

# 基于小波阈值的心电信号去噪算法<sup>①</sup>

王慧静<sup>1,2</sup>, 蒲宝明<sup>1</sup>, 孙宏国<sup>1,2</sup>, 张全发<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院 研究生院, 北京 100049)

<sup>2</sup>(中国科学院 沈阳计算技术研究所, 沈阳 110168)

**摘要:** 将小波阈值方法应用于心电信号的去噪处理, 在对常用阈值函数理解分析的基础上提出一种改进的阈值函数, 并利用 Matlab 对 MIT-BIH 数据库中的心电数据进行仿真, 分别采用常用阈值函数和改进阈值函数进行硬、软阈值处理. 实验表明, 改进阈值函数的软阈值去噪方法能有效地滤除心电信号中主要干扰, 并较好地保留了心电信号的特征信息.

**关键词:** 小波阈值; 心电信号; 阈值函数; Matlab 仿真

## Denoising Algorithm of ECG Signals Based on Wavelet Threshold

WANG Hui-Jing<sup>1,2</sup>, PU Bao-Ming<sup>2</sup>, SUN Hong-Guo<sup>1,2</sup>, ZHANG Quan-Fa<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>2</sup>(Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** In this paper, the wavelet threshold method was applied to ECG signal denoising. We proposed an improved threshold function on the basis of analysis and understanding of the commonly used ones. And the MIT-BIH database was used to simulate the ECG data in Matlab, respectively using common threshold functions and improved one for hard and soft thresholding to remove the noise. Experimental results show that soft thresholding method of improved threshold function can effectively filter out the main interference, and better to retain the characteristics of the ECG.

**Key words:** wavelet threshold; ECG; threshold function; Matlab simulation

人体心电信号反映了心脏兴奋的电活动过程, 对心脏基本功能及其病理研究具有重要的参考价值. 由于心电信号是一种非线性、非平稳的微弱信号, 且在采集、放大和变换过程中, 易受到仪器及人体呼吸运动等因素的影响, 不可避免地引进多种噪声干扰, 这些噪声干扰会使心电信号在形态和周期上发生畸变, 给心电信号检测和识别带来了很大困难. 因此, 为了准确地进行波形识别和特征提取, 必须有效地去除这些噪声干扰.

小波变换是一种信号的时间-频率分析方法, 具有多分辨率分析的特点, 且在时频两域都具有表征信号局部特征的能力, 能够较好地处理非平稳信号. 含确定频率噪声的信号, 其频谱呈现出明显的分离特性, 此时利用小波变换可方便地实现低通、高通、带通、陷波等诸多滤波功能. 基于小波阈值的信号去噪算法, 算法简单、计算量小, 且在保持信号奇异性的同时能

有效地滤除噪声, 具有广泛的适应性. 本文将小波阈值引入到心电信号去噪中, 在不同的尺度运用不同的阈值对心电信号进行去噪处理.

## 1 基于小波阈值的心电信号去噪算法原理

### 1.1 小波阈值去噪原理

含噪信号经小波分解后, 有效信号的小波系数幅值要大于噪声的系数幅值, 选择一个合适的阈值, 幅值低于该阈值的小波系数, 认为主要是由噪声引起的, 直接舍弃该分解系数, 高于该阈值的小波系数, 就认为主要是由信号引起的, 保留或者做相应的收缩处理, 然后将处理后得到的小波系数进行小波重构, 即可达到去噪的目的.

### 1.2 心电信号主要噪声分析

人体的心电信号是 mv 级别的微弱信号, 从体表

① 收稿时间:2012-04-18;收到修改稿时间:2012-05-15

检测的心电信号含有大量的噪声干扰, 主要包括以下三种类型<sup>[2]</sup>.

1) 基线漂移. 一般由人体呼吸、肢体运动、电极移动等低频干扰所引起, 其频率一般小于 0.5Hz.

2) 工频干扰. 由电力系统所引起, 频率固定为 50Hz, 幅度较低.

3) 肌电干扰. 由肌肉收缩、人体运动所引起, 频率范围较广, 一般为 5~2000Hz, 是一种高频干扰, 幅度为 mv 级.

### 1.3 小波基函数的选取

由于小波基函数具有不唯一性, 在实际应用中针对同一个问题采用不同的小波基函数, 其分析结果不尽相同, 因此, 应根据实际问题, 再结合不同小波基函数的特点, 来选取相应的小波基函数.

#### 1.3.1 小波基函数选取标准

小波基函数的选取标准通常有: 1) 小波函数和尺度函数的支集长度, 支集越短, 其局部化能力越好; 2) 消失矩阶数, 在数据压缩中非常有用; 3) 对称性, 在信号分解和重构时避免相移; 4) 正则性, 主要影响信号重构的稳定性<sup>[1]</sup>.

#### 1.3.2 bior 小波

*bior* 小波是双正交小波, 具有紧支撑和对称性, 且具有线性相位特性, 能有效地减少信号重构误差. *bior* 小波系的表示形式为  $biorNrNd$ , 其中,  $N$  为阶数,  $r$  表示重构,  $d$  表示分解, 即分解和重构时采用不同的小波基函数. 双正交小波具有其他小波无法比拟的对称性和紧支撑特性, 对非线性、非稳定的心电信号具有更好的滤波效果. 本文经过多次实验, 并根据心电信号的具体特征再结合小波基函数的选取标准以及 *bior* 小波的具体特性, 本文选取具有紧支集对称性的 *bior3.7* 小波对心电信号进行分解和重构.

### 1.4 阈值函数的选取

阈值处理法主要分为硬阈值处理和软阈值处理<sup>[6]</sup>. 设  $x$  是小波系数,  $\lambda$  是阈值,  $s$  是阈值处理后的小波系数.

$$\text{硬阈值法 } s = \begin{cases} x & |x| \geq \lambda \\ 0 & |x| < \lambda \end{cases}$$

$$\text{软阈值法 } s = \begin{cases} \text{sgn}(x)(|x| - \lambda) & |x| \geq \lambda \\ 0 & |x| < \lambda \end{cases}$$

#### 1.4.1 常用阈值函数

在小波阈值去噪中, 阈值  $\lambda$  起着决定性作用, 若选用的  $\lambda$  太小, 则阈值处理后小波系数仍含有大量噪

声信号, 若选用的  $\lambda$  太大, 则阈值处理后将去除有用的信号成分, 造成失真. 常用的阈值<sup>[6]</sup>有:

1) 固定阈值(*sqtwolog*)

$N$  为含噪信号在所有分解尺度上的小波系数的个数总和,  $\sigma$  为噪声信号的标准差, 则  $\lambda = \sigma\sqrt{2\ln N}$ .

2) *Stein* 无偏似然估计阈值(*regsure*)

基于 *Stein* 的无偏似然估计求出的 *SURE* 阈值, 对于给定阈值  $\lambda$ , 得到它的似然估计, 再将非似然  $\lambda$  最小化, 就可得所选阈值.

3) 启发式阈值(*Heursure*)

它是前两种阈值的综合, 当信号  $x(n)$  信噪比较小时, 采用固定阈值, 反之则采用 *Stein* 无偏似然估计阈值.

4) 极大极小阈值(*Minimaxi*)

采用极大极小原理产生阈值, 其原理是令估计的最大风险最小化.

#### 1.4.2 改进的阈值函数

由于小波分解后, 不同尺度上小波系数的信噪比存在差异, 本文提出一种改进的阈值函数, 针对不同尺度上的小波系数选用不同的阈值进行处理. 具体阈值函数为:  $\lambda = \sigma_j\sqrt{2\log N_j} / \ln(z + 2j)$ .

其中,  $N_j$  为第  $j$  级尺度上小波系数长度,  $\sigma_j$  为第  $j$  级尺度上的噪声标准差,  $z$  为常数.

## 2 Matlab 仿真分析

本文采用 MIT-BIH 数据库记录的 117 信号进行 Matlab 仿真, 将 V2 导联的前 2000 个 117 心电信号作为原始信号, 分别加入基线漂移、工频干扰和肌电干扰, 其中, 基线漂移和工频干扰分别用 0.2Hz 和 50Hz 的正弦信号来模拟, 肌电干扰用均值为 0 的高斯白噪声来模拟.

### 2.1 心电信号及主要噪声的频带分析

一般正常心电信号的频率范围为 0.05~100Hz, 而 90% 的心电信号能量集中在 0.25~35Hz 之间. 基线漂移的频率小于 0.5Hz, 工频干扰频率固定为 50Hz, 肌电干扰频率范围为 5~2000Hz. MIT-BIH 数据库中心电信号的采样频率为 360Hz, 心电信号小波分解后的频率响应如表 1 所示, 其中  $di$  表示第  $i$  尺度上高频信号,  $ci$  表示第  $i$  尺度上的低频信号.

表 1 小波分解后各尺度上的频率范围

小波系数	频率(Hz)
$d1$	90~180

<i>d2</i>	45~90
<i>d3</i>	22.5~45
<i>d4</i>	11.25~22.5
<i>d5</i>	5.625~11.25
<i>d6</i>	2.8125~5.625
<i>d7</i>	1.40625~2.8125
<i>d8</i>	0.703125~1.40625
<i>d9</i>	0.3515625~0.703125
<i>d10</i>	0.17578125~0.3515625
<i>c10</i>	0~0.17578125

对比表 1 和心电信号、噪声信号的频率范围可知,极基线漂移主要集中在第 10 尺度上,工频干扰主要分布在第 2 尺度上,肌电干扰的频率范围虽广,但主要集中在低尺度上,即第 1、2、3 尺度上。

### 2.2 改进的小波阈值去噪的基本步骤

1) 利用 *bior3.7* 小波对含噪心电信号进行 10 尺度分解。

2) 对 1、2、3 尺度上的高频信号利用改进的阈值函数选取不同的阈值,对 4~10 尺度上的高频信号直接选取阈值 0,采用软阈值法进行处理,去除工频和肌电干扰。

3) 将第 10 尺度上的低频和 10 尺度上的高频信号直接置 0,去除基线漂移。

4) 将处理后的心电信号进行小波重构。

### 2.3 去噪效果评价依据

信噪比(*SNR*)和最小均方差(*MSE*)是判断心电信号去噪效果的主要依据<sup>[3]</sup>,*SNR*、*MSE* 的定义为:

$$SNR = 10 \log_{10} \left[ \frac{\sum_{n=1}^N x^2(n)}{\sum_{n=1}^N [x(n) - y(n)]^2} \right]$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - y(n)]^2$$

其中, *N* 表示信号长度, *x*(*n*)表示原始信号, *y*(*n*)表示去噪处理后的信号, *SNR* 越大, *MSE* 越小,去噪效果越好。

### 2.4 不同阈值函数去噪效果比较

在 Matlab 中对心电信号去噪进行仿真,利用不同的阈值函数分别进行硬阈值和软阈值处理,仿真结果如图 1~4 所示。

其他条件相同的情况下,对加噪心电信号采用不同的阈值函数分别进行硬阈值、软阈值处理后的 *SNR* 和 *MSE* 如表 2 所示。

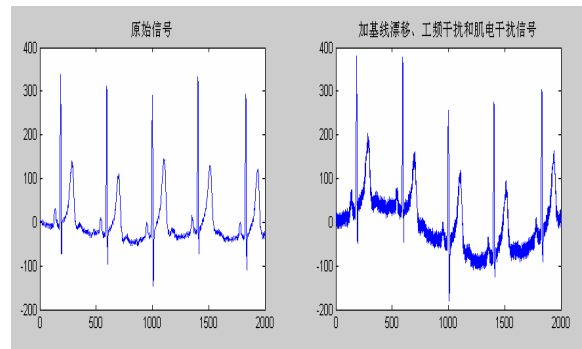


图 1 原始心电信号和加噪信号

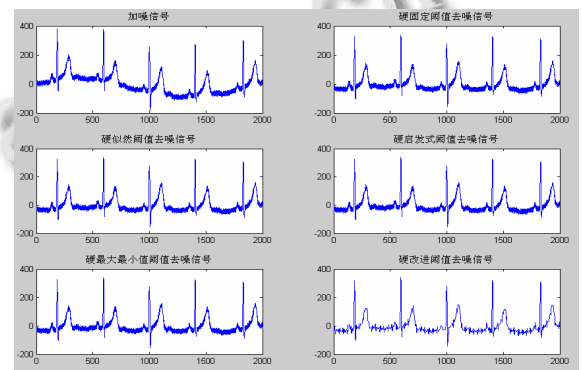


图 2 不同阈值函数硬阈值处理后的心电信号

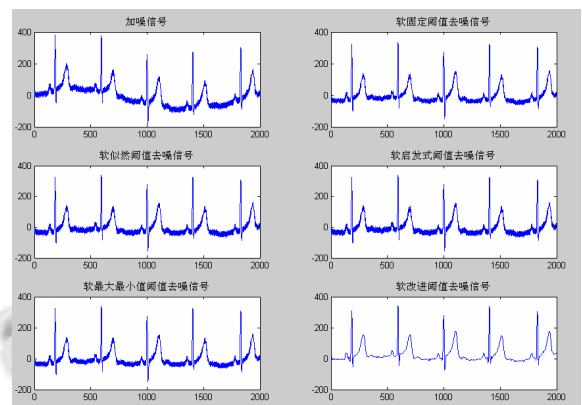


图 3 不同阈值函数软阈值处理后的心电信号

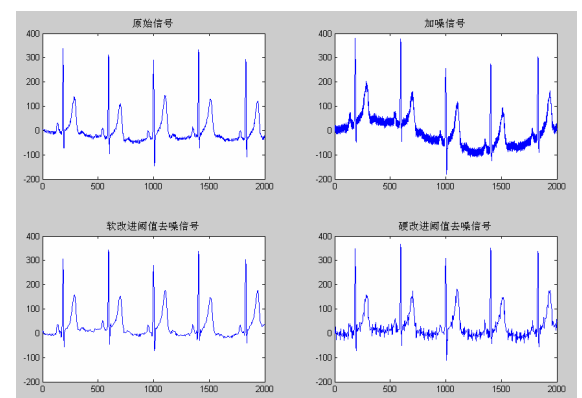


图 4 改进阈值函数软、硬阈值处理后的心电信号

表 2 不同阈值函数去噪后的 SNR 和 MSE

处 理 方 法	评 价 依 据	阈 值 函 数				
		固 定 阈 值	stein 无偏似 然估计阈值	启发式 阈 值	极大极 小阈值	改进 阈 值
硬 阈 值	S N R	72.0181	82.5166	82.5166	74.1395	83.0985
	M S E	11.2671	11.3193	11.3193	11.3036	8.8748
软 阈 值	S N R	79.8636	73.5837	73.5837	88.5789	89.8234
	M S E	9.3826	11.2646	11.2646	10.1489	6.3935

由图 1~4 和表 2 可知, 采用改进阈值函数软阈值去噪算法去噪效果较好, 有效地去除了含噪信号中混有的基线漂移、工频干扰、肌电干扰, 并且心电波形畸变较少、光滑性较好, 较好地保留了心电信号中有用成分。

### 3 结语

本文给出了一种基于小波阈值的心电信号去噪算法, 并对不同的阈值函数分别进行了硬阈值和软阈值的去噪处理, 提出了改进的阈值函数, 从 Matlab 仿真结

果可以清楚的看出, 改进小波阈值的软阈值去噪算法去噪效果较好, 能够较好地去除心电信号中混杂的基线漂移、工频干扰和肌电干扰, 并较好地保留了心电信号中有用信息, 有利于进一步的波形识别和特征提取。

### 参考文献

- 1 赵晴,赵捷,魏珑.基于小波变换的心电信号去噪算法.现代生物医学进展,2007,7(10):1566-1568.
- 2 王佳文,凡友华.心电信号去噪中的小波方法.数理医药学杂志,2009,22(1):85-89.
- 3 马文.基于小波变换的心电信号去噪研究[硕士学位论文].兰州:兰州大学,2009.
- 4 潘泉,孟晋丽,张磊,程咏梅,张洪才.小波滤波方法及应用.电子与信息学报,2007,29(1):236-242.
- 5 文莉,刘正士,葛运建.小波去噪的几种方法.合肥工业大学学报(自然科学版),2002,25(2):167-172.
- 6 潘磊,张军,邹采荣.基于小波变换的一种心电信号去噪算法.科技资讯,2006(36):53-54.
- 7 宋喜国,邓亲恺.MIT-BIH 心率失常数据库的识读及应用.中国医学物理学杂志,2004,21(4):230-232.
- 8 Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. IEEE Transactions on Information Theory,1990:961-1005.
- 9 Alfaouri M, Daqrouq K. ECG Signal Denoising By Wavelet Transform Thresholding. American Journal of Applicable Sciences, 2008, 5(3):276-281.

(上接第 220 页)

- 12 李道清,任玉珑,胡大江,朱丽娜.基于虚拟变量法的我国交通能源消费量预测.科技管理研究,2005,11:139-141.
- 13 刘中学,张毅.包含虚拟变量的澳门酒店入住率预测模型及实证.统计与决策,2007,(20):98-100.
- 14 据亮,贺昌政,何跃.四川省六大城市资产负债率预测研究.经济研究,2010,11:37-38.
- 15 Harvey AC. The Econometric Analysis of Time Series. The MIT Press, 1991:79-95.
- 16 易丹辉.数据分析与 Eviews 应用.北京:中国人民大学出版社,2008.101-120.

- 17 谢星峰,谢东风,邹平.基于 CBP 的卷烟销售二重趋势时间序列预测模型研究与应用.控制理论与应用,2007,24(6):1015-1020.
- 18 师彦锋.基于两种组合模型的安全市卷烟预测思想与运用研究.经济师,2010,9:231-233.
- 19 尚红云.税收收入模型预测精度的比较.统计与决策,2008,3:40-43.
- 20 庞晓波,孙叶萌,王晨.基于 ANN 方法对汇率波动非线性的检验与预测比较.吉林大学社会科学学报,2008,48(1):76-81.