55.  
WANG X, WANG CH. Improved wavelet threshold denoising method research [J]. Journal of Geodesy and Geodynamic, 2017, 37(10):52-55.
- [21] 许佳,牛海清,郑文坚,等. 改进阈值函数的小波熵方法抑制局部放电白噪声的研究 [J]. 电测与仪表, 2017, 54(8):28-32.  
XU J, NIU H Q, ZHANG W J, et al. Suppressing white noise research in PD signal based on wavelet entropy and improved threshold function [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(8):28-32.
- [22] 王立辉,伍雪峰,孙健,等. 光纤电流互感器噪声特征及建模方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1):62-66.  
WANG L H, WU X F, SUN J, et al. Research on character and modeling method of noise in fiber optic current transducer [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1):62-66.
- [23] 朱战辉,张友妮,汪立新,等. 基于 Allan 方差改进阈值的惯性传感器动态信号小波去噪 [J]. 传感技术学报, 2016, 29(11):1718-1723.  
ZHU ZH H, ZHANG Y N, WANG L X, et al. Wavelet de-noising of inertial sensor dynamic signal based on improvement threshold with Allan variance [J]. Journal of Sensor and Actuators, 2016, 29(11):1718-1723.
- [24] 李岩松,欧阳进,刘君,等. 基于 Allan 方差的磁光玻璃型光学电流互感器噪声分析 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12):126-129.  
LI Y S, OUYANG J, LIU J, et al. Analysis on noise of magneto-optical glass type optical current transformer based on allan variance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12):126-129.
- [25] 李红延,周云龙,田峰,等. 一种新的小波自适应阈值函数振动信号去噪算法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10):2200-2206.  
LI H Y, ZHOU Y L, TIAN F, et al. Wavelet-based vibration signal de-noising algorithm with a new adaptive threshold function [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10):2700-2706.

## 作者简介



何乐, 2019 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为华中科技大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感及探测。

E-mail: 932919276@qq.com

He Le received her B. S. degree from Nanchang Hangkong University in 2019. Now, she is a M. S. candidate in Huazhong University of Science and Technology. Her main research focuses on optical fiber sensing and detection.



吴华明(通信作者), 2010 年于华中科技大学获得博士学位, 现为南昌航空大学副教授, 主要研究方向为微纳光电器件及光纤传感。

E-mail: Cookey106@126.com

Wu Huaming (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2010. Now, he is an associate professor in Nanchang Hangkong University. His main research includes micro/nano optoelectronic devices and optical fiber sensing.