

文章编号: 1672-2892(2010)03-0286-04

心电信号降噪小波函数选取的定量研究

何俊^{1a}, 马有良^{1b}

(1.西南科技大学 a.信息工程学院; b.制造工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 为了定量地评估不同小波函数对心电(ECG)信号的降噪效果, 建立了含噪声的 ECG 模型作为实验标准信号, 采用正交小波变换和不同阈值方法来对该标准信号进行高频噪声消除实验, 通过信噪比参数结合波形形态来衡量降噪效果。实验表明, 当降噪后信噪比接近标准信号信噪比时, 降噪效果最佳, 得到既能保证信号失真度小又具有较高信噪比的降噪方案和适用于 ECG 信号小波分解和重构的小波函数, 最后通过 MIT-BIH 数据库数据验证了利用该研究结果能够有效地消除 ECG 信号中的高频噪声。

关键词: 小波函数; 心电信号; 高频噪声; 定量研究

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

Quantitative study on the selection of wavelet functions for the de-noising of ECG signal

HE Jun^{1a}, MA You-liang^{1b}

(1a.College of Information Engineering; 1b.College of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

Abstract: To quantitatively evaluate the de-noising effects of different wavelet functions on the electrocardiogram(ECG) signal, a noisy ECG model was constructed as an experimental standard signal, which was processed by orthogonal wavelet transform and different thresholding methods to remove high-frequency noise. The de-noising effects were measured by Signal to Noise Ratio(SNR) and the shape of waveforms. It was demonstrated that when the SNR after denoising approached to that of the standard signal, the de-noising effect was optimal. Thus, the de-noising schemes with the less signal distortion and the higher SNR were obtained. Meanwhile, the wavelet function appropriate for the decomposition and reconstruction of ECG signal was determined. Verified by MIT-BIH database, the results of this study can effectively remove high-frequency noise in ECG signal.

Key words: wavelet function; electrocardiogram signal; high-frequency noise; quantitative study

心电(ECG)信号噪声的消除是基于滤波器的思想进行的, Thakor 等人于 1984 年分析了 ECG 信号噪声的频谱特性, 设计了硬件巴特沃斯带通滤波器滤除噪声。为了避开运动伪迹和工频干扰, 大多数研究者采用 5 Hz~35 Hz 的带通滤波器, 但是这种滤波器只考虑了 ECG 信号频谱特性的平均分布, 无法对个体差异作出调整。目前很多学者利用小波变换来实现 ECG 信号的基线、工频和肌电噪声的消除, V Cherkassky 等人将小波软、硬阈值方法应用在 ECG 信号降噪中并进行了比较^[1], 很多学者基于小波变换理论提出了 ECG 信号的降噪和压缩算法^[2-3]。但是无论小波函数构建得如何完美, 它总是一个人为引入的因子, 小波函数选择不当, 会令信号产生信息的流失和失真, 一个小波函数是否适合 ECG 信号噪声的消除, 仅仅从波形特征上来看是不够的, 还需要定量地分析经过小波分解和重构后噪声和有用信号成分含量的变化, 从而判断该小波函数选取以及相应的阈值方法是否最优。本文建立了含噪声的 ECG 信号模型, 对 ECG 信号噪声消除中小波函数选取定量分析进行了探索。

1 含噪声 ECG 信号模型的实现

根据生理学中正常心脏电生理参数,建立无噪声的 ECG 信号模型。根据常规 ECG 信号的特征,用三角形脉冲模拟 R 波、Q 波和 S 波,用正弦信号模拟 P 波和 T 波,得到模拟 ECG 信号,其中模型参数为: P 波宽度为 0.1 s,幅度为 0.2 mV; R 波宽度为 0.04 s,幅度为 1.8 mV; T 波宽度为 0.15 s,幅度为 0.3 mV; Q 波宽度为 0.02 s,幅度为-0.1 mV; S 波宽度为 0.04 s,幅度为-0.2 mV; P-R 间期为 0.14 s; Q-T 间期为 0.35 s; R-R 间期为 0.8 s; 采样率为 360 Hz。

采用 MIT-BIH 数据库 203 号和 105 号等多条含噪声较多的信号,用 db3 小波进行 5 尺度的细节分解,将第 1,2,3 尺度小波系数和第 4 尺度的小波系数的 20%幅值进行叠加,并添加高斯白噪声一起作为模拟的心电噪声,将噪声和模拟 ECG 信号叠加,得到含噪声的 ECG 信号模型,见图 1。

定义信噪比为:

$$R_{SN} = 10 \times \lg \frac{P(S)}{P(N)} \quad (1)$$

式中: $P(S)$ 是无噪声 ECG 信号的能量; $P(N)$ 是添加的噪声的能量。通过计算,含噪声 ECG 信号模型的信噪比为 15.745 7 dB。

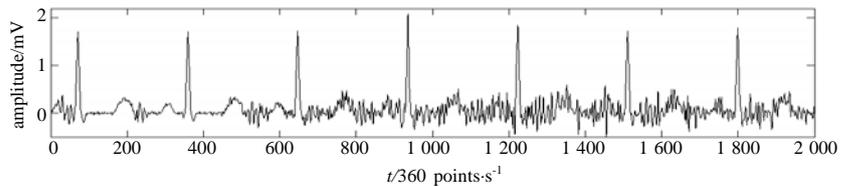


Fig.1 Simulated ECG signal model overlapped with noise components
图 1 叠加噪声成分的模拟 ECG 信号模型

2 小波函数选取实验

在选择合适的小波函数时,考虑以下 2 个问题: 1) 选最小的可以得到满意结果的小波滤波器长度,长度小的小波滤波器,如滤波器长度为 2,4,6,有时会在分析结果中引入不希望的人工痕迹,如对 ECG 信号利用 Haar, Daubechies, Coiflet 小波进行多分辨率分析,会产生不真实的块状、鲨鱼鳍状和三角状的失真,而长度太大会导致更多的小波系数被边界所影响; 2) 使小波滤波器和尺度滤波器的相位更接近线性相位^[4]。因此选用近似对称的正交或双正交小波函数来进行实验,选取 3 种小波函数来进行对比实验: Symlet 小波、Coiflet 小波和 Biorthogonal 双正交小波^[5]。

Symlet 小波函数是近似对称正交小波函数,在时域上有限支撑,是对 Daubechies 小波的改进,在频域上有很好的局部性,重构信号相位比较准确; Coiflet 小波函数支撑长度为 $6N-1$,具有近似对称性,因为它具有很好的正则性,因此在频域方面具有较好的局部性; Biorthogonal 小波是一种双正交小波,解决了小波函数对称性和精确信号重构的不相容性,对偶的 2 个小波分别用于信号的分解和重构,它的主要特征体现在具有线性相位性。

2.1 阈值选取及调整方式实验

对含噪声 ECG 信号模型分别采用 Sym3 小波、Coif4 小波和 Bior2.2 双正交小波进行四尺度^[6]的多分辨率分解与重构。对 rigrsure 阈值、sqtwolog 阈值、heursure 阈值和 minimaxi 阈值及其调整方式分别进行实验^[7-8],计算信噪比参数和分析波形形态,当 R_{SN} 大于标准信号 R_{SN} 时,波形中含噪声成分多,波形中仍然有很多的毛刺,见图 2(a); 当 R_{SN} 小于标准信号 R_{SN} 时,波形噪声成分很少,但波形失真较大,见图 2(b); R_{SN} 趋近于标准信号 R_{SN} 时,波形中毛

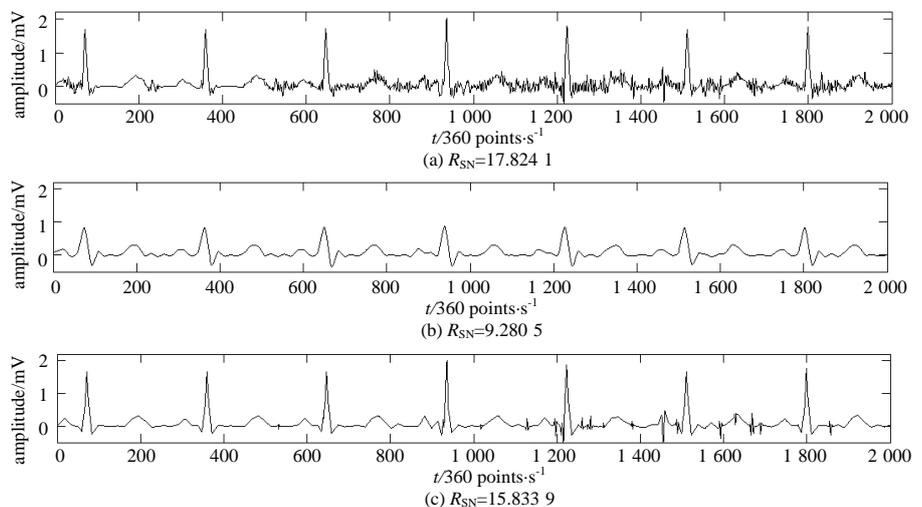


Fig.2 De-noising effects of simulated noisy ECG signal corresponding to different R_{SN} parameters
图 2 含噪声模拟心电图信号对应不同 R_{SN} 参数的降噪效果

刺成分少, 波形失真小, 见图 2(c), 但不排除毛刺成分少但波形失真大的情形。

综合考虑降噪后信号波形的失真和 R_{SN} 参数, 以下方法能得到较好的波形形态和较高的信噪比阈值:

- 1) 采用 sqtwolog 阈值进行硬阈值调整, 并且进行全局阈值调整;
- 2) 采用 heursure 阈值进行软阈值调整, 并且进行全局阈值调整;
- 3) 采用 minimaxi 阈值进行软阈值调整, 并且进行全局阈值调整。

2.2 小波函数选取定量实验

将 Symlet 小波、Coiflet 小波和 Biorthogonal 双正交小波对含噪声 ECG 信号模型采用 sqtwolog 阈值进行硬阈值调整, 并且采用全局阈值调整方式来进行降噪对比实验, 实验测得 R_{SN} 参数如表 1, 根据实验数据分析得到:

1) 从 R_{SN} 参数来看, 采用 Sym3, Sym4, Sym6, Sym7, Coif3, Bior2.2, Bior2.8 和 Bior6.8 小波函数并选用 sqtwolog 阈值进行硬阈值调整, 且进行全局阈值调整的方式得到降噪后信号的信噪比趋近于标准 ECG 信号的信噪比。

2) 从波形形态上来看, 当小波函数的长度较小时, 重构波形出现了明显的形状失真, 随着小波函数的长度增加, 重构波形逐渐平滑, 但同时由于数据冗余造成重构波形出现较多的微小波动成分, 使信号产生失真。

3) 利用 Sym3 小波降噪后信号的信噪比接近于含噪声 ECG 信号模型的 R_{SN} , 但是波形比较生硬, 平滑度比较差, Sym4 小波情况类似; Sym6, Sym7 和 Bior6.8 小波降噪后生成原本不存在的生硬的小尖峰; Bior2.8 小波降噪后出现了严重的信号失真; Coif3 小波分解时由于数据冗余的因素虽然出现了微小的波动, 但是信号重构后较平滑, 尤其是通过 heursure 阈值进行软阈值调整, 见图 3(a); 采用 sqtwolog 阈值进行硬阈值调整时 Bior2.2 小波降噪的效果较好, 见图 3(b)。

选取 MIT-BIH 心律不齐数据库中的数据, 采用 Bior2.2 小波, 用 sqtwolog 阈值进行硬阈值全局调整, 结果见图 4, 可以看出去除高频噪声效果良好。

3 结论

通过构造了含噪声 ECG 信号模型, 对小波变换在 ECG 信号噪声消除中小波函数的选择进行了定量实验, 实验证明, 当降噪后信噪比参数接近模拟信号模型的信噪比 15.745 7 时, 降噪效果较好, 结合消噪后 ECG 信号的波形形态, 采用 Bior2.2 小波利用 sqtwolog 阈值进行硬阈值全局调整和采用 Coif3 小波利用 heursure 阈值进行软阈值全局调整这 2 个

表 1 不同小波函数降噪对比实验 R_{SN} 参数值
Table 1 R_{SN} parameters of the different comparing experiments for wavelet de-noising

wavelet	R_{SN}	wavelet	R_{SN}
Bior1.1	16.172 4	Sym2	15.706 3
Bior1.3	16.523 5	Sym3	15.775 6
Bior1.5	16.825 9	Sym4	15.874 8
Bior2.2	15.833 9	Sym5	15.996 1
Bior2.4	14.534 7	Sym6	15.824 4
Bior2.6	16.430 6	Sym7	15.871 7
Bior2.8	15.826 0	Sym8	16.092 1
Bior3.1	19.823 8	Coif1	15.983 5
Bior3.3	18.767 3	Coif2	16.257 4
Bior3.5	16.485 7	Coif3	15.866 9
Bior3.7	15.051 3	Coif4	16.194 5
Bior3.9	17.351 8	Coif5	15.948 8
Bior4.4	15.578 8		
Bior5.5	16.052 7		
Bior6.8	15.618 2		

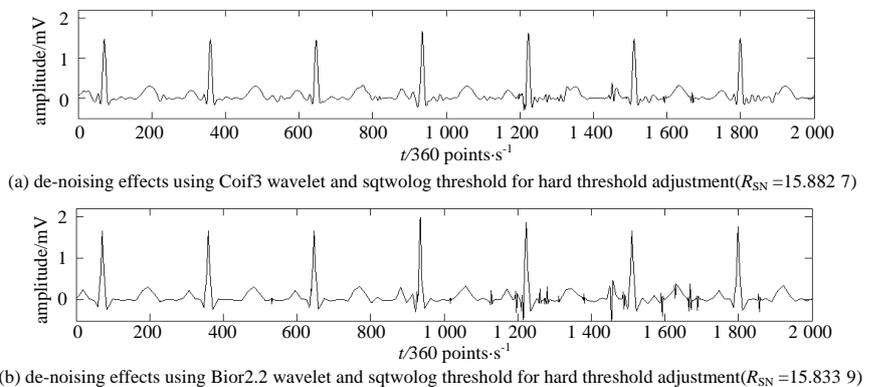


Fig.3 De-noising effects using Coif3 wavelet and Bior2.2 wavelet

图 3 采用 Coif3 小波和 Bior2.2 小波的降噪效果图

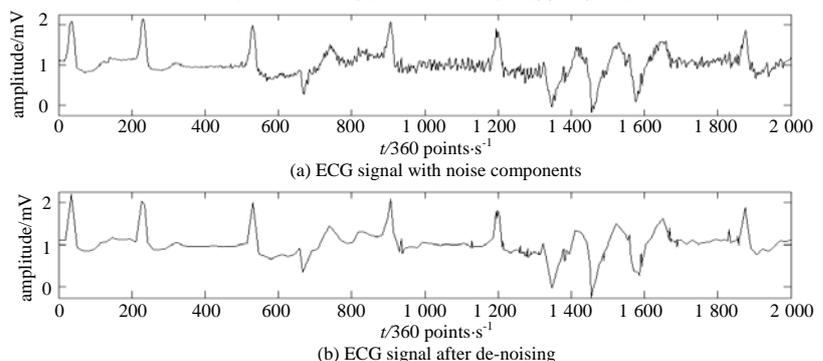


Fig.4 De-noising effects using Bior2.2 wavelet with sqtwolog hard threshold adjustment and global threshold adjustment

图 4 采用 Bior2.2 小波用 sqtwolog 阈值进行硬阈值全局调整方案降噪效果图

方案能得到良好的高频噪声消除效果,对小波变换用于 ECG 信号高频噪声消除和信号压缩具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Cherkassky V, Kilts S. Comparison of Wavelet Thresholding Methods for Denoising ECG Signals[M]// Lecture Notes in Computer Science. London:Springer-Verlag, 2001,2130:625-629.
- [2] 石为人,罗雪松,胡宁. 基于小波多分辨率分析的信号消噪[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2002,25(6):59-62. (SHI Weiren, Luo Xuesong, Hu Ning. Wavelet-Based Multiresolution Analysis to Noise Elimination[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002,25(6):59-62.)
- [3] 王和平,康景利. 一种基于小波模极大值的信号去噪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2005,27(11):1876-1877. (Wang Heping, Kang Jingli. De-noising method based on wavelet transform modulus maximum[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005,27(11):1876-1877.)
- [4] Donald B Percival, Andrew T Walden. 时间序列分析的小波方法[M]. 程正兴,王郑耀,全黎,译. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [5] 高峰,曲建岭,周玉平. 不同小波基下滤波性能之比较[J]. 仪器仪表学报, 2002,23(4):437-440. (Gao Feng, Qu Jianling, Zhou Yuping. The Comparison of Different Wavelet bases on Filtering[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002,23(4):437-440.)
- [6] 王维,张英堂,任国全. 小波阈值降噪算法中最优分解层数的自适应确定及仿真[J]. 仪器仪表学报, 2009,30(3):526-530. (Wang Wei, Zhang Yingtang, Ren Guoquan. Adaptive selection and simulation of optimal decomposition level in threshold de-noising algorithm based on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009,30(3):526-530.)
- [7] 吴伟,蔡培升. 基于 MATLAB 的小波去噪仿真[J]. 信息与电子工程, 2008,6(3):220-222. (Wu Wei, Cai Peisheng. Simulation of Wavelet De-noising Based on MATLAB[J]. Information and Electronic Engineering, 2008,6(3):220-222.)
- [8] 李海东,李青. 基于阈值法的小波去噪算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2009,19(7):56-58. (Li Haidong, Li Qing. Wavelet Denoising Based on Technique of Threshold[J]. Computer Technology and Development, 2009,19(7):56-58.)

作者简介:



何俊(1974-),女,四川省绵阳市人,硕士,讲师,主要研究方向为信号检测与处理.email: hejun@swust.edu.cn.

马有良(1964-),男,四川省绵阳市人,学士,副教授,主要研究方向机电一体化.