

干涉型光纤语音传感器及语音降噪方法研究*

周正仙^{1,2}, 邹翔^{1,2}, 袁扬胜^{1,2}, 甘露^{1,2}, 祝玉军³

(1. 安徽师范大学物理与电子信息学院 芜湖 241002; 2. 光电材料科学与技术安徽省重点实验室 芜湖 241002;
3. 安徽师范大学数学计算机科学学院 芜湖 241002)

摘要:近年来,光纤语音传感器已经引起科研界的广泛关注,如何提高语音探测质量是所有类型光纤语音传感器都面临一个关键问题。提出了一种新型小波包语音提取方法,用来提高光纤语音传感器语音探测质量。基于光纤干涉仪原理,搭建了光纤语音传感实验系统。实验结果表明,无论是与硬阈值处理方法还是与软阈值处理方法相比,新阈值处理方法都提高了信噪比。并且保证了语音信号的连续性,改善了语音质量。本方法可广泛应用于语音探测领域,特别是实时语音探测。

关键词: 光纤传感器;语音;干涉;小波包降噪;阈值函数

中图分类号: TH744.3 TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3035

Research on interferometric optical fiber acoustic sensor and noise reduction method

Zhou Zhengxian^{1,2}, Zou Xiang^{1,2}, Yuan Yangsheng^{1,2}, Gan Lu^{1,2}, Zhu Yujun³

(1. The College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China; 2. Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Materials Science and Technology, Wuhu 241002, China; 3. School of Mathematics & Computer Science, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)

Abstract: Optical fiber acoustic sensor has attracted a significant amount of research attentions in recent years. A key issue for all optical fiber acoustic sensors is to improve the quality of detected signal. In this work, a novel wavelet packet speech signal retrieving method is proposed for improving detection performance of optical fiber acoustic sensors. The experiment system of optical fiber acoustic sensing is set up based on the principle of optical fiber interferometer. The experimental results show that the new threshold processing method improves the signal-to-noise ratio compared with hard threshold and soft threshold processing method. Furthermore, the continuity of speech signal is guaranteed and the speech quality is improved. The proposed method can be widely used for a variety of speech detecting applications, especially for real-time speech detecting.

Keywords: optical fiber sensor; acoustic; interference; wavelet de-noising; threshold function

0 引言

光纤语音传感器是一种新型的基于光纤振动传感传感原理的声信号传感器。发展至今,已有多种不同类型的光纤语音传感器,如干涉型的光纤语音传感器、基于光时域反射仪(optical time domain reflectometer, OTDR)原理的光纤语音传感器及基于光纤布拉格光栅(fiber bragg

grating, FBG)原理的光纤语音传感器。其中干涉型光纤语音传感器又分为基于 Mach-Zehnder 型、Michelson 型和 Sagnac 型等等。在应用方面,周书铨等人^[1]利用光纤的微弯损耗原理,研究了微弯型光纤麦克风的理论模型和实验模型,并进行了测试,但其频率响应特性和动态范围均不理想; Kruger L 等人^[2]提出一种基于 Mach-Zehnder 干涉的光纤语音监听装置,利用振动膜实现了语音监听;北京交通大学的秦威^[3]在现场可编程门阵列(field -

programmable gate array, FPGA) 平台上,给出了一种 Sagnac 光纤干涉型光纤语音传感器的设计,该传感器可以很好地探测语音信号,并且通过 FPGA 的控制,利用语音模块实时播放出语音。Wu Y. Q. 等人^[4]提出一种利用后向散射光的时域分析的语音监听装置,利用一组后向散射光的时域切线,得出语音信息和位置;Tosi D 等人^[5]提出一种基于 FBG 的语音监听装置。声音信号对 FBG 产生影响,FBG 反射的光随声信号改变,解调出光信号即可得出声音。Mach-Zehnder 光纤干涉技术具有传感距离长、灵敏度高、不受电磁干扰等优越特性,但实际应用中难以保证零光程差的要求,且需要加入偏振控制器来实现对偏振态的控制。与 Mach-Zehnder 光纤干涉仪相比,Michelson 光纤干涉仪少了一个 3 dB 耦合器,但是干涉信号也会被反射进激光光源,影响系统的稳定性,所以通常都会在激光光源后添加一个光隔离器。基于 OTDR 原理的光纤振动传感器可以实现同时监测多处振动,并且对振动分别定位。但是这种结构的振动传感器信号非常弱、噪声很大,对激光光源的线宽以及光电检测等光电器件的性能要求很严格。光纤光栅型光纤传感器的体积小、结构简单,但是其信号解调需要波长检测技术,仍然相对比较复杂。与 Mach-Zehnder、Fabry-Perot、Michelson 光纤干涉仪不同,Sagnac 光纤干涉仪的干涉光路部分是互易的对称结构,基于 Sagnac 光纤干涉仪的语音传感器具有不存在相位衰落、对激光光源的线宽要求较低和信号解调相对简单等优点,在光纤语音传感中有着广泛的应用^[6-8]。因此,很多应用场合都采用 Sagnac 干涉仪来探测语音信号。语音在产生、传输及接收过程中,不可避免地要受到噪声的污染,如何滤除语音中的噪声是光纤语音传感需要解决的问题。现在常见的语音降噪算法有滤波器法^[9-10]、谱减法^[11]、子空间算法^[12]和小波变换^[13-20]等。由于滤波器法和谱减法只能进行频域分析,子空间算法只能进行时域分析,而小波变换又称多分辨率分析,具有时频域分析的能力,仅适合非平稳信号(如语音信号)的研究。常见的小波变换是小波阈值降噪,利用小波阈值降噪对原始语音信号进行降噪处理。本文针对干涉型光纤语音传感器的降噪问题,在分析硬阈值、软阈值小波降噪算法的基础上,构造一个新的阈值函数。与传统软硬阈值函数相比,新阈值函数克服了软阈值函数中小波系数估计和原系数之间的具有固定偏差的缺点。同时,该函数克服了硬阈值函数不连续的缺点。

1 干涉型光纤语音传感

干涉型光纤语音传感原理如图 1 所示,整个系统由激光器、3 dB 耦合器、光电探测器、数据采集卡以及传感光纤组成。本文在原有 Sagnac 干涉仪结构上进行了改进,将一

部分光纤绕制在声敏材料上作为传感探头,如果探头的尺寸足够小,就可以使绕制在探头上的所有光纤共同探测同一语音声波,实际上相当于最终放大了接收的语音信号。具体工作原理如下:激光光源发出连续光信号,通过 3 dB 耦合器被分为两路,分别在一根闭合的传感光纤中沿顺时针和逆时针方向传播,最终在耦合器处产生干涉,干涉信号被光电探测器探测后,送往信号处理模块处理。

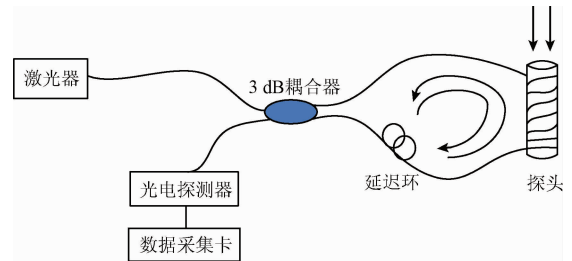


图 1 干涉型光纤语音传感原理

Fig. 1 Schematic diagram of interferometric optical fiber sound sensor

由图 1 可以看出两路激光信号在光纤环中的传播路径是相等的,当探头附近遭受外界作用时,由于弹光效应,干涉激光的相位差发生改变,从而影响干涉光的强度。例如,当两束强度分别为 I_1 和 I_2 的光波在光纤中产生干涉时,干涉光的强度可以表示为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos(\phi_0 + \Delta\phi) \quad (1)$$

式中: ϕ_0 为两束光的初始相位差, $\Delta\phi$ 为相位调制引起的相位差。干涉光被光电探测器探测后转化为电信号,电信号通过采集卡进行数据采集,将采集到的数据通过 MATLAB 进行解调^[21],得到一段由光纤探测的语音信号即原始语音信号,原始语音信号含有背景噪声(环境噪声等)。因此,后续工作就是对原始含噪语音信号进行降噪处理。

2 小波语音降噪方法

2.1 小波阈值降噪原理

小波降噪的数学模型^[22]如下,假设有如下的一维观测信号:

$$y(t) = s(t) + h(t) \quad (2)$$

式中: $y(t)$ 为含噪声语音信号也就是光纤传感中获取的原始语音信号, $s(t)$ 为原始纯净语音信号, $h(t)$ 为高斯白噪声,服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布。对 $y(t)$ 做离散小波变换,有:

$$W_y(j, k) = w_s(j, k) + w_h(j, k) \quad (3)$$

因为噪声的小波系数 $w_h(j, k)$ 小于纯净语音的小波系数 $w_s(j, k)$, Donoho D. J. 等人^[23-25]提出的小波阈值降噪的基本思想是:首先设定某个临界阈值 T , 当 $w(j, k)$

小于这个临界阈值时,认为此时的 $w(j, k)$ 很大程度上是由噪声引起的,将其舍弃,当 $w(j, k)$ 大于这个临界阈值时,认为此时的 $w(j, k)$ 很大程度上是由信号引起的,将 $w(j, k)$ 完全保留下来(硬阈值函数方法)或者按某一固定量向零收缩(软阈值函数方法),得到新的小波系数 $w(j, k)$,然后用新的小波系数进行小波重构,得到降噪后的信号。小波降噪基本流程为:首先选取小波基和分解层数对含噪语音信号进行小波分解,其次通过计算阈值和选取阈值函数对分解后的小波进行阈值去噪,最后对去噪后的小波进行逆变换并重构语音信号。

2.2 阈值函数的设计和优化

2.2.1 硬阈值函数和软阈值函数

传统的阈值函数是由 Donoho D. L. 等人提出的硬阈

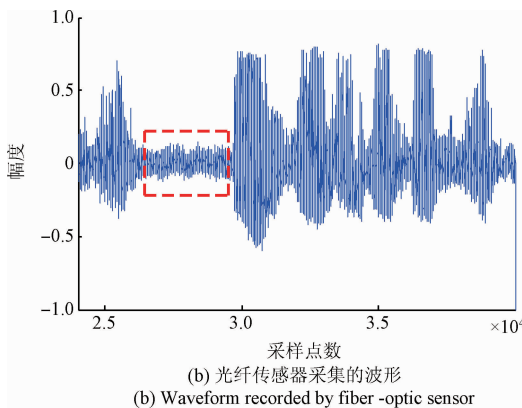
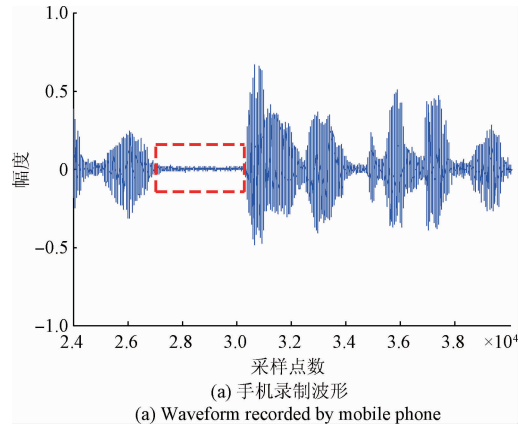
$$\hat{w}(j, k) = \begin{cases} \text{sign}(w(j, k)) (|w(j, k)| - T/\exp(\sqrt{|w(j, k)| - T/c}), & |w(j, k)| \geq T \\ 0, & |w(j, k)| < T \end{cases} \quad (6)$$

式中: c 为正常数,可以灵活调节阈值函数。文献中取 $c=8$ 。由式(6)可知,此阈值函数在正负阈值处连续。

2.2.3 新阈值函数设计和优化

1) 光纤语音信号特征分析

光纤语音信号特征分析图。将手机录制的语音信号(见图 2(a))视为较纯净的语音信号为手机录音波形。将光纤采集的语音信号(见图 2(b))与手机录制的语音信号进行对比分析,得出光纤语音信号有如下特征。



值函数和软阈值函数。

1) 硬阈值处理函数^[23]:

$$\hat{w}(j, k) = \begin{cases} w(j, k), & |w(j, k)| > T \\ 0, & |w(j, k)| \leq T \end{cases} \quad (4)$$

式中: T 为阈值。

2) 软阈值处理函数^[24]:

$$\hat{w}(j, k) = \begin{cases} \text{sgn}(w(j, k)) (|w(j, k)| - T), & |w(j, k)| > T \\ 0, & |w(j, k)| \leq T \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\text{sgn}(\ast)$ 为符号函数,当 \ast 大于 0 时候函数取 1,小于 0 时函数取 -1,等于 0 时函数取 0。 T 为阈值。

2.2.2 文献[26]中设计的阈值函数

文献[26]中设计了阈值函数^[26]如式(6)。

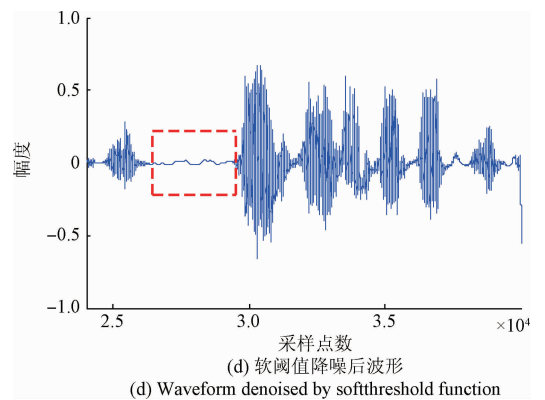
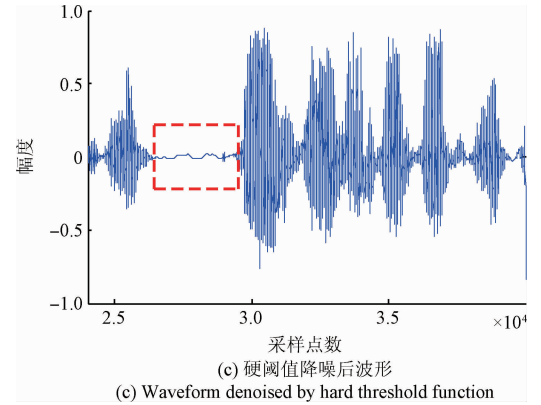


图 2 光纤语音信号特征分析

Fig. 2 Fiber speech signal feature analysis figure

(1) 光纤语音信号在采集过程中由于光学、电路等噪声的引入,使得语音信号的噪声有所增加。噪声在整个语音范围内都存在,且噪声的幅度基本一致。

(2) 部分语音信号幅度较低,很容易在处理是被当做噪声处理掉,如图中虚线框中的部分。

(3) 光纤语音信号在整个语音范围内连续性较好,除了噪声增加外,不会噪声语音信号的失真。

若采用传统的硬阈值和软阈值函数来对光纤语音信号进行处理,势必会造成语音信号的失真,主要缺陷如下:

(1) 经过硬阈值函数处理(见图2(c)),处理后的语音波形其噪声大大降低,但同时语音细节也丢失,见图中虚线框。

(2) 经过软阈值函数处理(见图2(d)),处理后的语音波形其噪声大大降低,但同时语音细节也丢失,见图中虚线框。

(3) 同时,经过软阈值函数处理后,语音信号的幅度也被压缩。

造成这些缺陷的主要原因如下:

(1) 硬阈值函数在正负阈值处不连续,小波系数经过硬阈值函数处理后重构信号时会产生振荡,影响语音质量。

(2) 软阈值函数虽然连续,但它的导数是不连续的。而且小波系数与带噪小波系数之间存在恒定偏差,去噪后的语音过于平滑而丢失语音的突变部分,从而影响语音信号的质量。

因此,要想获得更好的语音降噪效果,就需要设计一种新的阈值函数,在保证语音信号幅度和连续性的前提下,尽量降低信号的噪声,同时保留更多的语音细节。

2) 新阈值函数的设计

根据以上分析,本文在硬阈值函数、阈值函数以及文献[26]的基础上设计了一种新的阈值函数。本文设计的阈值函数的表达式如下:

$$\hat{W}(j, k) = \text{sgn}(w(j, k)) \frac{|w(j, k)| - bT}{e^{-a(|w(j, k)| - T)} + 1} \quad (7)$$

式中: $\text{sgn}(\ast)$ 为符号函数, a, b 为可调因子,且 $0 < b < 1$, $a > 0$, $w(j, k)$ 为输入系数, $\hat{w}(j, k)$ 阈值系数, T 为阈值,仿真图形如图3所示。

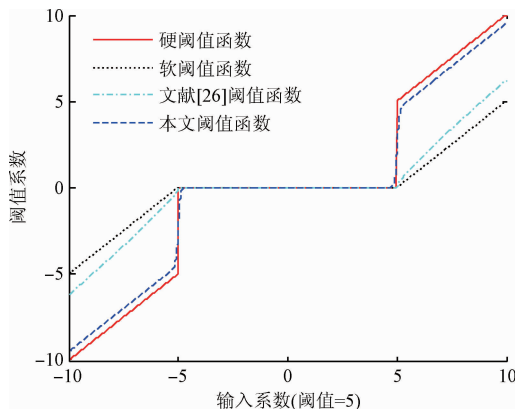


图3 硬阈值、软阈值和新阈值函数的仿真

Fig. 3 Simulation curves of hard threshold function, soft threshold function and new threshold function

由图3及式(7)可知,本文设计的阈值函数在正负阈值处连续,且在 $|w(j, k)| - T > 0$ 时,当 a 趋于正无穷时,此时若 $b = 0$ 则函数变为硬阈值函数。若 $b = 1$ 则函数变为软阈值函数,因此本文阈值函数图形介于软阈值函数和硬阈值函数之间。本文设计的阈值函数不仅具备连续性,在重构信号时不会产生振荡,而且是高阶可导的,便于进行各种数学运算。

3) 阈值参数的优化

取纯净语音信号外加白噪声,当信噪比(signal noise ratio, SNR)为5时,测试不同 a, b 取值时 SNR 的变化规律,以选出最佳 a, b ,使得去噪后的 SNR 最高。结果如表1所示。

表1 SNR为5时不同 a, b 取值时 SNR 比较
Table 1 Comparison of SNR values with different a, b while SNR is 5

a	b			
	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
10	8.180 9	8.240 1	8.124 7	8.117 6
20	9.033 6	9.058 3	8.978 8	9.034 1
30	9.408 5	9.450 0	9.375 6	9.425 8
40	9.630 1	9.689 1	9.668 9	9.625 9
50	9.638 7	9.883 4	9.759 0	9.782 5
60	9.658 2	9.856 8	9.860 3	9.820 1
70	9.800 0	9.887 0	9.856 6	9.882 9
80	9.743 8	9.813 2	9.865 0	9.835 6
90	9.740 7	9.806 4	9.805 0	9.799 2

由表1可知,当固定 a 时,除 a 取60和80之外,大致趋势为 $b = 0.01$ 时 SNR 最高;当固定 b 时, a 从10~70递增取值,除个别取值外,大致趋势为, a 越大, SNR 越高,而当 $a > 70$ 取值时, SNR 递减。综上,本文阈值函数中取 $a = 70, b = 0.01$ 。

确定阈值 T 是小波降噪的关键^[27], T 值可以由式(8)、(9)确定。

$$T = \sigma \sqrt{2 \log N} \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{\text{median}(|w(j, k)|)}{0.6745} \quad (9)$$

式中: N 表示小波分解后各层小波系数的长度, σ^2 表示估计的噪声方差, $\text{median}(x)$ 表示 x 的中值。

由于随着小波分解层数的增加,信号的小波系数增加,而噪声的小波系数减小,所以阈值应当随着分解层数的增加而减小^[27]。用固定阈值 T 则不能反映这种情况,所以本文使用的阈值公式为^[28]:

$$T_j = \sigma \sqrt{2 \log N / \ln(j+1)} \quad (10)$$

式中: T_j 为每层小波系数的阈值门限, j 为分解层数。由

式(10)可知,随着分解层数的增加,阈值减小,与噪声的小波变换在不同尺度上的衰减规律一致,因此该阈值公式可自适应调节阈值。

3 实验结果与分析

3.1 标准数据库数据测试和分析

首先进行标准数据库数据测试,比较不同阈值函数的处理效果。用于实验的语音数据取自 TIMIT 数据库的纯净语音信号,噪声是白噪声。语音和噪声的采样频率均为 16 000 Hz,采样点数为 55 521 个数据点。用于实验的带噪语音由语音和白噪声混合生成,加入信噪比为 0、5、10 dB 的白噪声进行测试。本文采用 7 层听觉感知小波包分解^[28],采用的小波基函数为 db5 小波,新阈值函数参数 $a = 70$ 、 $b = 0.01$ 。文献[26]阈值函数中取 $c = 8$ 。使用 SNR^[29]、对数似然比(log likelihood ratio, LLR)得分^[30]和主观语音质量评估(perceptual evaluation of speech quality, PESQ)得分^[31],分别对使用软、硬阈值函数、文献[26]中阈值函数和本文设计的新阈值函数降噪后的语音信号进行评价。4 种阈值函数降噪后信号的 SNR、LLR 及 PESQ 如表 2~4 所示。

表 2 四种阈值函数 SNR 值比较

Table 2 SNR comparison of four types of threshold functions (dB)

输入	硬阈值	软阈值	文献[26]	本文算法
0	5.551 8	4.726 0	5.953 5	6.576 2
5	8.608 5	6.670 0	8.660 6	9.450 1
10	11.663 4	8.723 7	11.784 4	11.940 4

从表 2 可以看出,当输入信噪比相同时,本文算法的信噪比均比其他 3 种方法高。当输入信噪比相同时,LLR 得分越低,增强后的语音失真程度越小。

表 3 四种阈值函数 LLR 值比较

Table 3 LLR comparison of four types of threshold functions

输入/dB	硬阈值	软阈值	文献[26]	本文算法
0	3.072 717	2.452 712	3.062 269	2.030 064
5	2.549 376	2.264 381	2.618 926	1.720 501
10	2.266 292	1.892 600	2.180 984	1.394 326

根据表 3 可知,本文算法在所有输入信噪比均有最低的 LLR 得分。因此,采用本文算法增强后的语音失真程度最小。

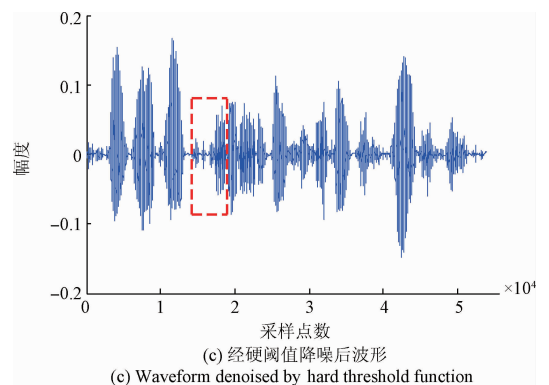
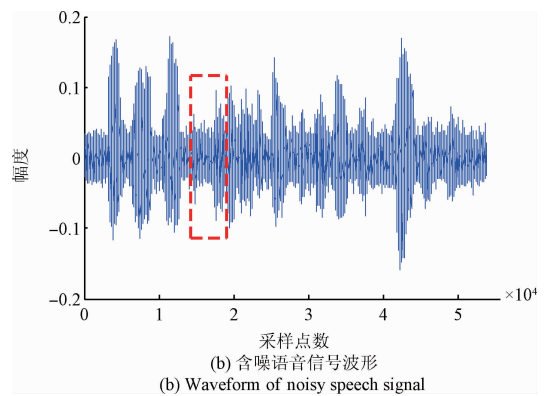
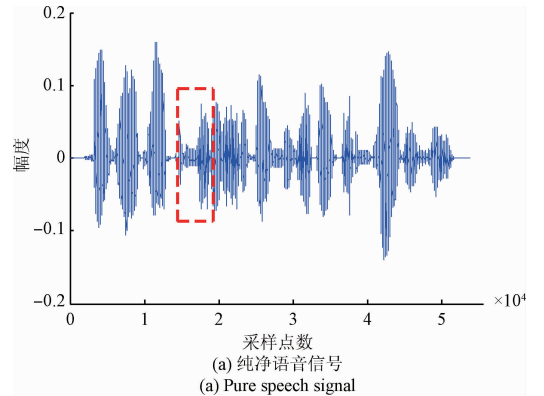
表 4 四种阈值函数 PESQ 值比较

Table 4 PESQ comparison of four types of threshold functions

输入/dB	硬阈值	软阈值	文献[26]	本文算法
0	1.311 339	1.439 908	1.319 342	1.654 156
5	1.618 004	1.717 300	1.699 907	1.929 144
10	1.998 346	1.850 096	1.996 790	2.180 719

表 4 中的 PESQ 得分评比中,本文算法在所有输入信噪比均有最高的 PESQ 得分。而当输入信噪比相同时,PESQ 得分越高,语音质量就越好,这进一步证明了采用本文算法有更好的语音增强效果。

加入 SNR 为 5 dB 的白噪声,对本文设计的阈值函数和传统阈值函数及文献[26]中阈值函数降噪后语音信号波形进行比较,图 4 所示为基于标准数据库的语音测试。



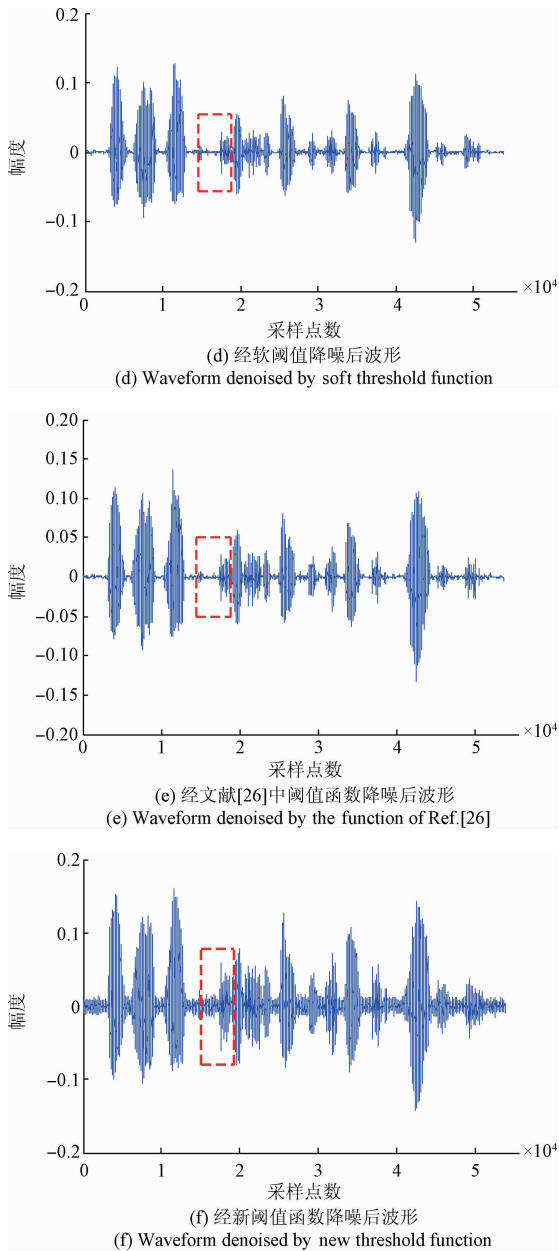


图4 基于标准数据库语音测试

Fig. 4 Test based on standard voice database

以纯净信号和含噪语音信号图4(a)、(b)为参考,由图4(c)、(d)可知,硬阈值函数、软阈值函数在语音信号较低时,经过降噪处理后几乎滤除了有效语音信号。且经过软阈值经处理后有效信号的幅度被压缩,从而重构语音信号时会影响语音质量。由图4(e)可知,含噪语音信号经过文献[26]中阈值函数处理后虽然保留了一些语音细节,但和原始纯净信号图4(a)相比仍丢失不少语音细节。由图4(f)可知,经本文设计的新阈值函数处理后有效信号细节被更多的保留下来。综上,本文设计的新阈值函数对于含噪语音信号的噪声滤除效果更优越。

3.2 光纤语音数据测试

图5所示为干涉型光纤语音传感器的实验平台。光源采用中心波长为1 550 nm的窄线宽激光器,输出功率为0.001 W。光电探测器由PIN型光电管和放大电路组成。所用传感光纤为5 000 m的G652普通单模光纤。传感探头如图6所示,传感光纤紧密缠绕在易拉罐上,易拉罐的振动可带动光纤的振动,增加了语音信号探测灵敏度。实验选在室内,现场有环境杂音干扰(机器及风扇声音),人员站在距离传感探头1 m的位置说话,作为传感器探测的语音信号。原始语音信号的采样频率为8 000 Hz,采样点数为40 000点,共采集5 s的语音信号。

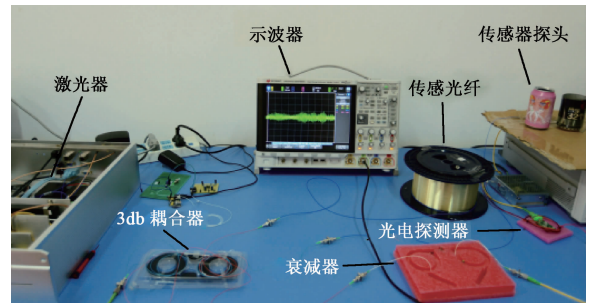


图5 干涉型光纤声传感器的实验装置

Fig. 5 Experimental setup of interferometric fiber-optic acoustic sensor



图6 光纤语音传感单元

Fig. 6 Optical fiber sound sensing unit

为了测试传感器的实际工作效果,在传感探头处放置了手机,测试采用对比法进行。测试人员在距离传感探头1 m处说话,同时利用手机录音软件对语音信号录音。手机录音软件“录音机”录制的语音格式为WAV格式,采样速率为8 000 Hz,通道为单声道,深度为32 bit。这样设置参数可使其与光纤采集系统参数一致。将手机录制的语音信号拷贝至电脑中,用MATLAB对信号进行处理,得到信号时域图和频谱图。最终将手机录音软件录制的语音信号和光纤语音传感器探测的语音信号做对比(因为说话的同时按下手机录制按钮会存在一定的时

间间隔,手机录制的语音波形与光纤测试波形并不是完全对齐,得到如图 7(a)、(b)所示两种信号的时域图,图 8(a)、(b)所示两种信号的频谱图。将光纤语音传感器探测的语音信号分别使用传统阈值函数、文献[26]中的阈值函数和本文设计的新阈值函数进行小波降噪,得到图 7(c)~(f)所示经不同阈值函数去噪后信号波形,图 8(c)~(f)经不同阈值函数去噪后信号频谱图。

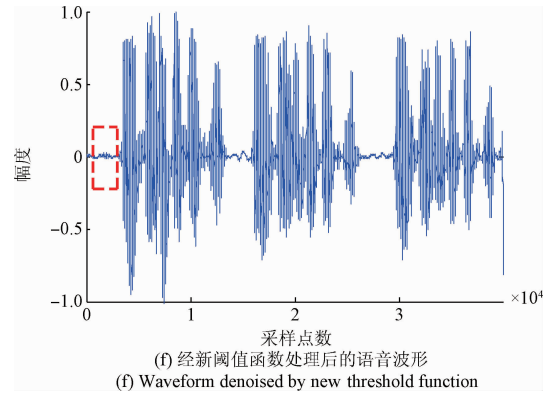
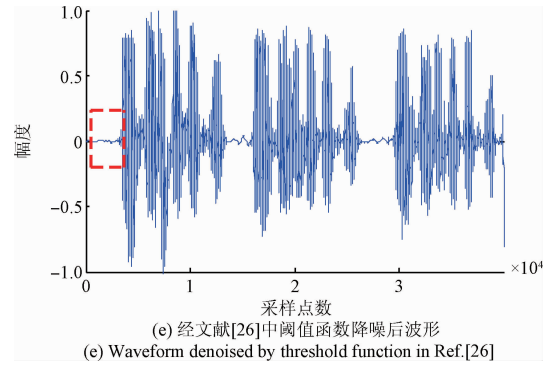
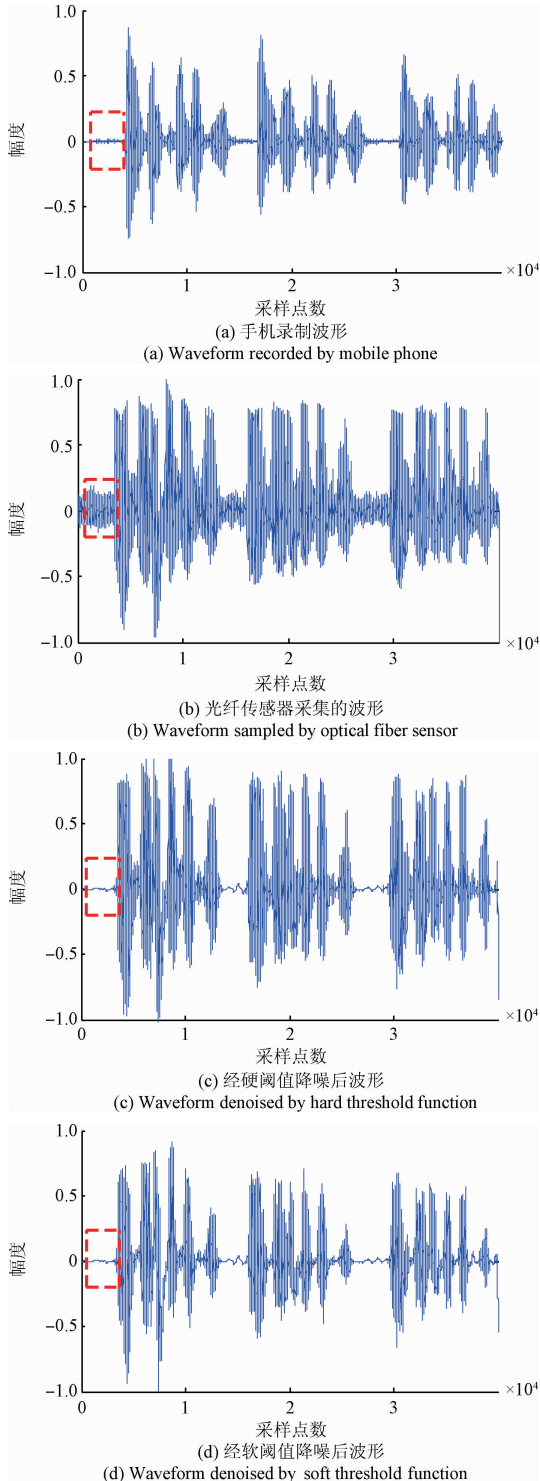


图 7 语音信号时域波形

Fig. 7 Waveform of voice signal

从图 7(a)、(b)来看,光纤语音传感器能够探测语音并且还原,还原的语音信号与手机录制的语音信号的波形趋于一致。虽然二者幅度有所差异,但是语音的幅度在听觉上只是响度有所不同,语音内容的辨识度不受影响。从图 8(a)、(b)来看,手机录制的语音信号在频谱上不是各个频段都相同的,其语音能量主要集中在低频段,而且有的频率段能量接近 0。光纤语音传感器探测的语音信号的能量也主要集中在低频段,但是其在整个频段能量的变化较连续,没有语音能量为 0 的频率段,这也从侧面反映了光纤语音传感器不存在频率响应盲点。根据上述分析可知,光纤语音传感器能够探测语音信号。从图 7(a)、(b)可以看出,在没有语音的时间段,光纤语音传感器探测的语音波形的幅度也不为 0,这在听觉上的体现为烦人的噪声,它会引起人的听觉疲劳。从图 7(c)~(f)可以看出,经过不同阈值函数降噪,语音大部分被很好的保留,噪声部分被滤除。以图 7(a)虚线框中的信号作为参考,通过观察图 7(c)~(f)虚线框中的信号可知,本文设计的新阈值函数可以保留更多语音细节。以图 8(a)虚线框中的信号作为参考,观察图 8(c)~(f)虚线框中的信号仍可以发现本文设计的阈值函数去噪后图形保留更多语音细节,这与从波形图得出的结论是一致的。

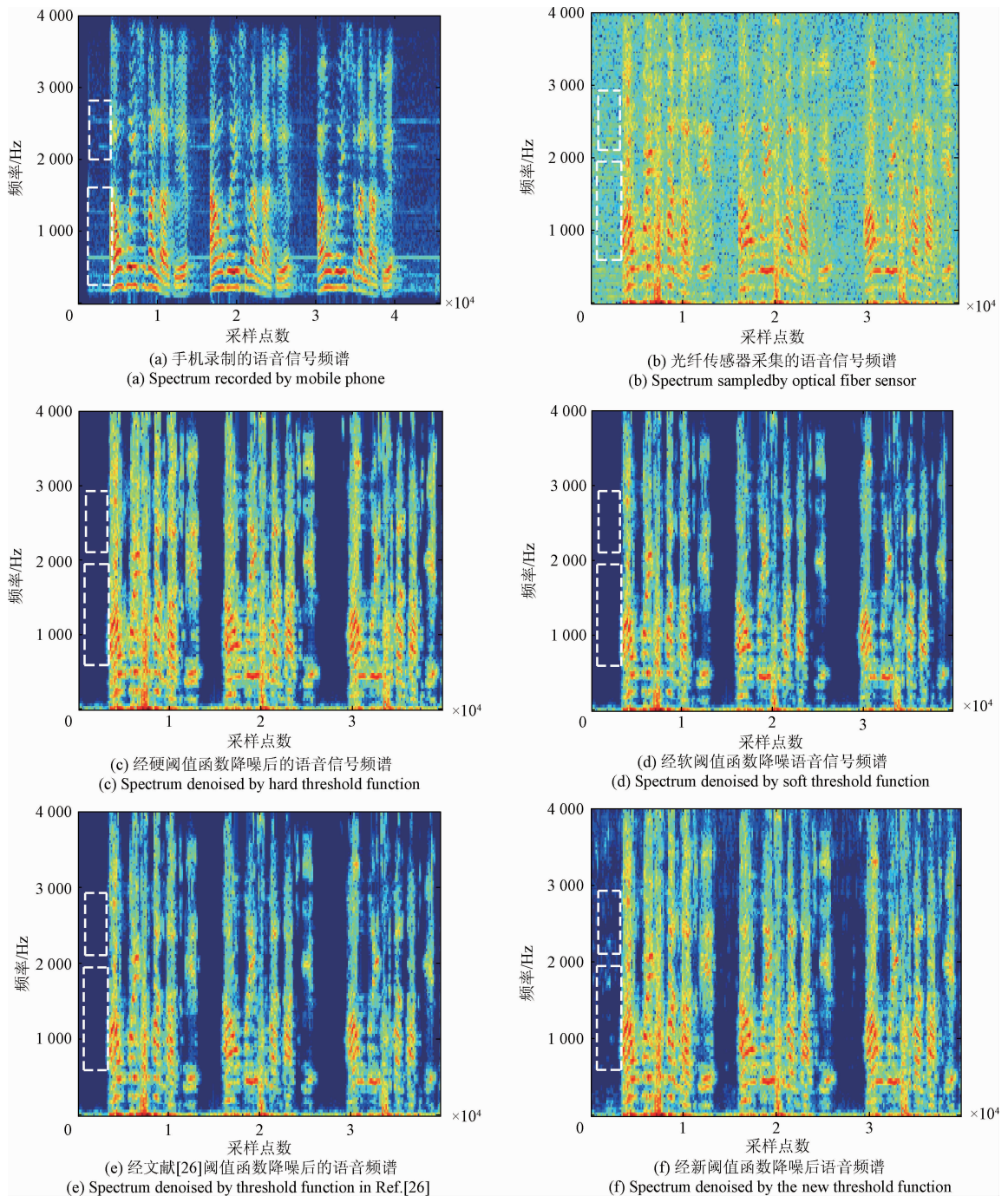


图8 语音信号频谱

Fig.8 Spectrum of voice signal

4 结论

传统的软、硬阈值降噪法由于阈值选取和阈值函数本身存在的缺陷,如硬阈值函数不连续、软阈值函数导数不连续,以及阈值应随着分解层数的增加而变小,而原始阈值是一个定值,使得降噪效果存在不足之处。本文提

出了一种新的阈值函数,能够克服传统软、硬阈值函数的不足,提升了光纤语音信号的降噪效果。本文基于 Sganc 光纤干涉仪来实现语音信号的获取,其他干涉仪如 Mach-Zehnder 干涉仪、Michelson 干涉仪等,也可用来获取语音信号。因此,设计的新阈值函数小波降噪在其他干涉仪中仍可适用。由于绕制在探头上光纤的松紧程度可能会对实验造成一定的影响,本文没有对此进行研究。

另外,信号处理方面,小波基函数和小波分解层数的选择对语音降噪有影响,本文中也没有对小波基和分解层数进行研究。接下来将在这两方面开展进一步研究工作。

参考文献

- [1] 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 Acoustics, 1995,20(6):469-472.
- [2] KRUGER L, THERON H J. Optical fibre mach-zehnder microphone [C]. International Microwave and Optoelectronics Conference, 2007: 389-391.
- [3] 秦威. 基于 FPGA 的无源光纤拾音器的设计[D]. 北京:北京交通大学,2014.
QIN W. The design of passive optical fiber acoustic pickup system based on FPGA [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2014.
- [4] WU Y Q, GAN J L, LI Q, et al. Distributed fiber voice sensor based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1-10.
- [5] TOSI D, BRAGLIA A, NERI A, et al. Realization of an optical fiber Bragg grating microphone [C]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2011: 1-5.
- [6] 陈宇飞,谭冬生,刘小燕. 一种基于 Sagnac 干涉式的光纤振动传感技术[J]. 光学仪器, 2015, 37(1): 24-27.
CHEN Y F, TAN D SH, LIU X Y. Based on the interferometric fiber optic vibration sensor[J]. Optical Instruments,2015,37(1):24-27.
- [7] 何存富,阮力,冯欢,等. 基于 3×3 耦合器的环型 Sagnac 干涉仪管道监测系统实验研究[J]. 光电子·激光,2015,26(6):1125-1131.
HE C F, RUAN L, FENG H, et al. Experimental study on pipeline security monitoring syetem based on ring-structure Sagnac interometer with 3×3 coupler [J]. Journal of Optoelectronic · Laser, 2015, 26 (6): 1125-1131.
- [8] ZHANG C X, LI Q, LI L J, et al. Fiber-optic distributed disturbance sensor based on merged Sagnac interferometers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014,43(10):3378-3382.
- [9] 马月红,马彦恒,王雪飞. 基于 MATLAB 的 FIR 数字滤波器设计与仿真[J]. 电子测量技术, 2010, 33(11):66-69.
MA Y H, MA Y H, WANG X F. MATLAB-based FIR figure wave filter design and emulation [J]. Electronic Measurement Technology, 2010,33(11):66-69.
- [10] 田园,周勐. 窗函数在数字滤波器设计中的应用[J]. 国外电子测量技术,2013,32(4):25-27.
TIAN Y, ZHOU X. Application of windows function in the design of digital filter [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013,32(4):25-27.
- [11] 陈欢,邱晓晖. 改进谱减法语音增强算法的研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24 (4): 69-71,76.
CHEN H, QIU X H. Research on speech enhancement of improved spectral subtraction algorithm [J]. Computer Technology and Development,2014,24 (4):69-71,76.
- [12] 郭欣,贾海蓉,王栋. 利用子空间改进的 K-SVD 语音增强算法[J]. 西安电子科技大学学报,2016, 43(6): 109-115.
GUO X, JIA H R, WANG D. Speech enhancement using the improved K-SVD algorithm by subspace [J]. Journal of Xidian University, 2016,43(6):109-115.
- [13] 李志农,朱明,褚福磊,等. 基于经验小波变换的机械故障诊断方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11):2423-2432.
LI ZH N, ZHU M, CHU F L, et al. Mechanical fault diagnosis method based on empirical wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014,35(11):2423-2432.
- [14] 唐贵基,邓飞跃. 基于改进谐波小波包分解的滚动轴承复合故障特征分离方法[J]. 仪器仪表学报,2015, 36(1):143-151.
TANG G J, DENG F Y. Compound fault features separation method of rolling element bearing based on improved harmonic wavelet packet decomposition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1): 143-151.
- [15] 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): 2200 -2206.
- [16] 刘金华,余堃. 一种采用小波滤波的独立分量分析算法[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(1):39-44.
LIU J H, SHE K. Independent component analysis algorithm using wavelet filtering [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentat, 2010, 24(1):39-44.
- [17] 蒋薇薇,鲁昌华,张玉钧,等. 基于提升小波改进阈值的频谱信号去噪研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,28(12):1363-1368.

- JIANG W W, LU CH H, ZHANG Y J, et al. Research on spectrum signal denoising based on improved threshold with lifting wavelet [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014, 28 (12): 1363-1368.
- [18] 马晓婷, 尚宇. ECG 去噪算法的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(7):18-22.
- MA X T, SHANG Y. Design and implementation of ECG denoising algorithm[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(7):18-22.
- [19] 陈映竹, 王玉文, 杨巍, 等. 一种新阈值函数的小波去噪算法研究[J]. 通信技术, 2017, 50(7): 1407-1411.
- CHEN Y ZH, WANG Y W, YANG W, et al. Wavelet denoising algorithm based on a new threshold function[J]. Communications Technology, 2017, 50(7): 1407-1411.
- [20] 张金武, 冯毅, 李文. 基于一种改进阈值函数的小波去噪方法研究[J]. 电子设计工程, 2017, 25(9): 137-140, 144.
- ZHANG J W, FENG Y, LI W. Research on wavelet denoising method based on an improved threshold function[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(9):137-140,144.
- [21] 赵浩, 林宗强, 肖恺, 等. 分布式光纤振动传感技术研究[J]. 电子设计工程, 2014, 22(19):18-20, 24.
- ZHAO H, LIN Z Q, XIAO K, et al. Research of fiber vibration sensor system of digital network[J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(19):18-20, 24.
- [22] 潘泉, 孟晋丽, 张磊, 等. 小波滤波方法及应用[J]. 电子与信息学报, 2007(1):236-242.
- PAN Q, MENG J L, ZHANG L, et al. Wavelet filtering method and its application [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007 (1):236-242.
- [23] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage [J]. Journal of the American Statistical Association, 1995, 90 (12): 1200-1224 .
- [24] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1995, 41(3):613-627.
- [25] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425-455.
- [26] 柯水霞, 李迟生. 基于 LMS 自适应噪声抵消和小波阈值的语音降噪算法研究[J]. 现代电子技术, 2016, 39(3):27-29, 34.
- KE SH X, LI CH SH. Based on LMS adaptive noise cancellation and Noise Reduction algorithm research on wavelet threshold [J]. Modern Electronic Technique. 2016. 39(3):27-29, 34.
- [27] 李克粉, 王直. 改进的小波阈值降噪在语音识别中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(5):231-234.
- LI K F, WANG ZH. Application of improved wavelet threshold denoising in speech recognition[J]. Computer Technology Development, 2013, 23(5):231-234.
- [28] 陈晓娟, 王文婷, 贾明超, 等. 基于小波熵自适应阈值的语音信号降噪新方法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(3):753-755.
- CHEN X J, WANG W T, JIA M CH, et al. New denoising method for speech signal based on wavelet entropy and adaptive threshold [J]. Application Research of Computers, 2014, 31(3):753-755.
- [29] WANG K C. Wavelet-based speech enhancement using time-frequency adaptation [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2009, 2009(1): 1-8.
- [30] GEETHA C, MANJULA P. Effect of compression, digital noise reduction and directionality on envelope difference index, log-likelihood ratio and perceived quality[J]. Audiology Research, 2014, 4(1): 46-51.
- [31] ITU-T Rec. P. 862. Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ) an objective method for end-to-end speech quality assessment of narrowband telephone networks and speech codes[S]. 2001.

作者简介



周正仙(通讯作者), 2009 于上海交通大学获得硕士学位, 2015 于上海理工大学获得博士学位, 现为安徽师范大学副教授, 主要研究方向为光纤传感和光电检测。

E-mail: earthzxx@mail.ahnu.edu.cn

Zhou Zhengxian (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Shanghai Jiaotong University in 2009, received his Ph. D. degree from Shanghai University of Science and Technology in 2015. Now he is an associate professor in Anhui Normal University. His main research interests include optical fiber sensing and photoelectric detection.



邹翔, 2015 年于安徽建筑大学获得学士学位, 现为安徽师范大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感。

E-mail: 752584727@qq.com

Zou Xiang received his B. Sc. degree from Anhui Jianzhu University in 2015. Now he is a M. Sc. candidate in Anhui Normal University. His main research interest is optical fiber sensing.