

一种光电容积脉搏信号的峰值点自动识别方法

李肃义¹, 徐 壮¹, 熊文激², 蒋善庆¹, 吴 疆^{1*}

1. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130026

2. 吉林大学第一医院, 吉林 长春 130021

摘 要 光电容积脉搏信号的峰值点自动识别直接关系到无创血氧饱和度测量与脉搏波峰-峰间期提取的准确率。提出一种小波联合识别方法: 基于小波多分辨率分析原理校正影响脉搏波峰值点幅值的基线干扰, 再利用二次样条小波模极大算法自动识别峰值点。将该方法应用到自行研制的光电容积脉搏波测量系统中, 对采集的信号进行了校正与峰值点识别, 通过在信号中增加随机噪声以评价方法的稳定性与可靠性, 然后利用 10 组实测数据, 对比本方法与传统差分阈值法的峰值点识别准确率, 进一步评价方法的有效性。结果表明: 本方法在较好地消除了基线干扰的基础上, 在染噪的信号中仍然会较精确地检测出脉搏波主波峰, 具有较好的抗干扰能力, 有利于提高血氧饱和度检测及峰-峰间期提取的准确性, 从而有助于后期人体呼吸功能评价与心率变异性分析。

关键词 光电容积脉搏信号; 峰值点自动识别; 小波多分辨率分析; 二次样条小波模极大算法

中图分类号: R318.04 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)10-3145-05

引 言

基于光电容积脉搏波 (photoplethysmography, PPG) 的动脉血氧饱和度 (blood oxygen saturation, SpO_2) 监测, 通常采用指夹式光电传感器, 通过朗伯-比尔定律计算得到 SpO_2 , 可作为评估人体呼吸功能的重要技术手段。此外, 由于脉搏信号较心电信号易于获取, 近年来很多专家学者致力于研究基于心电信号 RR 间期 (RR interval) 的心率变异性 (heart rate variability, HRV) 分析与基于脉搏信号峰-峰间期 (PP interval) 的 HRV 分析的相关性与一致性, 研究均表明这两种方法高度相关, 替代具有可行性^[1-3]。因此, 测量 PPG 不仅可以得到 SpO_2 还可以得到基于 PPI 的 HRV 分析, 从而可以对人体呼吸及心脏自主神经调节功能进行评估。

PPG 信号微弱, 在体测量实施中不可避免地会受到高频噪声^[4]、运动伪差^[5]、基线漂移等^[6]多种噪声干扰影响。通常脉搏波的波峰点定位可以利用一阶导数或差分法定位局部极大值点来实现^[7-8], 但由于个体差异、残留的噪声等原因, 依然会导致一些峰值点错检或漏检。因此, 本文重点讨论影响峰值点幅值的低频噪声抑制以及提高峰值点定位准确率的方法。

利用小波多分辨率分析原理 (multi-resolution analysis, MRA) 可将信号逐级分解成不同频段的子信号^[9]。PPG 信号中基线漂移与运动伪差的能量大部分集中在高尺度小波分解的近似分量上, 因此, 可以根据 MRA, 利用小波多尺度分解后的高尺度近似分量来估计基线漂移与部分运动伪差。PPG 的峰值点识别可视为奇异点检测问题, 由于信号的奇异点与二次样条小波变换模极大值间存在一定关系^[10], 因此可利用脉搏主波峰能量集中的尺度上存在的模极大值来定位峰值点。

首先简要介绍自行研制的脉搏血氧饱和度检测装置以及采集的 PPG 原始信号, 然后讨论了小波联合识别方法设计的原理以及具体的实现步骤, 并将本方法应用在实测 PPG 信号上, 最终给出了校正及识别结果, 验证了方法的有效性。

1 实验部分

1.1 仪器设备及 PPG 信号采集

实验使用吉林大学自行研制的脉搏血氧饱和度检测装置来采集人体手指末端的 PPG 信号。图 1 为脉搏血氧饱和度检测装置框图。

收稿日期: 2016-09-20, 修订日期: 2017-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41674108), 吉林省自然科学基金项目 (20140101063JC), 吉林大学研究生创新基金项目 (2016211) 资助

作者简介: 李肃义, 女, 1972 年生, 吉林大学仪器科学与电气工程学院教授 e-mail: lsy@jlu.edu.cn

万方数据 e-mail: 183342462@qq.com

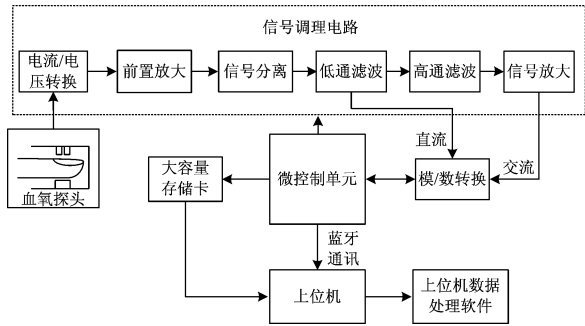


图 1 脉搏血氧饱和度检测装置框图

Fig. 1 The block diagram of pulse oxygen saturation detecting device

如图 1 所示，仪器工作时使用血氧探头来采集人体手指末端的 PPG，由于探头输出的是电流信号，且较为微弱，所以需要电流/电压转换、前置放大、信号分离、滤波等信号调理电路的处理、再经过模/数转换才可以由微控制单元采集 PPG 原始信号进行存储或经蓝牙无线发送到上位机进行处理。上位机软件主要负责读取数据、校正基线、定位峰值点，然后利用峰值点一方面可计算 SpO_2 ，另一方面可形成 PPI 序列，进而进行 HRV 分析。

图 2 为该装置采集的 10 s 的 PPG 原始信号，可见信号中的高频噪声在系统硬件滤波作用下较好地被抑制，但信号受呼吸等影响仍存在低频噪声，这类噪声会引起基线波动，造成漂移，改变信号形态与幅值，从而影响 SpO_2 计算的准确度，因此需要对此类噪声进行校正。

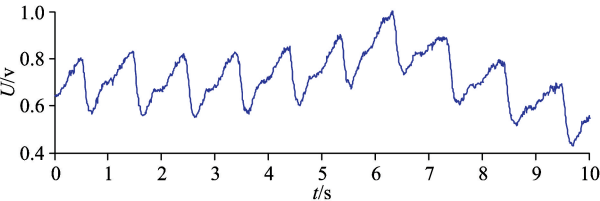


图 2 原始 PPG 信号

Fig. 2 The original signal of PPG

1.2 小波联合识别方法

小波联合识别方法主要包括基于小波多分辨率分析的低频噪声抑制以及利用小波模极大算法的峰值点自动定位。方法流程如图 3 所示。

1.2.1 低频噪声抑制方法

通常脉搏波的能量集中在 0.5~10 Hz，基线漂移与部分运动伪差的频率大都低于 0.5 Hz，这部分噪声影响信号的形态及幅值，而波形的幅值同 SpO_2 的计算紧密相关。

(1)小波基选取：根据脉搏波形态，选用 sym8 小波作为基线校正的小波基。

(2)分解级数选取：根据数据采样率、采样点数、脉搏波低频噪声特点（频率低于 0.5 Hz）按照式(1)进行选取。

$$L = fix \left[\left(\log \frac{F_s}{2f} \right) / \log 2 \right]$$

(1)

其中， F_s 是采样率， f 为所要求取的近似分量频率， fix 表

示向零取整函数， L 为所求的分解层数，并且 L 不能超过由式(2)计算出的最大分解层数 L_{max} 。

$$L_{max} = fix \left[\left(\log \frac{N}{lw - 1} \right) / \log 2 \right]$$

(2)

式中， N 表示信号的采样点数， lw 表示小波滤波器的长度。本文采样率 128 Hz，根据采样定理，信号中包含的频率信息为 0~64 Hz。当一次处理 30 s 的信号（采样点数为 3 840），使用 sym8 小波（其滤波器长度为 16），利用式(1)得到分解层数为 7，满足小于利用式(2)得到的最大分解层数 $L_{max}=8$ 。所以可利用 sym8 小波 7 级分解得到第 7 级的近似分量，其频率范围约在 0~0.5 Hz 之间，可用来估计 PPG 信号中的低频噪声。

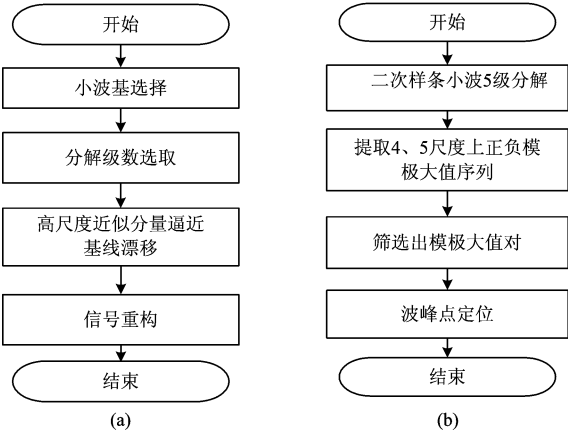


图 3 小波联合识别方法流程图

(a): 基线校正方法; (b): 峰值点识别方法

Fig. 3 The flow chart of the combined wavelet processing method

(a): Baseline correction method; (b): The peak identification method

(3)噪声估计：利用 7 级分解得到的第 7 级上的近似分量来估计 PPG 信号中的低频噪声。

(4)信号重构：可利用小波分解的第 1 到 7 级细节分量重构信号，也可以从 PPG 信号中直接去除第 7 级的近似分量进行重构，重构的信号即校正信号。

1.2.2 峰值点自动定位方法

二次样条小波对突变点的检测效果较优^[11]。因此，采用二次样条小波模极大算法进行 PPG 波峰点识别。在 128 Hz 采样率下，通过分析二次样条小波各分解尺度的功率谱，发现脉搏波的能量主要集中在第 4、5 尺度上，因此对 PPG 信号进行 5 级小波分解。奇异点会在每一分解尺度上产生模极大值，但是高频噪声的主要集中在第 1 与 2 尺度上，而有效信号会在能量占优的 4、5 尺度上取得较好分辨的模极大值对，并且它们的过零点与波峰点存在一定位置关系。因此根据此原理，具体的检测算法步骤如下：

(1)小波分解：使用二次样条小波对信号进行 5 级分解，分解如式(3)所示，

$$\begin{cases} A_i f(x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} h(n) A_{i-1} f(x - 2^{i-1} n) \\ D_i f(x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} g(n) A_{i-1} f(x - 2^{i-1} n) \end{cases}$$

(3)

式(3)中, $A_i f(x)$ 为每级分解后得到的近似信号, $D_i f(x)$ 为细节信号, $h(n)$ 和 $g(n)$ 为二次样条小波滤波器系数, 当 $n=1$ 时, $h(n)=(0.177, 0.530, 0.530, 0.177)$, $g(n)=(1.414, -1.414)$ 。本文中, $i=1, 2, \dots, 5$; $n=1, 2, \dots, 3\ 840$ 。

(2)幅度阈值设置: 在第 4, 5 分解尺度上, 利用每一尺度细节系数最大值的 0.6 倍作为阈值。

(3)模极值序列计算: 分别利用阈值提取出第 4, 5 尺度上的正负模极值序列; 保留两个尺度上同时存在的模极值序列。

(4)模极值对的筛选: ①伪迹一般产生孤立极值点而非正负极值对, 因此删除孤立极值点。②在医学不应期内(即每搏周期应大于 200 ms)不应出现两个模极值对, 因此删除幅值小的、保留幅值大的模极值对。

(5)波峰点位置计算: 通过每个模极值对的过零点位置, 在对应的原信号前后约 0.1 s 区间内求极值, 极值点所对应的即为波峰顶点。

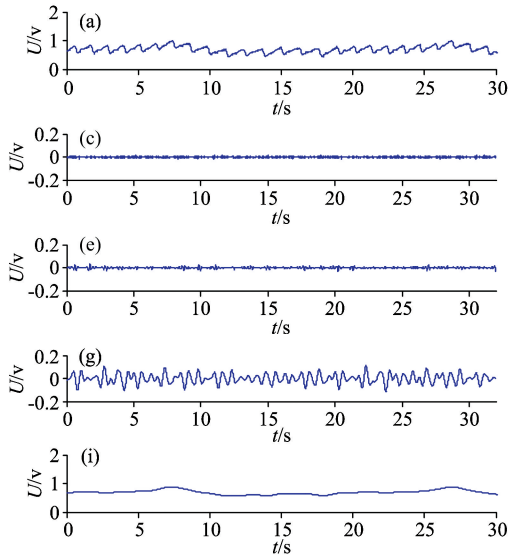


图 4 应用 sym8 小波对 PPG 信号进行 7 尺度分解的过程

(a): 从实测信号中截取的 30 s 信号; (b): 第 1 尺度细节分量; (c): 第 2 尺度细节分量; (d): 第 3 尺度细节分量; (e): 第 4 尺度细节分量; (f): 第 5 尺度细节分量; (g): 第 6 尺度细节分量; (h): 第 7 尺度细节分量; (i): 第 7 尺度近似分量; (j): 校正后信号

Fig. 4 Wavelet decomposition process of PPG signal by using sym8 wavelet at 7 levels

(a): 30 seconds measured signal of PPG; (b): Details at level 1; (c): Details at level 2; (d): Details at level 3; (e): Details at level 4; (f): Details at level 5; (g): Details at level 6; (h): Details at level 7; (i): Approximations at level 7; (j): The corrected signal

2.2 波峰点识别

利用 1.2.2 所述方法, 对 PPG 主波峰进行识别。图 5(a)是原始信号的识别结果(红色星号标记), 图 5(b)是校正后信号的识别结果。由于 PPG 信号微弱, 在使用过程中会引入不同程度的随机噪声, 所以为验证算法的稳定性与可靠性, 在信号中加入了信噪比为 15 的随机噪声。图 5(c)为加入随机噪声的识别结果, 图 5(d)是校正了低频噪声后的识别结果。

识别方法基于二次样条小波模极大算法, 利用在第 4 和 5 尺度上奇异点产生的模极大值对进行波峰点识别。第 4 和 5 尺度是脉搏数据的集中尺度, 高频噪声主要集中在第 1

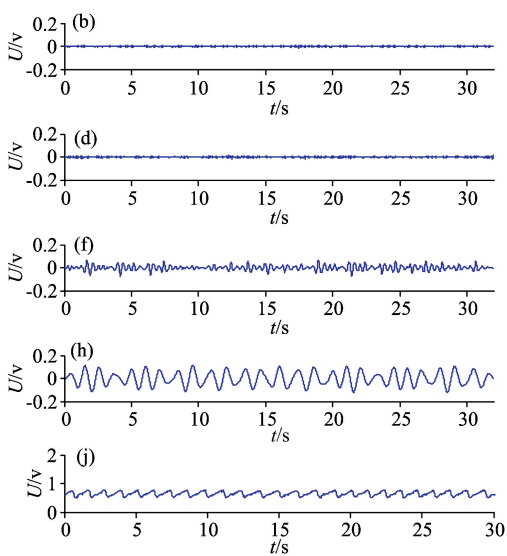
(6)漏检处理: 心率失常可导致峰值幅度降低, 所以检查峰-峰间期, 如果超过 1.2 s, 则在此区域内以阈值的 0.5 倍进行模极值对的搜索, 如果存在, 则增加此波峰点。

(7)误检处理: 异常幅值的波或噪声可能会造成误检。检查峰-峰间期, 如果小于 0.4 s 时两个波峰值点的幅值相差 1 倍, 则删除幅值小的峰顶点。

2 结果与讨论

2.1 低频噪声校正

呼吸会引起基线漂移, 图 4(a)所示为从实测信号中截取的 30 s 信号。利用 1.2.1 所述方法, 采用 sym8 小波, 对图 4(a)中信号进行 7 级分解, 图 4(b)—(h)为利用第 1 级至第 7 级细节系数重构出的细节分量, 图 4(i)为第 7 级近似系数重构出的近似分量, 可利用此近似分量来估计基线与低频噪声。从图 4(a)所示实测信号中去除图 4(i)中估计的噪声, 就可以得到校正信号, 如图 4(j)所示。



与 2 尺度上, 而波峰点会在能量占优的 4, 5 尺度上取得较好分辨的正负模极值对。

为进一步验证本方法的有效性, 使用 10 组实测数据, 每组 20 s, 分别采用本方法和传统差分阈值法进行峰值点识别, 并比较二者的波峰点检测准确率。实验结果表明: 本方法能够有效识别出全部波峰点, 而传统差分阈值法会由于噪声影响存在波峰点漏检和误检的现象, 其平均峰值点检测准确率为 96.39%。因此, 进一步验证了本方法的抗干扰能力及有效性。

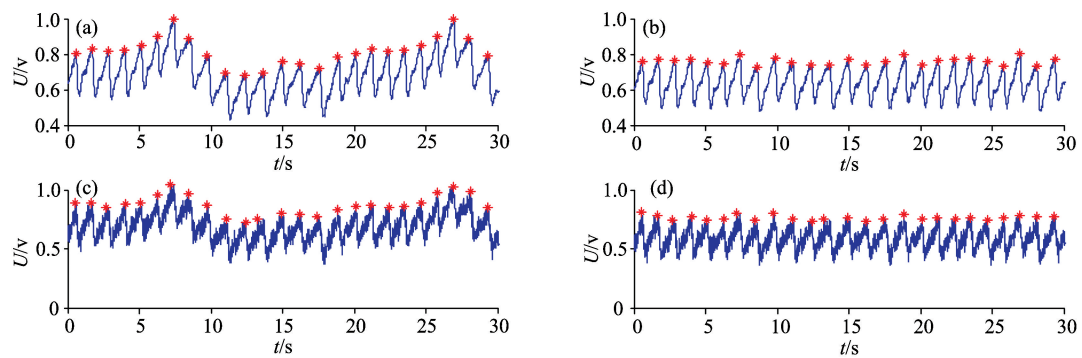


图 5 峰值点识别结果
(a): 原始信号; (b): 校正后信号; (c): 染噪后的原始信号; (d): 染噪后的校正信号

Fig. 5 The peak identification results

(a): The original signal; (b): The corrected signal;
(c): The original signal added random noise; (d): The corrected signal added random noise

3 结 论

提出一种小波联合法自动识别 PPG 波峰点。针对 PPG 信号由低频干扰引起的基线漂移，基于小波 MRA 原理，利用 Sym8 小波，根据经验公式确定了最佳分解级数，然后利用最高分解级所对应的近似分量进行低频干扰的估计，解决了影响峰值点幅值的基线漂移问题；针对峰值点的自动识

别，基于二次样条小波模极大算法，通过判别第 4, 5 尺度上的有效模极大值对，提供了一种抗干扰能力较好的 PPG 波峰点自动识别方法。利用自行研制的脉搏血氧饱和度检测装置进行了实验验证，结果表明，小波联合法较好地实现了 PPG 主波峰的自动识别，有利于提高血氧饱和度计算及峰-峰间期提取的准确度，这对基于光电容积脉搏波的人体呼吸功能评价与心率变异性分析具有重要意义。

References

[1] Khandoker A H, Karmakar C K, Palaniswami M. Medical Engineering and Physics, 2011, 33: 204.
[2] Bulte C S E, Keet S W M, Boer C, et al. European Journal of Anaesthesiology, 2013, 68(7): 775.
[3] Schäfer A, Vagedes J. International Journal of Cardiology, 2013, 166(1): 15.
[4] Kasambe P V, Rathod S S. Procedia Computer Science, 2015, 49(1): 282.
[5] Krishnan R, Natarajan B, Warren S. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010, 57(8): 1867.
[6] Murthy N K L, Madhusudana P C, Suresha P, et al. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(12): 2391.
[7] Kavsaoğlu A R, Polat K, Bozkurt M R. Computers in Biology and Medicine, 2014, 49: 1.
[8] Galeotti L, Scully C G, Vicente J, et al. Physiological Measurement, 2015, 36(8): 1.
[9] Mallat S G. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 11(7): 674.
[10] ZHAO Xue-zhi, XIANG Ke, YE Bang-yan, et al(赵学智, 向 可, 叶邦彦, 等). Journal of Vibration and Shock(振动与冲击), 2010, 29(11): 6.

An Automatic Peak Identification Method for Photoplethysmography Signals

LI Su-yi¹, XU Zhuang¹, XIONG Wen-ji², JIANG Shan-qing¹, WU Jiang^{1*}
1. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China
2. The First Hospital of Jilin University, Changchun 130021, China

Abstract The automatic recognition of the peak point of the PPG signal is directly related to the accuracy of non-invasive measurement of blood oxygen saturation and the extraction of PP intervals. In this paper, a combined wavelet processing method was proposed. Based on the principle of wavelet multi-resolution analysis, the proposed method corrected the baseline wander which

would influence the peak amplitude, and then the peak was identified automatically by using the quadratic spline wavelet modulus maximum algorithm. Using the signals acquired by a self-developed pulse oxygen saturation detecting device to evaluate the effectiveness, the method could correct the baseline wander and identified the peak points of the signal, and to evaluate the stability and reliability of the method, we used a noisy signal. Furthermore, by using ten segments of the measured PPG signals, we compared the peak recognition accuracy of the proposed method with that of a traditional differential threshold method to validate the effectiveness. The results showed that the method not only eliminated the baseline wander, but also could accurately detect the peak of the noisy signal, which had a good anti-jamming capability, and was beneficial to improve the detection of blood oxygen saturation and the accuracy of PP interval extraction. Furthermore, it was helpful to the evaluation of respiratory function and heart rate variability analysis.

Keywords PPG signal; Automatic recognition of the peak point; Wavelet multi-resolution analysis; Quadratic spline wavelet modulus maximum algorithm

(Received Sep. 20, 2016; accepted Jan. 16, 2017)

* Corresponding author

(上接 3082 页)

- 3. 点击会议基本情况下的会议快捷通道中的“会议投稿”。
- 4. 输入用户名和密码登陆,在页面下选择稿件提交。
- 5. 按照提示提交稿件。

报告形式

为充分利用会议学术交流的效率,会议仍采用“口头报告”和“墙报展示”两种方式进行学术交流。无论是口头报告还是墙报展示,均属大会同等学术交流。为尊重个人意见和便于组委会的安排,请大家在会议注册时,提交“口头报告”或“墙报”的题目。为了鼓励博士、硕士研究生积极参与学术交流活动,本次会议将继续设立“优秀青年论文奖”和“优秀墙报奖”,表彰那些研究水平高、能突出研究内容要点、条理清晰的“口头报告”和“墙报”,大会将给获奖作者颁发优秀论文证书和奖金。同时会议还将邀请国内外知名专家学者就光谱有关学术领域的前沿热点问题作大会报告和主题报告。

主要报告形式有:

- 1. 大会邀请报告:主要邀请国内外知名专家学者报告光谱分析的前沿技术在各个领域的最新研究进展。
- 2. 主题邀请报告:本次会议将选择光谱技术的热点应用领域,开设多个专题论坛,邀请在该领域的知名专家作论坛主题报告。
- 3. 青年论坛报告:为博士、硕士研究生开设交流平台,并评选“优秀青年论文奖”。
- 4. 口头报告和墙报展示:作为本次会议的主要交流和展示形式。会议统一安排墙报讲解时间,希望作者按时到位讲解。

重要时间

- 论文截稿日期:2018 年 4 月 30 日
- 第二轮会议通知:2018 年 8 月下旬(开通会议注册系统)
- 第三轮会议通知:2018 年 10 月上旬
- 会议召开期:2018 年 10 月 19—22 日
- 请您经常浏览光谱网主页,了解会议筹备情况和会议具体安排。网址: <http://www.sinospectroscopy.org.cn>

产品展示

会议热忱邀请国内外仪器厂商前来展示分子光谱(红外、近红外、拉曼、荧光等)、原子光谱等各类光谱仪以及质谱、核磁等其它相关仪器设备。我们将在本次会议的网站和会议现场提供展出场所,希望各厂商充分利用这次机会展示自己的最新产品。

会务组联系方式

大家若有对召开本次会议的建议和想法,可与会务组联系,大会组委会将适时开通网上参会注册系统,请注意组委会的通知。

(下转 3155 页)