

基于新阈值函数的小波阈值去噪算法

詹展,秦会斌

(杭州电子科技大学 新型电子器件与应用研究所,浙江 杭州 310018)

摘要:在小波阈值语音去噪中,阈值函数设定直接决定着语音增强去噪效果。以 Donoho 等最先提出的软、硬阈值函数为基础,分析了该算法存在不连续、产生固定偏差的缺点,以及文中基于该算法做出改进的现有阈值函数仍存在不足。为了进一步提高去噪性能,文中提出了一种改进的带参数的阈值函数。该阈值函数不仅克服了传统函数的缺点,而且具有更好的灵活性。并提出了一种算法来选取最优分解层数,最大程度消除噪声,保留有用信号的信息。将带噪语音信号的小波系数经过该阈值函数的处理、重构后,得到增强的语音信号。仿真与真实环境的实验结果表明,该阈值函数与传统阈值函数以及现有的阈值函数去噪相比,输出信噪比和均方误差等性能指标均得到了提升;通过观察时域波形,可以看出该阈值函数处理后的效果更接近原信号,提高了增强语音后的可懂度与整体质量。

关键词:语音增强;阈值函数;去噪;小波

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2019)11-0047-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.11.010

A Wavelet Threshold Denoising Algorithm Based on New Threshold Function

ZHAN Zhan, QIN Hui-bin

(Institute of New Electronic Device & Application, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In the wavelet threshold speech denoising, the threshold function setting directly determines the denoising effect of speech enhancement. Based on the soft and hard threshold functions proposed by Donoho et al, the shortcomings of discontinuity and fixed deviation of the algorithm are analyzed, and the existing threshold functions based on the algorithm are still insufficient. In order to further improve the denoising performance, an improved threshold function with parameters is proposed, which not only overcomes the shortcomings of traditional functions, but also has better flexibility. And an algorithm is proposed to select the optimal number of decomposition layers to eliminate noise and preserve the information of useful signals. After the wavelet coefficients of the noisy speech signal are processed and reconstructed by the threshold function, an enhanced speech signal is obtained. The results of simulation and real-world experiments show that compared with the traditional threshold function denoising and the existing threshold function denoising, the new threshold function has improved output signal-to-noise ratio and mean-square error. By observing the time domain waveform, it can be seen that the effect of the new threshold function is closer to the original signal, which improves the intelligibility and overall quality of the enhanced speech.

Key words: speech enhancement; threshold function; denoising; wavelet

0 引言

小波变换针对短时傅里叶变换时频局部化精细和灵活性方面的缺点,采用具有时域局域化特性的小波函数作为基底,能自动调节时频窗来满足实际分析中的要求,具有多分辨率分析的特点,在信号处理中有广泛的应用。Donoho 和 Johnstone 在小波变换的基础上提

出了小波阈值降噪^[1],常见的主要有硬阈值函数和软阈值函数^[2],由于继承了小波分析的优点,实现简单,得到了实际应用。但是硬阈值函数在阈值处是间断的,处理后获得的小波系数用逆小波变换进行重构^[3]时会产生伪吉布斯(Pseudo-Gibbs)效应,从而使信号出现失真、震荡现象。软阈值函数的估计小波系数与

收稿日期:2018-12-29

修回日期:2019-04-30

网络出版时间:2019-06-27

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流资助项目(61411136003)

作者简介:詹展(1991-),男,硕士研究生,研究方向为语音信号处理、语音识别;秦会斌,博士,教授,研究方向为电子信息材料与电子信息器件的分析、设计与研制,智能化、集成化传感技术。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190627.1111.066.html>

真实小波系数存有固定偏差。针对这些缺陷,有研究人员提出了与之相关的改进方法,如软硬折中的阈值函数、加权平均法构造的阈值函数、基于粒子群寻优算法^[4-10]等,有一定的改善。

为了克服以上缺点,文中在文献[6]的基础上进行改进,提出一种新的小波阈值函数,有调节阈值因子,能够改善阈值函数的连续性,提高信噪比,减小均方误差,并将其应用到语音增强中,达到了良好的去噪效果。

1 小波阈值消噪

1.1 小波阈值消噪原理

小波阈值去噪法的原理分为 3 个步骤^[7]:对原信号小波分解,确定阈值函数和阈值,小波系数重构。流程如图 1 所示。

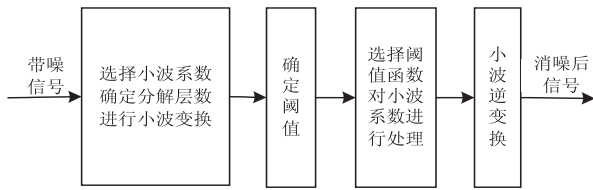


图 1 小波阈值去噪流程

1.2 传统阈值函数

传统的阈值函数由 Donoho 等提出,由于符号函数的特殊数学特性,两种函数表达式组成分别如下:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \omega_{j,k} & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) (|\omega_{j,k}| - \lambda) & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

式 1 为硬阈值函数表达式,其中 $\omega_{j,k}$ 表示小波系数。当 $\omega_{j,k}$ 的数值大于阈值 λ 时,对 $\omega_{j,k}$ 不做处理,在一定程度上保存了初始信号的噪声分量,产生较大的方差,而且由表达式可以看出函数在 $\pm\lambda$ 处有间断点,使得硬阈值函数在整个函数空间范围内不连续,去噪后的小波系数重构时,会产生伪吉布斯现象。

式 2 为软阈值函数,虽然在 $\pm\lambda$ 处连续,对小波系数重构有良好的平滑效果,但其高阶不可导, $\omega_{j,k}$ 与处理后的 $\hat{\omega}_{j,k}$ 之间会产生较大的偏差。

由于硬、软阈值函数都存在缺陷,为了提高小波阈值函数的去噪效果,学者们基于以上两种方法,提出了一些改进的阈值函数。

文献[6]提出的小波阈值函数为:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} u\omega_{j,k} + (1-u)\text{sgn}(\omega_{j,k}) \times (|\omega_{j,k}| - \frac{2\lambda}{1+e^{(\frac{|\omega_{j,k}|-\lambda}{\alpha})^n}}) & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

其中, $u = 1 - e^{-\alpha(|\omega_{j,k}|-\lambda)^2}$, α, n 为调节因子,且为整数。

式 3 介于硬阈值和软阈值函数之间,通过改变调节因子在一度程度上能够降低小波系数与估计小波系数的恒定误差,但是还有待进一步改进。

文中提出了一个基于对数函数^[8]的改进阈值函数来进一步提升消噪效果。

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} u\omega_{j,k} + (1-u)\text{sgn}(\omega_{j,k}) \times (|\omega_{j,k}| - \lambda - \frac{\alpha\lambda \times \log(\frac{\lambda}{|x|})}{1+e^{(\frac{|\omega_{j,k}|-\lambda}{\alpha})^n}}) & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

其中, $u = 1 - e^{-\alpha(|\omega_{j,k}|-\lambda)^2}$, α 和 n 为调节因子,且为整数。

2.2 新阈值函数分析

新阈值函数不但有软阈值函数连续的特点,且当 $|\omega_{j,k}| > \lambda$ 时函数是高阶可导的,现在从数学角度对式 3 进行如下分析。

(1) 函数的连续性。

在 $w_{j,k} = \lambda$ 处:当 $w_{j,k} \rightarrow \lambda^+$ 时, $u \rightarrow 0$ $\lim_{w_{j,k} \rightarrow \lambda^+} \hat{\omega}_{j,k} =$

2 新阈值函数构建

2.1 新阈值函数

针对传统阈值函数存在的各种问题,文中提出一个基于对数的改进阈值函数。该阈值函数不仅能避免传统阈值函数的不足,而且随着小波分解尺度的变化会做出自适应调整。该阈值函数具有调整因子,使用更加灵活,实用性强。其表达式为:

$\lim_{w_{j,k} \rightarrow \lambda^+} w_{j,k} - \lambda = 0$; 当 $w_{j,k} \rightarrow \lambda^-$ 时, $u \rightarrow 0$, $\lim_{w_{j,k} \rightarrow \lambda^-} \hat{\omega}_{j,k} = 0$; 所以可得: $\lim_{w_{j,k} \rightarrow \lambda^+} \hat{\omega}_{j,k} = \lim_{w_{j,k} \rightarrow \lambda^-} \hat{\omega}_{j,k} = 0$ 即在 λ 处连续。

同理也可以证明新阈值函数在 $w_{j,k} = -\lambda$ 处也是连续的,证明过程同上。因此新的阈值函数在定义域内连续,还避免了因间断问题导致的伪吉布斯现象。

(2) 函数的渐近线。

当 $w_{j,k} \rightarrow \pm\infty$ 时, $u \rightarrow 1$ $\lim_{w_{j,k} \rightarrow \pm\infty} \frac{\hat{\omega}_{j,k}}{w_{j,k}} = \lim_{w_{j,k} \rightarrow \pm\infty} u = 1$; 同时

当 $w_{j,k} \rightarrow \infty$ 时, $\lim_{w_{j,k} \rightarrow \infty} (\hat{w}_{j,k} - w_{j,k}) = 0$ 。

综上所述,新阈值函数是以 $\hat{w}_{j,k} = w_{j,k}$ 为渐近线的,该渐近线为硬阈值曲线。

(3) 阈值函数的偏差性。

随着 $w_{j,k} \rightarrow \infty$, $\hat{w}_{j,k}$ 逐渐接近 $w_{j,k}$,从而克服了 $\hat{w}_{j,k}$ 与 $w_{j,k}$ 之间具有偏差的问题。

(4) 函数的高阶可导性。

新阈值函数定义域内是由符号函数、指数函数和对数函数组成的,它们都是初等函数,根据初等函数可导的性质可知,新阈值函数也是一个高阶可导函数。

(5) 阈值可变因子 α 与 n 影响分析。

当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, $n \rightarrow \infty$,新阈值函数为式 1,成为一个硬阈值函数;当 $\alpha \rightarrow 0$ 时,新阈值函数为式 2,变为软阈值函数。因此,只要改变 α 值,新阈值函数就能够在硬和软阈值函数之间灵活变化。参数 α 决定小波阈值的逼近程度,在处理带噪信号时能够保留部分高频信号,使细节系数和信号震荡现象能够较好地得到抑制。

2.3 确定阈值和分解层数

合理有效地选择阈值,关系到信号的最终去噪效果^[11]。该实验中采用自适应阈值^[12],即:

$$\lambda = \frac{\sigma \sqrt{2 \lg N}}{\lg(j+C)}$$

(5)

其中, σ 为噪声方差^[13]; N 为语音信号的长度; j 为当前分解尺度;调节常数 C 可以得到最佳的输出信噪比。实际应用中,由于 σ 不确定,一般取 $\sigma = \text{median}(w)/0.6745$ 。这种自适应阈值有效克服了固定阈值的缺点,去噪效果较好,且更加顽健。

对于分解层数的确定,采用如下算法:通过改变分解层数,不断循环计算消噪信号的信噪比 SNR_2 与带噪信号信噪比 SNR_1 的差值,取差值最大时的分解层数为最优值。流程如图 2 所示。

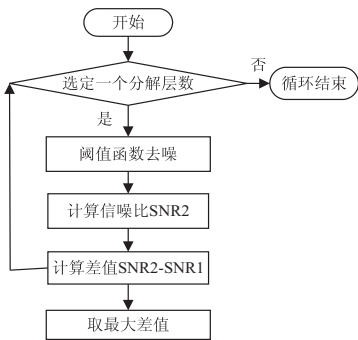


图 2 分解层数选择流程

3 仿真实验与结果分析

3.1 去噪效果评价指标

在信号处理时,通常用信噪比和重构信号均方误

差对去噪效果进行评价。若信噪比指标越大,而均方误差指标越小,说明去噪效果越好^[14-15]。表达式如下:

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^N s^2(i)}{\sum_{i=1}^N (s(i) - \hat{s}(i))^2}$$

(6)

$$\text{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (s(i) - \hat{s}(i))^2}{N}}$$

(7)

其中, $s(i)$ 为初始不带噪信号; $\hat{s}(i)$ 为消噪后信号。

3.2 实验仿真

首先确定分解层数,采用上一节所述算法,选择自适应阈值,通过仿真得到分解层数和信噪比改善量之间的对应曲线,如图 3 所示。由图 3 观察可知,分解层数为 6 时,改善量最大。

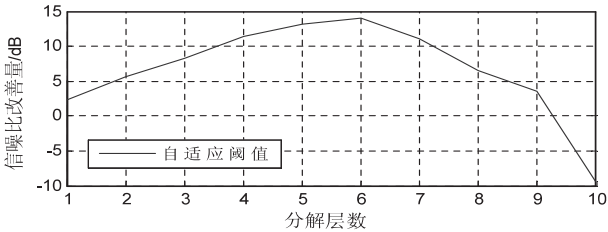


图 3 分解层数与信噪比改善量曲线

基于以上的去噪评价指标,为了说明提出的去噪算法的有效性,采用传统的硬、软阈值函数,文献[6]中的方法和文中提出的新阈值函数进行对比。用 Matlab 工具对含噪测试信号 bumps 和 heavysine 进行小波去噪实验,对其加入信噪比 SNR 为 6 dB 的高斯白噪声,采用小波基为 sym6 小波,6 层分解层数,其中设定式 5 中 $C=1$,式 3、式 5 中 n 取 3。每个处理结果是 30 次运算的平均值。下面以含噪 bumps 信号为例进行说明,去噪效果波形如图 5 所示,信噪比 SNR 和均方误差 MSE 如表 1 所示。

通过大量的仿真实验,根据所得数据有如下分析:

含噪的 bumps 和 heavysine 信号经过各种阈值函数去噪后有很大的差别。由图 4 可知,经过硬阈值函数处理后的重构信号产生了震荡现象。经过软阈值函数去噪后的信号在阈值处虽然连续,但是不可导,而且处理前后小波系数存在一定偏差,使得波形有明显的萎缩。文献[6]中的阈值函数处理噪声信号后的重构信号光滑且与原始信号很接近,而新的阈值函数比文献[6]中的函数更具有优势,在阈值处不是直接置 0 而是平滑处理,细节更加逼近原信号,无附加震荡,波形更加平滑。

由表 1 可知,新阈值函数与其他三个阈值函数相

比,信噪比有很好的提高,均方误差也进一步减小。因此,无论是从波形特征还是数据指标来看,均验证了文中提出的阈值函数去噪算法的优越性。

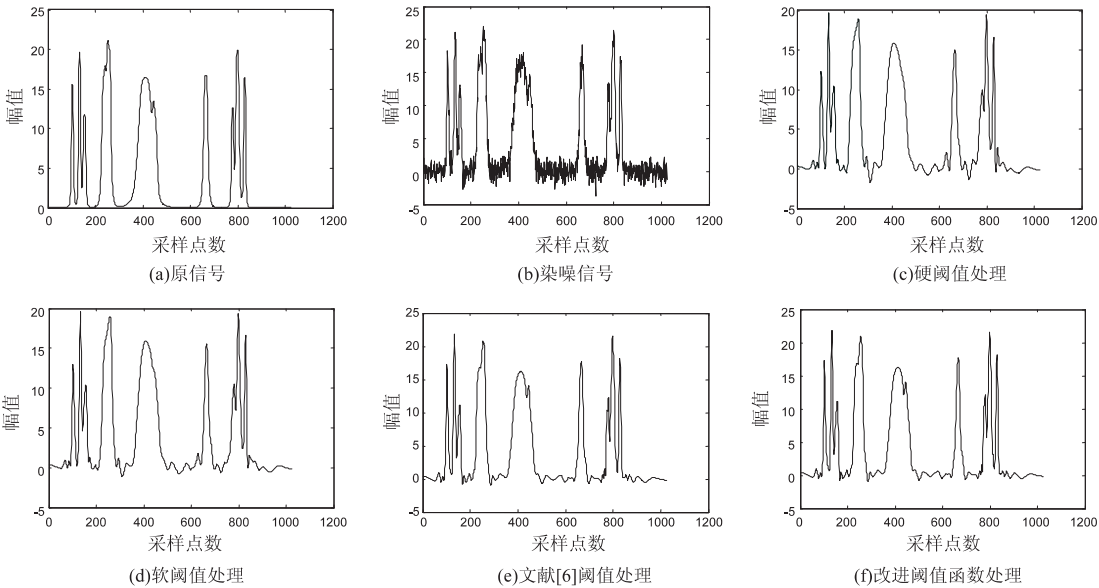


图 4 各阈值函数对 bumps 信号去噪效果

表 1 各阈值函数对 bumps 和 heavysine 信号去噪后的评价指标

评价 指标	含噪 信号	硬阈值 函数	软阈值 函数	文献[6] 阈值函数 ($\alpha=1$)	新阈值 函数 ($\alpha=1$)	文献[6] 阈值函数 ($\alpha=5$)	新阈值 函数 ($\alpha=5$)	文献[6] 阈值函数 ($\alpha=10$)	新阈值 函数 ($\alpha=10$)
bumps	SNR/dB	16.963 34	16.189 48	17.311 72	21.192 78	21.309 46	21.516 60	21.652 04	21.276 10
	MSE	0.999 60	1.092 54	0.971 20	0.611 76	0.610 56	0.589 32	0.586 96	0.606 36
heavysine	SNR/dB	15.953 06	23.711 14	24.883 02	26.063 18	26.192 16	26.654 88	26.712 10	26.751 94
	MSE	1.004 80	0.408 26	0.355 68	0.311 22	0.310 24	0.290 24	0.288 36	0.286 60

3.3 真实环境下的语音消噪

下面把改进算法应用在语音增强上,验证真实环境下的语音消噪效果。文中采用录制内容为“电子信息学院”的语音作为测试信号。背景噪声采用高斯白

噪声,语音信号和噪声采样频率均为 8 kHz,单声道,16 bit 采样位数。同样采用上述四种算法对语音进行去噪。小波基为 sym6,小波分解尺度为 6,去噪后信号的时域波形如图 5 所示。

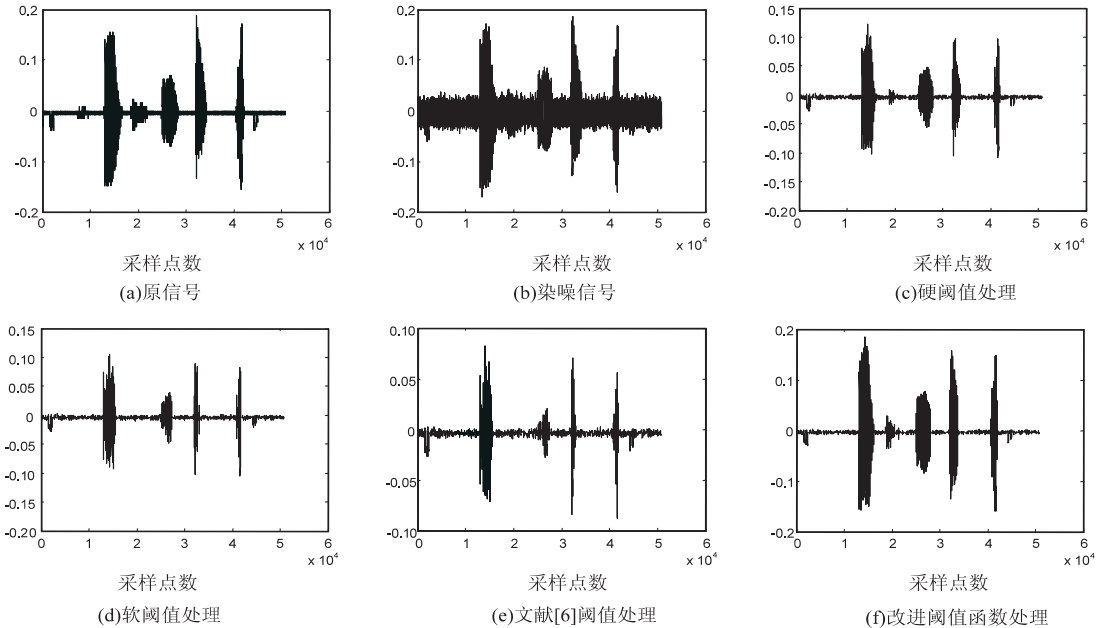


图 5 语音信号去噪效果

图 5 中,观察原信号的前后端有一些凸起的“毛刺”,该现象是因为在录音过程中引入系统内部等环境噪声引起的。通过改进的阈值函数处理后,不仅在很大程度上削减了噪声,而且“毛刺”也得到了抑制。

除了去噪效果比较以外,还得到了每个函数的信噪比和均方误差,如表 2 所示。

表 2 各阈值函数对语音信号去噪后的评价指标

评价指标	含噪信号	硬阈值函数	软阈值函数	阈值函数 1	改进阈值函数
SNR/dB	3.622 3	5.774 6	2.001 4	1.326 8	6.059 0
MSE	0.012 8	0.010 0	0.015 4	0.016 7	0.009 5

4 结束语

从原理上分析了硬阈值函数、文献[6]以及软阈值函数的优缺点后,文中提出一种带有调节因子的阈值去噪算法,有很强的实用性和灵活性。先从信噪比、均方误差两方面与其他三个阈值函数作对比,验证改进算法的有效性;最后将算法应用在语音增强,进一步证明算法的可行性。仿真结果表明,该阈值函数相比硬、软阈值函数和文献[6]提出的函数,无论是在测试信号还是语音信号上,都具有更好的去噪效果,在保留有用语音信号的同时,一定程度上提高了语音整体质量,达到了良好的语音去噪效果。

参考文献:

[1] DONOHO D L,JOHNSTONE I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994, 81 (3): 425-455.

[2] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41 (3): 613-627.

[3] 杨熙. 小波分析在木材缺陷图像处理中的应用[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2011.

[4] 周西峰,朱文文,郭前岗. 基于渐近半软阈值函数的超声信号去噪方法[J]. 探测与控制学报, 2011, 32 (2): 35-39.

[5] ZHANG Xun, LI Juelong, XING Jianchun, et al. A particle swarm optimization technique - based parametric wavelet thresholding function for signal denoising [J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2017, 36 (1): 247-269.

由表 2 的数据对比可知,文中改进的阈值函数对语音进行去噪后的 SNR 比其他几种函数都要高,而且 MSE 也是最低的。通过以上实验结果可知,相比文献[6]的阈值函数和传统软、硬阈值函数,文中改进的阈值函数的语音消噪效果更加明显。

[6] 王蓓,张根耀,李智,等. 基于新阈值函数的小波阈值去噪算法[J]. 计算机应用, 2014, 34 (5): 1499-1502.

[7] 唐鹏,郭宝平. 改进型阈值函数寻优法的小波去噪分析[J]. 信号处理, 2017, 33 (1): 102-110.

[8] ULLAH H, AMIR M, HAQ I U, et al. Wavelet Based De-noising Using Logarithmic Shrinkage Function [J]. Wireless Personal Communications, 2018, 98 (1): 1473-1488.

[9] 卢广森,黎英,毛敏. 基于新阈值函数的小波阈值去噪算法[J]. 传感器与微系统, 2017, 36 (12): 141-144.

[10] 朱伟华,安伟,尤丽华,等. 基于改进阈值函数的小波阈值去噪算法[J]. 计算机系统应用, 2016, 25 (6): 191-195.

[11] YANG Kun, DENG Caixia, CHEN Yu, et al. The de-noising method of threshold function based on wavelet [C]//International conference on wavelet analysis & pattern recognition. Lanzhou, China: IEEE, 2014: 87-92.

[12] 赵力. 语音信号处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2016: 282.

[13] JI Ce, LU Xueliang, TANG Baocheng. An improved wavelet threshold de-noising method and its application [C]//Control and decision conference. Taiyuan, China: IEEE, 2012: 950-953.

[14] 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.

[15] LIU Hui, WANG Weida, XIANG Changle, et al. A de-noising method using the improved wavelet threshold function based on noise variance estimation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 99: 30-46.