

引用格式:杜诗强,宋宇鲲,张玄,等. 一种改进的小波阈值去噪算法[J]. 微电子学与计算机,2021,38(2):40-46. [DU S Q, SONG Y K, ZHANG X, et al. Improved wavelet threshold denoising algorithm[J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38(2): 40-46.]

一种改进的小波阈值去噪算法

杜诗强, 宋宇鲲, 张 玄, 张多利

(合肥工业大学 电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 小波变换具有低熵性、多分辨率性和去相关性等优点,在信号去噪方面得到广泛应用. 本文在传统小波阈值去噪算法的基础上,结合已有改进的阈值函数和阈值选取方式,提出一种改进的小波阈值去噪算法. 改进阈值函数具有更好的连续性和更小的系数偏差;新的阈值选取方式结合了信号的 Lipschitz 特性,具有更高的噪声信号去除率. 通过去噪仿真实验表明,改进的小波阈值去噪算法在信噪比(SNR)和均方误差(MSE)上相较于传统算法提升了 14.4%和 58.3%,相较于已有算法提升了 8.4%和 36.5%,具有更优的去噪效果,证明了本文提出的去噪算法的性能优势和工程应用价值.

关键词: 小波变换;小波阈值去噪;阈值函数;阈值选取

中图分类号: TN911.6

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2021)02—0040—07

Improved wavelet threshold denoising algorithm

DU Shi-qiang, SONG Yu-kun, ZHANG Xuan, ZHANG Duo-li

(School of Electronic Science and Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: Wavelet transform is widely used in signal denoising because of its advantages such as low entropy, multi-resolution and de-correlation. Based on the traditional wavelet threshold denoising algorithm, this paper proposes an improved wavelet threshold denoising algorithm based on the existing improved threshold function and threshold selection method. The improved threshold function has better continuity and smaller coefficient deviation; the new threshold selection method combines the Lipschitz characteristic of the signal and has a higher noise signal removal rate. Denoising simulation experiments show that the improved wavelet threshold denoising algorithm improves the signal-to-noise ratio (SNR) and mean square error (MSE) by 14.4% and 58.3% compared with the traditional algorithm, and improves by comparing with existing algorithms 8.4% and 36.5% have better denoising effect, which proves the performance advantages and engineering application value of the proposed denoising algorithm.

Key words: wavelet transform; wavelet shrinkage; thresholding function; threshold selection

1 引言

由于现实环境的复杂性和信号获取设备的非理想特性等原因,导致各种噪声在信号获取过程中被引入,这不仅会导致信号质量的下降,甚至会掩盖信号中的重要细节. 因此,信号去噪就成了信号处理领域中的一个重要内容^[1-2].

小波技术在信号去噪中获得了非常好的效果,

是信号去噪领域的主要方法之一. 1995 年,Donoho 和 Johnstone 等人提出传统小波阈值去噪算法,但由于所述方法中存在软硬阈值函数缺陷,造成去噪后失真和边缘模糊的现象^[3-6]. 2004 年,张维强博士在传统去噪函数的基础上对其中的阈值函数进行改进^[7],提高了信号去噪的效果,得到了较为理想的去噪结果;文献[8]对阈值函数和阈值选取方式均作出改进,并且将其应用于图象去噪方面,显著有效的去

除图像噪声。

本文针对传统小波阈值去噪算法的缺点,在深入研究已有的小波阈值函数和阈值选取方式上的基础上^[9-10],提出一种改进的小波阈值去噪算法,并通过仿真验证了该改进算法在信噪比(SNR)和均方误差(MSE)上相较于传统算法分别提升了14.4%和58.3%,相较于文献[9]提出的算法分别提升了8.4%和36.5%。

2 小波阈值去噪原理

2.1 信号描述

广义的噪声指信号中除有用成分以外的所有成分。一个含有噪声的信号模型如下:

$$s(t) = f(t) + n(t) \quad (1)$$

式中, $s(t)$ 为含噪信号; $f(t)$ 为原始信号; $n(t)$ 为噪声信号。去噪的目的就是抑制 $s(t)$ 中的 $n(t)$,得到所期望的原始信号 $f(t)$ 。传统去噪方法的不足是信号变换后的熵增高,既无法刻画信号的非平稳特性,也无法得到信号的相关性。小波变换由于具有良好的时频特性,在分析非平稳信号和去除信号相关性上都很有优势,在信号去噪中的应用中有广阔应用前景^[11]。

2.2 小波变换

一维连续函数 $f(t)$ 的连续小波变换为:

$$\begin{aligned} WT_f(a, \tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi_{a, \tau}(t) dt \\ &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $WT_f(a, \tau)$ 为小波系数; $\phi_{a, \tau}(t)$ 为小波基函数; $\phi(t)$ 为小波函数,满足容许性条件^[10]; a 为尺度参数; τ 为时延参数。

对一维连续信号 $f(t)$ 进行离散采样,得到 N 点离散信号 $f(n)$,则离散小波变换为:

$$WT_f(j, k) = 2^{-j/2} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \psi(2^{-j}n - k) \quad (3)$$

式中, $WT_f(j, k)$ 为小波系数; j 为离散化的尺度参数; k 为离散化的时延参数。

相应的,小波逆变换为:

$$f(n) = \frac{1}{A} \sum_{j, k} WT_f(j, k) \psi_{j, k}(n) \quad (4)$$

式中, A 为 $\psi_{j, k}(t)$ 构成的小波框架的界。

2.3 小波阈值去噪

一般而言,原始有效信号为低频信号,噪声信号主要分布在高频区域。有效信号在空间(或时间域)上有一定连续性,变换至小波域后小波系数的模值往往较

大;而在空间(或时间域)上是非连续的噪声信号经过小波变换后,仍具有很强的离散随机性,其对应的小波域系数模值较小。Donoho和Johnstone提出的小波阈值去噪算法的基本思想源自上述特性,通过设定一个阈值对小波系数进行处理,“零化”由噪声信号产生的小波系数,保留有效信号产生的小波系数,再对处理后的系数进行小波重构,得到去噪后的信号^[12-14]。

小波阈值去噪算法的具体步骤^[15]如下:

(1) 对含噪信号 $s(n)$ 进行小波变换。根据含噪信号 $s(n)$ 确定小波基函数和小波变换级数,得到不同尺度下的小波系数 $W_{j, k}$ 。

(2) 阈值处理。选择合适的阈值函数对不同变换尺度下的小波系数进行阈值处理,得到估计的小波系数 $\hat{W}_{j, k}$ 。

(3) 信号重构。对步骤(2)得到的小波系数 $\hat{W}_{j, k}$ 进行小波逆变换,得到去噪信号。

3 改进的小波阈值函数

在小波阈值去噪算法中,构造合适的阈值函数至关重要。本文在文献[9]的基础上提出一种新的阈值函数。

3.1 传统的阈值函数

常用的阈值函数处理方法有硬阈值和软阈值,其表达式分别如下所示:

硬阈值函数:

$$\hat{W}_{j, k} = \begin{cases} W_{j, k}, & |W_{j, k}| \geq \lambda \\ 0, & |W_{j, k}| < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

软阈值函数:

$$\hat{W}_{j, k} = \begin{cases} \text{sgn}(W_{j, k})(|W_{j, k}| - \lambda), & |W_{j, k}| \geq \lambda \\ 0, & |W_{j, k}| < \lambda \end{cases} \quad (6)$$

式中, $W_{j, k}$ 为含噪信号的小波系数; $\hat{W}_{j, k}$ 为经过阈值处理后的小波系数; j 为分解尺度; k 为系数序号; λ 为小波阈值; $\text{sgn}()$ 为符号函数。

其对应的函数图像如图1所示。

由图1可知,硬阈值函数在阈值点处是间断、不连续的,优点是可以很好地保留信号的尖峰特性,缺点是会使去噪信号在阈值点处发生振荡,产生伪吉布斯(Pseudo Gibbs)现象;由图2可知,软阈值函数具有良好的连续性,其处理后的小波系数与硬阈值函数相比存在着恒定偏差 λ ,所以经过软阈值函数处理的去噪信号相对平滑,但也存在着精度不够、失

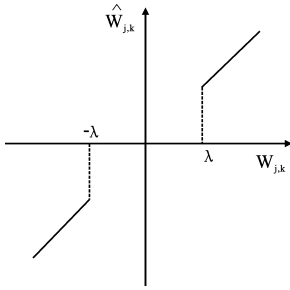


图1 硬阈值函数图像

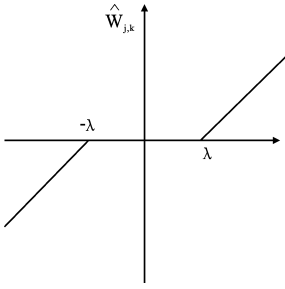


图2 软阈值函数图像

真等现象^[16].

3.2 改进阈值函数

由于传统的软硬阈值函数在去噪方面的应用结果并不理想,所以对阈值函数的改进一直是小波研究的重点.

文献[17]提出了结合软硬阈值的方法构造出一种新的阈值函数的方法:

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} u W_{j,k} + (1-u) \operatorname{sgn}(W_{j,k}) (|W_{j,k}| - \lambda), & |W_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |W_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (7)$$

式中, $u = 1 - e^{-\alpha(|W_{j,k}| - \lambda)2}$, α 为调整因子,取值范围为 $0 \leq \alpha \leq 1$.

式(7)虽然在一定程度上改善了小波阈值去噪算法的效果,但在改进估计小波系数与含噪信号的小波系数之间存在恒定偏差的方面仍不理想,存在着重构后去噪信号失真的现象.针对上述问题,文献[18]引入了带指数参数的阈值估计器,改善阈值函数在恒定偏差方面的不足.改进的软硬阈值结合函数如下:

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} u W_{j,k} + (1-u) \operatorname{sgn}(W_{j,k}) (|W_{j,k}| - T), & |W_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |W_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (8)$$

式中, $T = \lambda e^{(1-\alpha)(\lambda - |W_{j,k}|)}$, α 为调整因子,取值范围为 $0 \leq \alpha \leq 1$.

式(8)以 $\hat{W}_{j,k} = W_{j,k}$ 为渐近线,克服了 $\hat{W}_{j,k}$ 与 $W_{j,k}$ 之间存在的恒定偏差问题,提升了信号的去噪质量.文献[7]指出若把偏差减少到零(硬阈值情况),未必能获得信号最佳去噪的效果.

为了克服上述算法的缺点,本文在文献[9]的基础上,构造了一种新的阈值函数:

$$\hat{W}_{j,k} = \frac{W_{j,k} [1 + 2e^{\alpha(-W_{j,k}-T)} + e^{-2\alpha W_{j,k}}]}{(1 + e^{\alpha(-W_{j,k}-T)})(1 + e^{\alpha(-W_{j,k}+T)})} \quad (9)$$

$$\text{式中, } T = \begin{cases} \lambda * \alpha^{(1-\frac{1}{\alpha})} < \lambda - |W_{j,k}| >, & |W_{j,k}| > \lambda \\ \alpha * \alpha^{(1-\frac{1}{\alpha})} < \lambda - |W_{j,k}| >, & |W_{j,k}| \leq \lambda \end{cases}$$

α 为调整因子,取值范围为 $\alpha \geq 10$.

由于文献[9]的阈值函数对小于阈值的小波系数处理不彻底,使得其去噪效果仍不理想,因此本文采用与文献[18]相类似的改进方式,通过引入阈值估计器对文献[9]的阈值函数进行修正.本文引入的带指数参数阈值估计器,是以阈值为临界点,对于小波系数大于阈值的部分,以阈值作为阈值估计器的系数;小波系数小于阈值的部分,以调整因子作为阈值估计器的系数,克服了 $\hat{W}_{j,k}$ 在阈值处去噪不彻底的缺点,并更降低了 $\hat{W}_{j,k}$ 与 $W_{j,k}$ 之间存在的恒定偏差.

为便于对新的阈值函数进行分析,对式(9)进行变换,得到:

$$y(x) = \frac{x[1 + 2e^{\alpha(-x-T)} + e^{-2\alpha x}]}{(1 + e^{\alpha(-x-T)})(1 + e^{\alpha(-x+T)})} \quad (10)$$

$$\text{式中, } T = \begin{cases} \lambda * \alpha^{(1-\frac{1}{\alpha})} < \lambda - |x| >, & |x| > \lambda \\ \alpha * \alpha^{(1-\frac{1}{\alpha})} < \lambda - |x| >, & |x| \leq \lambda \end{cases}$$

式(10)具有以下三个特点:

(1) 新的阈值函数在 $(-\infty, +\infty)$ 是连续的,且在 $|x| \leq \lambda$ 时, $y \rightarrow 0$. 证明如下:

当 $|x| = 0$ 时, $y(0) = 0$;

由于 $\alpha \geq 10$, 且 λ 取值范围一般为 $0 < \lambda < \alpha$. 所以有,

当 $x = \lambda$ 时, 有 $T = \alpha$, 所以,

$$y(\lambda) = \frac{\lambda[1 + 2e^{\alpha(-\lambda-\alpha)} + e^{-2\alpha\lambda}]}{(1 + e^{\alpha(-\lambda-\alpha)})(1 + e^{\alpha(-\lambda+\alpha)})} \rightarrow \frac{1}{e^{\alpha(-\lambda+\alpha)}}$$

$\rightarrow 0$

当 $x = -\lambda$ 时, 有 $T = \alpha$, 所以,

$$y(-\lambda) = \frac{-\lambda[1 + 2e^{\alpha(-\lambda-\alpha)} + e^{2\alpha\lambda}]}{(1 + e^{\alpha(-\lambda-\alpha)})(1 + e^{\alpha(-\lambda+\alpha)})} \rightarrow \frac{1}{e^{\alpha(-\lambda+\alpha)}}$$

$\rightarrow 0$.

而文献[9]的阈值函数在 $W_{j,k} = \pm \lambda$ 时,

有 $y \rightarrow \pm \frac{\lambda}{2}$

所以,新阈值函数在 $W_{j,k} = \pm \lambda$ 处趋近于 0,克服了 $\hat{W}_{j,k}$ 在阈值处去噪不彻底的缺点。

当 $x \rightarrow +\infty$ 时,有:

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{y(x)}{x} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1 + 2e^{a(-x-T)} + e^{-2ax}}{(1 + e^{a(-x-T)})(1 + e^{a(-x+T)})} \rightarrow \frac{1}{1} = 1; \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} y(x) - x &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x[1 + 2e^{a(-x-T)} + e^{-2ax}] - x(1 + e^{a(-x-T)})(1 + e^{a(-x+T)})}{(1 + e^{a(-x-T)})(1 + e^{a(-x+T)})} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x[e^{a(-x-T)} - e^{a(-x+T)}]}{(1 + e^{a(-x-T)})(1 + e^{a(-x+T)})} \rightarrow 0;\end{aligned}$$

当 $x \rightarrow -\infty$ 时,有:

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{y(x)}{x} &= \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{1 + 2e^{a(-x-T)} + e^{-2ax}}{(1 + e^{a(-x-T)})(1 + e^{a(-x+T)})} \\ &= \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{1 + 2e^{a(-x-T)} + e^{-2ax}}{1 + e^{a(-x-T)} + e^{a(-x+T)} + e^{-2ax}} \rightarrow 1; \lim_{x \rightarrow -\infty} y(x) - x \\ &= \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x[1 + 2e^{a(-x-T)} + e^{-2ax}] - x(1 + e^{a(-x-T)})(1 + e^{a(-x+T)})}{(1 + e^{a(-x-T)})(1 + e^{a(-x+T)})} \rightarrow 0;\end{aligned}$$

因此有, $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{y(x)}{x} = 1, \lim_{x \rightarrow \pm\infty} y(x) - x = 0$ 。

(3) 新的阈值函数为以 α 为调整因子的初等函数。理论上随着 α 值增大,算法的运算量会随之增大,新的阈值函数会更加接近理想的阈值函数。但是在实际应用中,当 α 的取值在 10 附近时,函数图像就已经十分标准,并且大幅降低了算法的运算量。

图 3 为 $\alpha = 10, \lambda = 3$ 时,新的阈值函数图像。

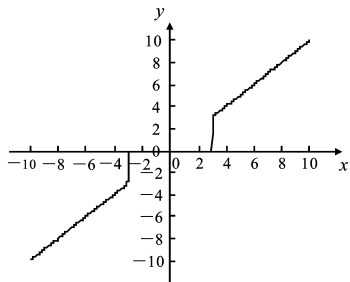


图 3 $\alpha = 10$ 的新阈值函数图像

综上所述,新的阈值函数是通过引入带指数参数的阈值估计器进行重新构造,使得其更接近于理想的阈值函数。由(1)可知,新的阈值函数在阈值处趋近于 0,克服了阈值处去噪不彻底的缺点,使得阈值函数的图像更加平滑;在应用于信号去噪时,不会产生伪吉布斯(Pseudo Gibbs)现象;由(2)可知,新阈值函数以 $\hat{W}_{j,k} = W_{j,k}$ 为渐近线,解决阈值函数中 $\hat{W}_{j,k}$ 与 $W_{j,k}$ 之间具有恒定偏差的缺点,使得去噪质量更高,指标更精确,视觉效果更好;由(3)可知,新的阈值函数具有可调节

(2) 式(10)是以 $y = x$ 为渐近线的,即新的阈值函数是以 $\hat{W}_{j,k} = W_{j,k}$ 为渐近线,且随着 $W_{j,k}$ 的增大,小波系数估计值 $\hat{W}_{j,k}$ 逐渐接近 $W_{j,k}$ 。证明过程如下:

的特点,使得其在实际应用中更加方便。

4 改进的阈值选取方式

在小波阈值去噪算法中,阈值是作为一个门限值来将小波系数分为重要的、规则的有用信号小波系数和不重要的、随机的噪声信号小波系数两部分,它的选取直接影响信号去噪质量。确定阈值大小的原则是保证选取的阈值刚好大于噪声的幅值水平。

通常,小波阈值去噪算法中阈值的选取都是通过小波系数的统计特性估计得到的,其中最经典阈值计算方法为 Donoho 和 Johnstone 提出的全局阈值,公式如下:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N} \quad (11)$$

式中, $\sigma = \frac{\text{Median}(|W_{1,k}|)}{0.6745}$, 为估计的噪声标准方差, $\text{Median}(|W_{1,k}|)$ 指的是第一次小波变换后高频系数绝对值的中值, 0.6745 为噪声标准方差的调整系数; N 为信号长度。

含噪信号经过小波变换后,有用信号和噪声信号的小波系数随着尺度的变化具有不同的变化特性。随着分解尺度的增大,噪声信号的小波系数幅值随之减小,而有用信号的小波系数幅值则会随之增大。所以在对阈值的选取上就需要考虑到上述特性,针对不同的小波分解尺度,选取与分解尺度相适应的阈值。

通过对有用信号和噪声信号在 Lipschitz 指数

特性进行分析,得到第 $j+1$ 层噪声小波系数大约为第 j 层的 $\sqrt{2}/2^{[10]}$. 本文结合小波系数幅值与尺度的变化特性以及上述 Lipschitz 指数特性,提出一种改进的阈值选取方法:

$$\lambda_j = \sigma \sqrt{2 \ln N_j} / (\sqrt{2})^{j-1}$$

(12)

式中, σ 为噪声标准方差; N_j 为第 j 层分解的系数个数; j 为小波分解尺度.

5 实验及分析

本小节设计了对加入噪声的信号进行去噪模拟实验,以信噪比(Signal-Noise Ratio, SNR)和均方误差(Mean-Square Error, MSE)作为评估依据来测试本文提出的小波阈值去噪算法的性能. 实验中原始信号为 Doppler 信号,含噪信号的信噪比为 12.790 6 dB,选取的小波函数为 dB 4 小波,分解级

数为 4,新的阈值函数调整因子 $\alpha=10$.

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_1^N f(n)^2}{\sum_1^N (f(n) - \hat{f}(n))^2}$$

(13)

$$MSE = \frac{\sum_1^N (f(n) - \hat{f}(n))^2}{N}$$

(14)

式中, $f(n)$ 为原始信号, $\hat{f}(n)$ 为小波阈值去噪算法处理后的去噪信号; N 为信号的长度.

在去噪模拟实验中共进行了两组对照实验. 实验一是在通用阈值情况下对不同的阈值函数进行去噪处理,统一阈值即是采用式(11)的阈值选取方式. 图 4 为实验一的去噪效果模拟图,表 1 为其信噪比和均方误差的对比表.

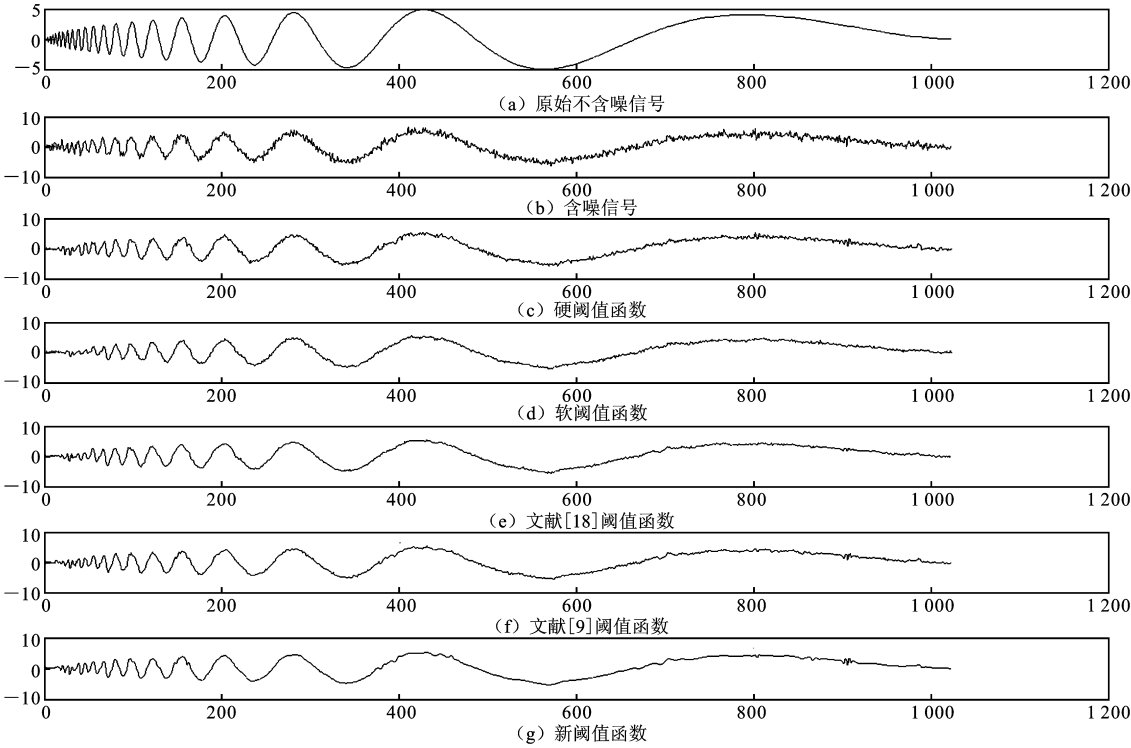


图 4 通用阈值不同阈值函数的去噪结果对比

表 1 通用阈值不同阈值函数的信噪比和均方误差对比

去噪方式	信噪比 SNR/dB	均方误差 MSE
含噪信号	12.790 6	2.204 6
硬阈值函数	19.148 2	0.136 9
软阈值函数	19.726 6	0.1277
文献[18]函数	20.621 5	0.088 2
文献[9]函数	20.690 3	0.087 9
新阈值函数	22.485 4	0.058 6

由图 4 和表 1 结果可以看出,在通用阈值的情况下,新阈值函数的去噪效果与其他阈值函数相比,去噪后信号的信噪比最大,均方误差最小,说明其去噪的效果最好.

实验二是采用本文提出的改进阈值选取方法结合不同的阈值函数进行信号的去噪. 图 6 为实验二的结果图,表 2 为其信噪比和均方误差的对比表.

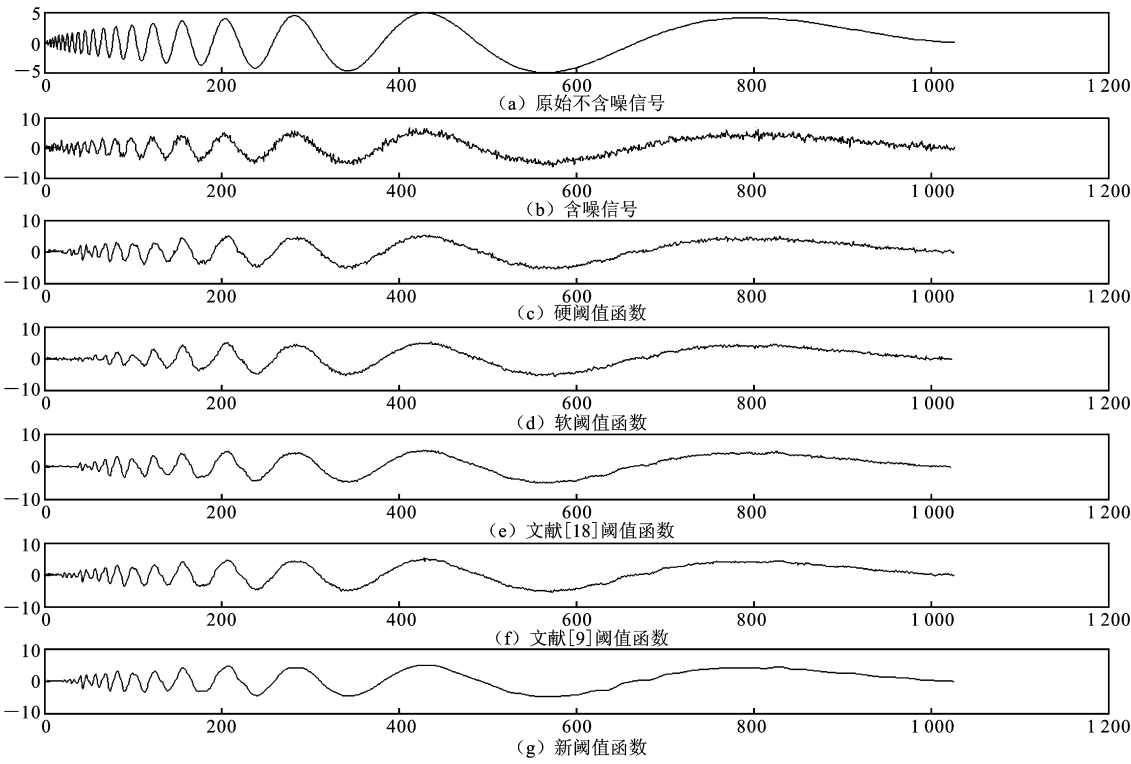


图 5 改进阈值不同阈值函数的去噪结果对比

表 2 改进阈值不同阈值函数的信噪比和均方误差对比		
去噪方式	信噪比 SNR/dB	均方误差 MSE
含噪信号	12.790 6	2.204 6
硬阈值函数	19.793 5	0.132 1
软阈值函数	21.966 3	0.122 2
文献[18]函数	22.032 8	0.084 3
文献[9]函数	22.048 3	0.083 4
新阈值函数	23.898 7	0.052 9

由实验二的结果也可以看出,在改进的阈值选取方式下,新的阈值函数的信噪比最大,均方误差最小,相比于其他阈值函数来说,去噪的效果也是最好的。

结合实验一和实验二的结果,可以看出本文提出改进的小波阈值去噪算法在采用了改进的阈值选取方式和新的阈值函数后,去噪后的信号的信噪比最大,均方误差最小,从而说明了改进的小波阈值去噪算法优于其他的去噪算法。

6 结束语

本文通过分析传统小波阈值去噪算法和其他改进算法的特点,针对其中的阈值函数和阈值选取方式分别改进,提出了一种改进的小波阈值去噪算法。

通过信号去噪仿真实验对不同算法下的去噪结果进行分析比较,验证了本文提出的改进小波阈值去噪算法在信号的去噪效果和去噪性能上的有效性和优越性。

参考文献:

[1] XIAO F Y, TANG W, FU N. Self optimizing wavelet thresholddenoising method [J]. signal processing, 2012,28 (4): 577-586. DOI: 10.3969/j. issn. 1003-0530. 2012. 04. 018.

[2] QIN CX, GU XH. An image denoising method based on improved wavelet thresholding[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 452 (4): 042199. DOI: 10.1088/1757-899X/452/4/042199.

[3] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41 (3): 613-627. DOI: 10.1109/18.382009.

[4] XU Y S, WEAVER J B, HEALY D M. et al. Wavelet transform domain filters: a spatially selective noise filtration technique[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1994, 3 (6): 747-758. DOI: 10.1109/83.336245.

[5] CUI W P, DU L J. Improved wavelet threshold de-

- noising method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 602-605: 3177-3180. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.602-605.3177.
- [6] LIN Y T, CAI J L. A new threshold function for signal denoising based on wavelet transform[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Changsha City, China: IEEE, 2010: 200-203. DOI: 10.1109/ICMTMA.2010.347.
- [7] ZHANG W Q, SONG G X. Signal de-noising in wavelet domain based on a new kind of thresholding function[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2004, 31(2): 296-299. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2400.2004.02.030.
- [8] LI L, XIONG Q F. New image denoising method based on adaptive threshold [J]. Microelectronics & Computer, 2013, 30(4): 83-86. DOI: 10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2013.04.020.
- [9] PENG J S, ZHANG Z C, HAN Y C. A denoising algorithm based on a new threshold function applying a adaptive learning algorithm [J]. Microelectronics & Computer, 2016, 33(4): 81-85. DOI: 10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2016.04.018.
- [10] ZHANG Z F, WEI H, TAN B W. An improved wavelet threshold denoising method[J]. Study on Optical Communications, 2018, 44(2): 75-78. DOI: 10.13756/j.gtxyj.2018.02.021.
- [11] CHEN L M, XIE B. A new signal denoising method based on wavelet threshold algorithm[C]//Proceedings of the 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications. Chengdu, China: IEEE, 2016: 1961-1964. DOI: 10.1109/CompComm.2016.7925044.
- [12] MALLAT S. A wavelet tour of signal processing[M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1999: 73-105.
- [13] LIU C X. Research on imagedenoising algorithm for mobile phonecamera based on wavelet transform[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [14] DONG W Y, DING H, DONG X S. An adaptive wavelet threshold de-nosing both in low and high frequency domains[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(12): 2374-2380. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.12.005.
- [15] LU Y, HUANG Y M, XUE W, et al. Seismic data processing method based on wavelet transform for denoising[J]. Cluster Computing, 2019, 22(3): 6609-6620. DOI: 10.1007/s10586-018-2355-0.
- [16] WANG K, DONG S B, YU Z L, et al. Application of wavelet threshold denoising on bearing fault diagnosis [C]//Proceedings of 2019Chinese Control and Decision Conference. Nanchang, China: IEEE, 2019: 1980-1985. DOI: 10.1109/CCDC.2019.8832990.
- [17] TAO H Y, QIN H F, YU C B. Research of signal denoising method based on an improved wavelet thresholding [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2008, 30(1): 93-95. DOI: 10.3969/j.issn.1004-2474.2008.01.031.
- [18] CUI G Z, ZHANG Z X, YANG L Z, et al. An improved wavelet threshold denoising algorithm [J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(19): 50-53. DOI: 10.16652/j.issn.1004-373x.2019.19.012.

作者简介:

杜诗强 男, (1995-), 硕士研究生. 研究方向为嵌入式系统综合测试. E-mail: 1359001305@qq.com

宋宇鲲 男, (1975-), 博士, 副研究员. 研究方向为面向数据密集与计算机密集应用的 SoC/MPSoC 体系结构与实现.

张 玄 男, (1993-), 硕士研究生. 研究方向为可编程器件与系统设计.

张多利 男, (1976-), 博士, 研究员. 研究方向为多核处理器体系结构与设计方法、多媒体专用集成电路设计实现.