

基于小波包变换的心电图 ST 段提取

白鹏飞¹, 王利², 易子川¹, 周震³(1.华南师范大学华南先进光电子研究院, 广东 广州 510006; 2.华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006; 3.中国电子科技集团公司第七研究所, 广东 广州 510006)

摘要:目的: ST段是心电图的重要组成部分,其起始于心电图QRS波群的结束点并结束于T波的开始点。ST段的压低、分上斜形和下垂形压低、水平压低和以及鱼钩样改变都可以反映各种心脏疾病,所以,精确提取心电图ST段具有重要意义。因此,本文提出了基于小波包变换的心电图ST段精确提取算法。方法:首先对心电图信号进行去噪处理,滤去工频干扰信号以及基线漂移信号;然后,提取单周期的心电图信号;最后,引入小波包变换算法提取QRS波群、T波的主频带,重构QRS波群、T波的波形并确定ST段的始末位置。结果:本文算法在时域心电图上实现了ST的精确定位,提取了心电图的ST段。通过在经典数据库中的验证,本文算法具有非常好的表现。结论:实验结果表明,相较传统的对心电图加时间窗的方式提取ST段,本文算法可以精确提取心电图ST段,这为心电图ST段的自动精确识别,以及用于自动医疗检测与便携式医疗设备提供了依据。

关键词:小波包变换;心电图(ECG);ST段;QRS波群;T波

DOI 编码: doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2013.01.014

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1005-202X(2013)01-3894-04

Electrocardiogram ST-Segment Extraction Based on Wavelet Packet Transform

BAI Peng-fei¹, WANG Li², YI Zi-chuan¹, ZHOU Zhen³

(1.South China Academy Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou Guangdong 510006, China; 2.School of Physics & Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou Guangdong 510006, China; 3.The Seventh Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Guangzhou Guangdong 510320, China)

Abstract: Objective: ST-segment is an important part in ECGs, it starts at the end point of QRS wave group and ends at the beginning of T wave. ST-segment depression, upward diagonal and drop shaped depression, level down and hook like changes can reflect various heart diseases. Therefore, the accurate extraction of ECG ST-segment is very important. So, an extraction method of the ST-segment, which is based on the wavelet packet transform, is proposed in this paper. **Methods:** Firstly, the interference signal of ECGs is eliminated, the power-line interference and baseline drift signal are filtered. The single cycle of ECG signal is then extracted. Finally, the wavelet packet transform algorithm is introduced to extract the QRS wave group and the T wave. The QRS wave and T wave are reconstructed, and ST-segment is determined by the time location. **Results:** The location of ST-segment in the time domain is realized by the proposed algorithm, and the ST-segment is extracted from the ECG. The proposed algorithm has a good performance by validation from classical ECG database. **Conclusions:** The experimental results show that, compared with the traditional ST extraction method which is based on time windows, the proposed algorithm can precisely extract the ST-segment. This provides a solid basis for the ST-segment automatic identification, as well as the automatic detection of medical treatment and the portable medical devices.

Key words: wavelet packet transform; electrocardiogram (ECG); ST segment; QRS wave; T wave

前言

ECG是从人体体表采集的反映心脏心动的电位信号,人体的生理条件变化使得ECG具有许多疾病特征^[1]。单导联ECG可以方便地从手指中获取,测量方法简便,采集装置的成本低,在便携式医疗设备中具有一定的应用前景。ST段是ECG的重要组成部分

收稿日期:2012-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51146010)和广东省自然科学基金项目(No. S2011040003189)

作者简介:白鹏飞(1977-),男,博士,E-mail: baipf@sncu.edu.cn。

通讯作者:王利(1985-),女,硕士研究生,研究方向:图像处理,E-mail: creekxi@163.com。

分,心肌梗死、心肌缺血等疾病都能够引起 ST 段异常^[2]。对于相关疾病的检测和诊断,精确提取心电图的 ST 段具有重要意义。

目前,已有一些学者在 ECG 各个波形的提取方面做了一些研究。Arif Muhammad 等^[3]利用对心电图施加固定时间窗的方法提取 ST 段,当心率变化时,显然这种提取方法不够精确。Jeong Gu-Young 等^[4]利用形态学分析 ECG 中 ST 段的变化,并以此来检测一些疾病,但是,文中并没有精确提取 ST 段。曹细武等^[5]分析了心电图各波的频率分布,但是对心电图各波的时域区间并没有加以界定。小波分析为 ECG 提供了精细的分析方法^[6],其能够充分挖掘数据的频域特征。本文采用 PTB Diagnostic ECG 数据库中的导联信号。文中首先引入小波包算法对信号进行滤波,然后通过提取单周期 ECG 的 QRS 波群以及 T 波所处的频率范围的波形,确定单周期 ECG 的 ST 段的边界并提取 ST 段,实验结果表明本文的算法能够精确提取 ST 段,这为 ECG 的 ST 段在医疗上的应用提供了重要依据。

1 小波包分解原理

小波包分析为信号提供了一种更加精细的分析方法,它将频带进行多层次划分,对多分辨分析没有细分的高频部分进一步分解,并能够根据被分析的信号的特征,自适应的选择相应频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高时频分辨率。db 小波是由法国学者 Inrid Daubechies 构造的小波函数,dbN 中的 N 代表小波的阶数。db 小波一般是通过正交尺度函数 $\phi(t)$ 加权组合来得到的,式(1)为其二尺度差分方程:

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_0(k) \phi(2t-k) \quad (1)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_1(k) \phi(2t-k)$$

式中: $h_1(k) = (-1)^k h_0(1-k)$

小波包是包括尺度函数和小波母函数在内的一个具有一定联系的函数的集合。任一正整数都可用式(2)表示:

$$n = \sum_{i=1}^{\infty} \varepsilon_i 2^{i-1}, \quad \varepsilon_i = 0, 1 \quad (2)$$

小波包可以表示为式(3)、式(4):

$$W_n(\omega) = \prod_{i=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_0(k) e^{-jk\omega} \right\} \left(\frac{\omega}{2} \right), \quad \varepsilon_i = 0 \quad (3)$$

$$W_n(\omega) = \prod_{i=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_1(k) e^{-jk\omega} \right\} \left(\frac{\omega}{2} \right), \quad \varepsilon_i = 1 \quad (4)$$

表 1 小波包分解示意图

Tab.1 Schematic diagram of wavelet packet decomposition

(0,0)							
(1,0)				(1,1)			
(2,0)	(2,1)	(2,3)	(2,4)				
(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)	(3,6)	(3,7)
.....							

在结点 $(j+1,p)$ 处的小波包系数由式(5)给出:

$$d_{j+1}^{2p}(k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_j^p(m) h_0(m-2k) \quad (5)$$

$$d_{j+1}^{2p+1}(k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_j^p(m) h_1(m-2k)$$

在表 1 中, (j,p) 表示第 j 层的第 p 个结点,其中 $j=0,1,2,3; p=0,1, \dots, 7$ 每个结点都代表信号一个特定频带的特征。其中, $(0,0)$ 结点代表原始信号, $(1,0)$ 代表小波包分解的第一层低频系数 X_{10} , $(1,1)$ 代表小波包分解第一层的高频系数 X_{11} , $(2,0)$ 表示第二层第 0 个结点的系数,依次类推。

对小波包分解系数重构,提取各个频带范围的信号。在结点 (j,p) 处的小波包系数重构算法如式(6):

$$d_j^p(k) = D_{j+1}^{2p}(k) * h_0(k) + D_{j+1}^{2p+1}(k) * h_1(k) \quad (6)$$

$D_{j+1}^{2p}(k)$ 和 $D_{j+1}^{2p+1}(k)$ 分别是 $d_{j+1}^{2p}(k)$ 和 $d_{j+1}^{2p+1}(k)$ 每两个

点插入零后所得的序列。以 S_{n0} 表示 X_{n0} 的重构信号, S_{n1} 表示 X_{n1} 的重构信号, S_{n2} 表示 X_{n2} 的重构信号,等等。对于第 n 层的所有结点,总的信号 S 可以表示为:

$$S = \sum_{i=0}^{2^n-1} S_{ni} \quad (7)$$

对于一个采样频率为 m Hz 的样本信号, $S_{n0}, S_{n1}, \dots, S_{n(2^n-1)}$ 对应的频带为: $0 \text{ Hz} \sim \frac{m/2}{2^n} \text{ Hz}, \frac{m/2}{2^n} \text{ Hz} \sim$

$\frac{m/2}{2^{n-1}} \text{ Hz}, \dots, \frac{m(2^n-1)}{2^{n+1}} \text{ Hz} \sim \frac{m}{2} \text{ Hz}$ 。

2 结果与分析

2.1 ECG 信号的预处理

本文 ECG 数据来源于 PTB Diagnostic ECG Database,信号的采样频率为 1000 Hz。数据库中从人体采集的信号微弱、信噪比小,经过硬件电路的放大滤波后常常伴随着一些干扰,这些干扰包括来自自身的呼吸引起的基线漂移,来自电源网络及其设备生产的空间磁场作用于导联线与人体之间的环形电路所致的 60 Hz 工频干扰。本文引入小波包算法将 ECG 导联 I 信号进行 12 层小波包分解,小波包基为 db4,

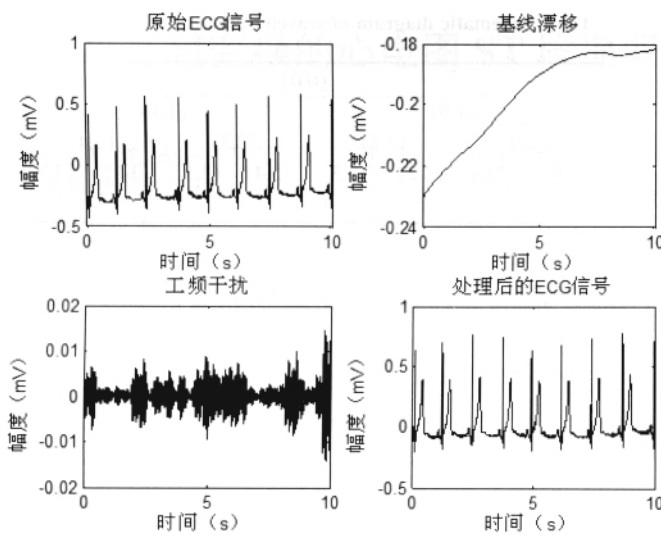


图1 ECG信号的预处理

Fig.1 The preprocessing of an ECG signal

结点(12,0)对应的是基线漂移信号,结点(12,490)、(12,491)、(12,492)对应的是60 Hz的工频干扰信号。重构基线漂移以及工频干扰所对应的结点信号,并从原始信号中提取出来,这就对ECG信号达到了预处理的目的,从信号中提取出的噪声波形以及处理后的ECG的波形如图1所示。

2.2 ST段的提取

经过去噪处理后,心电图各波的形态非常清晰,根据波形特点可以轻易的截取单周期的心电信号。根据心电图的QRS波群、T波的频谱图可得,QRS波的带宽为0 Hz~38 Hz,积累了将近99%的能量,QRS波峰能量集中在8 Hz~16 Hz附近;T波带宽为0 Hz~8 Hz,波峰能量集中在1 Hz~8 Hz的频率范围内^[5]。对单周期的ECG信号进行9层小波包分解,根据心电图的特点,小波包基选取为db4小波。每个结点对应的频率范围约为1 Hz,所以,结点(9,8)、(9,9)、……、(9,16)对应的频率范围是QRS波群能量集中的频率范围,而结点(9,1)、(9,2)、……、(9,8)对应的频率范围是T波能量集中的频率范围。对上述结点的小波包系数进行重构,并提取8 Hz~16 Hz、1 Hz~8 Hz频率范围的信号,这两个频率范围的信号就是QRS波群、T波的能量集中的频带。本文中,带宽为8 Hz~16 Hz的波形反应了QRS波群的主要波动情况,将其中R波峰后的第一个波谷作为ST段的起点;带宽为1 Hz~8 Hz的波形反应了T波的波动情况,将T波波峰前的第一个极小值点作为ST段的结束点。图2为ECG导联中的ST段的截取示意图,从图中可以看出,本文的方法精确的定位了ST的起始位置。

3 结论

本文提出了一种基于小波包分析的心电图ST段

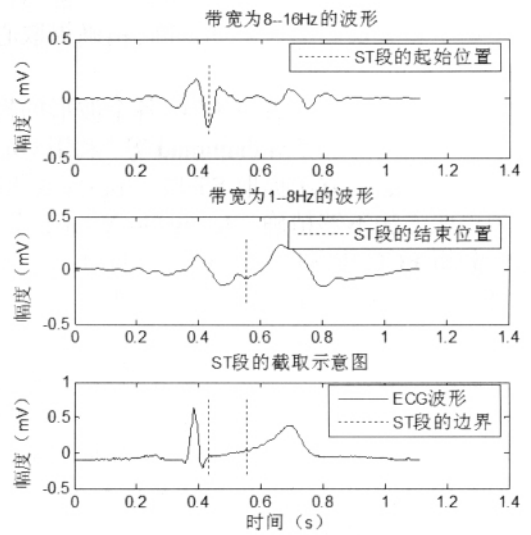


图2 ST段的截取

Fig.2 The extraction of ST segment

的提取算法。文中首先运用db4小波对ECG信号进行12层小波包分解,得到多个子带的波形。在这些子带波形当中,一些波形的频带与干扰信号一致。因此,从原始信号中移除这些子带波形就可以实现滤波。然后,提取单周期的心电信号,对单周期信号进行9层小波包分解。提取心电图QRS波群以及T波所对应的主频带,重构两个主频带所对应的波形。以QRS波群的结束点作为ST段的起始点,以T波形的起始点作为ST段的结束点,并在ECG波形上实现了ST段的定位。实验结果表明本文算法实现了良好的ST段提取效果,由于ECG信号能够方便的从手指中获取,这种基于ECG单周期信号的ST段提取方法具备采样时间短、采样装置成本低、采样过程简易等优点。所以,在便携式心电监护系统中,本文算法具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] Saxena S C, Kumar V, Hamde S T. Feature extraction from ECG signals using wavelet transforms for disease diagnostics [J]. International journal of systems science, 2002,33 (13):1073-1085. Saxena S C, Kumar V, Hamde S T. 基于小波变换的心电图疾病诊断特征提取[J]. 系统科学杂志, 2002,33(13):1073-1085.
- [2] Jeong G Y, Yu K H. Design of ambulatory ECG monitoring system to detect ST pattern change [C]. SICE-ICASE International Joint Conference, 2006:2934-2938. Jeong G Y, Yu K H. 基于检测ST段变化的动态心电图监护系统设计[C]. SICE-ICASE 国际联合会议, 2006: 2934-2938.
- [3] Arif M, Malagore I A, Afsar F A. Automatic detection and localization of myocardial infarction using back propagation neural networks [C]. International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2010:4-8. Arif M, Malagore I A, Afsar F A. 利用反向传播神经网络自动检测和定位心肌梗死 [C]. 生物信息与生物医学工程国际会议, 2010:4-8.

- [4] Jeong G Y, Yoon M J, Yu K H, et al. Development of portable ECG measurement device and PC software for automatic ST analysis [C]. International Conference on Control, Automation and Systems, 2010: 1171-1174. Jeong G Y, Yoon M J, Yu K H, 等. 基于便携式心电图测量设备和电脑软件的 ST 段自动分析[C]. 控制、自动化以及系统国际会议, 2010:1171-1174.
- [5] 曹细武, 邓亲恺. 心电图各波的频率分析 [J]. 中国医学物理学杂志, 2001, 18(1): 46-48. Xiwu Cao, Qinkai Deng. Frequency analysis of the ECG waveform[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2001, 18(1): 46-48.
- [6] Antonini G, Orlandi A. Wavelet packet-based EMI signal processing and source identification [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001, 43 (2): 140-148. Antonini G, Orlandi A. 基于小波包变换的含噪信号处理与识别[J]. 电磁兼容性汇刊, 2001, 43 (2): 140-148.

(上接第 3876 页)

隐藏, 可实现对图像的加密和保密传输。

参考文献:

- [1] 刘玉红, 熊兴良, 王志芳, 王颖, 李虹, 李剑波, 谢正祥. 图像的带参二值化理论和技术及其应用[J]. 计算机应用研究. 2008, 25(1):277-280. Yuhong Liu, Xingliang Xiong, Zhifang Wang, Ying Wang, Hong Li, Jianbo Li, Zhengxiang Xie. Theories and techniques for bi-valuating image with parameters and their applications [J]. Application Research of Computers. 2008, 25(1):277-280.
- [2] PAN YF, HOU XW, LIN CL. A hybrid approach to detect and located texts in natural scene images [C]. IEEE Transactions on Image Processing. 2011, 20(3):800-813. PAN YF, HOU XW, LIN CL. 一种用于检测和定位自然图像中的文本信息的混合方法[C]. IEEE 图像处理论文集. 2011, 20(3):800-813.
- [3] KITA, K, WAKAHARA, T. Binarization of Color Characters in Scene Images Using k-means Clustering and Support Vector Machines[C]. Proceeding on 20th International Conference on Pattern Recognition. 23-26 Aug 2010, Istanbul, Turkey. [S.I.]:The International Association for Pattern Recognition, 2010: 3183-3186. KITA, K, WAKAHARA, T. 二值化色彩的人物场景图像中使用 k-均值聚类[C]. 第 20 届国际模式识别会议论文集. 土耳其, 伊斯坦布尔. [S.I.]: 国际模式识别协会, 2010: 3183-3186.
- [4] KURMA M, KIM YC, LEE GS. Text detection using multilayer separation in real scene image [C]. Proceedings of 13th IEEE International Conference on Computer and Information Technology. Dhaka, Bangladesh. [S.I.]: Institute of Computer and Information technology. 2010 :1413-1417. KURMA M, KIM YC, LEE GS. 真实场景中使用多层分离的文本识别方法[C]. 第 13 届 IEEE 计算机信息技术国际年会. 达卡, 孟加拉[S.I.]: 计算机信息技术协会. 2010 :1413-1417.
- [5] Lu ZhaoJin, Han Yan. Research on Auto-Registration Technique of License Plate based on OTSU Approach [J]. Computer Development & Application. 2006, 19(5):2-4. Lu ZhaoJin, Han Yan. 基于大津算法的车牌自动识别技术[J]. 电脑开发与运用. 2006, 19(5):2-4.
- [6] Chun-Ming Tsai and Hsi-Jian Lee. Binarization of color document images via luminance and saturation color features [J]. IEEE transactions on image processing, 2002, 11(4): 434-451. Chun-Ming Tsai and Hsi-Jian Lee. 基于亮度和色彩饱和度特征的二值化彩色文档图像[J]. IEEE 图像处理汇刊, 2002, 11(4): 434-451.
- [7] 谢正祥, 王志芳, 刘燕欢, 刘玉红, 王颖, 李虹. 灰度谱分级平坦化理论[J]. 中国医学物理学杂志. 2006, 23(6): 405-407, 426. Zhengxiang Xie, Zhifang Wang, Yanhuan Liu, Yuhong Liu, Ying Wang, Hong Li. The Theory of Gradually Flattening Gray Spectrum[J]. Chinese Journal of Medical Physics. 2006, 23(6): 405-407, 426.
- [8] 谢正祥, 王志芳, 刘玉红, 熊兴良. 用于底层挖掘的图像灰度/色度信息的高分辨检测方法 [P]. 中国发明专利. ZL 200610054324.9. 2009. Zhengxiang Xie, Zhifang Wang, Yuhong Liu, Xingliang Xiong. High resolution detection method of image gray/ chroma information for lower mining. [P]. Chinese invention patent. ZL 200610054324.9. 2009.
- [9] KAROU I, CHAURIS H, GARREAU P, CRANEGUY P. Multi-resolution eddy detection from ocean color and Sea Surface Temperature images[C] OCEANS 2010 IEEE. Sydney, New South Wales. [S.I.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2010:1-6. KAROU I, CHAURIS H, GARREAU P, CRANEGUY P. 基于海洋颜色和海面温度图像的多分辨率涡流检测. 2010 IEEE 海洋. 悉尼, 新南威尔士州. [S.I.]: 电气和电子工程协会. 2010:1-6.
- [10] 谢正祥, 王颖, 彭子苡, 王志芳, 刘玉红, 李虹. 基于 Zadeh-X 变换的图像隐藏和挖掘技术 [J]. 中国医学物理学杂志, 2007, 24 (1):9-11. Zhengxiang Xie, Ying Wang, Ziyi Peng, Zhifang Wang, Yuhong Liu, Hong Li. The Image Hiding and Mining Technique Based on the Zadeh-X Transformation [J]. Chinese Journal of Medical Physics. 2007, 24(1):9-11.
- [11] 谢正祥, 王志芳, 熊兴良, 胡琴. 基于视觉感知噪声模型的彩色图像质量评价和彩色图像质量最佳化 [J]. 中国图象图形学报, 2010, 15 (10): 1454-1464. Zhengxiang Xie, Zhifang Wang, Xingliang Xiong, Qin Hu. Color image quality assessment based on noise model of human vision perception and color image quality optimization [J]. Journal of image and graphics. , 2010, 15(10): 1454-1464.
- [12] <http://cq.qq.com/a/20100713/000149.html>
- [13] <http://bbs.news.163.com/bbs/photo/219818384.html>.
- [14] 王志芳, 刘玉红, 王颖, 李虹, 李章勇, 赵志强, 谢正祥, 等. 基于数字图像处理的人类视觉对比度分辨率限制测定[J]. 生物医学工程学杂志, 2008, 25 (5):998-1002. Zhifang Wang, Yuhong Liu, Ying Wang, Hong Li, Zhangyong Li, Zhiqiang Zhao, Zhengxiang Xie. Measuring the Contrast Resolution Limits of Human Vision Based on the Modern Digital Image Processing[J]. Journal of biomedical engineering. 2008, 25(5): 998-1002.