

一种基于自适应小波变换的 QRS 波检测算法

王 伟

(浙江科技学院 理学院, 杭州 310023)

摘 要: 为了解决心电图 QRS 波检测的问题,研究了一种基于自适应小波变换来检测 QRS 波的算法。该方法用心电信号的小波变换作为自适应白化滤波器的输入,然后对白化滤波后的输出进行匹配滤波和阈值检测来识别出 QRS 波。采用该方法,有利于减小检测的误检率以及提高运行速度。

关键词: 心电图;QRS 波;自适应算法;小波变换

中图分类号: TP391.4; TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2007)02-0097-03

Algorithm for Detection of Electrocardiogram QRS Complex Using Self-Adaptation Wavelet Transform

WANG Wei

(School of Science, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: An electrocardiogram QRS complex detection method is developed based on self-adaptation algorithm and wavelet transform. This algorithm takes the wavelet transform of the ECG signal as the input of the whitened filter and then determines the QRS complex by matching filtering and threshold detecting. Utilizing this method, the rate of the detecting error can be reduced and the calculating speed can be improved.

Key words: electrocardiogram (ECG); QRS complex; self-adaptation algorithm; wavelet transform

心电图的 QRS 波^[1]的准确检测一直都备受关注,也一直是心电信号自动分析的难点,目前已经研究出 QRS 波的检测算法主要有以下几种。

1)差分法^[2]:对信号做差分,利用 R 波幅度大、斜率高的特性进行判断。该算法原理简单,可有效地抑制低频干扰,但无法消除高频干扰,检测效果差。

2)基于滤波器组的算法^[3]:通过滤波器组将心

电信号分解成不同频带的子信号,选择合适的频带进行分析。该算法抗干扰强,计算速度快,准确度较高。但每个子信号的频段固定,不如小波变换的“变焦距”功能来得灵活。

3)基于数学形态学的方法^[4]:通过数学形态学运算,局部修改信号的几何特征后进行检测。该算法可有效地消除脉冲噪声,但是修改过的信号呈尖

收稿日期:2007-01-08

基金项目:浙江科技学院科研启动基金项目(QFD4159)

作者简介:王 伟(1977—),女,山东淄博人,讲师,硕士,主要从事概率论与数理统计专业生物信息处理方面的研究。

峰脉冲状,容易误检。

此外还有 DFT 算法、神经网络算法^[5]等其他算法,都各有其优点,也存在一些不足。有的算法不能有效消除高频干扰,检测效果差^[6];有的算法检测速度较慢,不够灵活^[3];有的算法容易误检^[4]。

本文提出的 QRS 波检测算法以小波变换为核心,用自适应算法对 ECG 进行白化滤波,然后再进行匹配滤波和阈值检测以识别出 QRS 波,从而弥补了上述算法的一些不足。

1 QRS 波检测理论

设观察信号 $x(t)$ 是确定性波形 $s(t)$ 和白噪声 $n(t)$ 的叠加,即 $x(t) = s(t) + n(t)$ 。对于 QRS 波检测, $s(t)$ 是 QRS 波本身, $n(t)$ 为 ECG 的其他分量,如 P、T 波以及叠加在上面的肌电信号(EMG)等。算法基本思想是设计出滤波器的冲激响应函数 $h(t)$,使 $x(t)$ 经它滤波后的输出在 $t = T_0$ 时刻有最大瞬时信噪比。其着眼点并非尽可能地保持信号不失真,而是提高输出的瞬时信噪比。若 $n(t)$ 为白噪声,则匹配滤波是最理想的检测方法。但实际信号中 $n(t)$ 往往不完全是随机白噪,就 QRS 波检测而言, $n(t)$ 中的 P、T 波等与信号有一定的相关性,且是时变的。为了应用匹配滤波,必须对这些非白噪声进行白噪化预处理。自回归模型(AR)滤波器较适用于 QRS 波白化处理。它对 QRS 波中 t 时刻的噪声,用 t 之前 q 个采样点的线性组合进行估计,即

$$n(t) = \sum_{i=1}^q w(i)x(t-i) + e(t) \quad (1)$$

式(1)中, $w(i)$, $i = 1, 2, \dots, q$ 称为 AR 模型参数, $e(t)$ 为误差值。若模型正确, $n(t)$ 将渐趋于白噪声。注意到 QRS 波仅占整个心动周期较短的一部分,其中包含大量的较高频率成分,适当选择 q 值,将能有效地克服白噪化过程对有用信号 $s(t)$ 的抑制作用,从而在 QRS 波出现时,白化滤波器的误差输出将增大。即

$$\begin{aligned} y(t) &= x(t) - \sum_{i=1}^q w(i)x(t-i) \\ &= s(t) - \sum_{i=1}^q w(i)s(t-i) + e(t) \\ &= s'(t) + e(t) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中, $s'(t)$ 是白化滤波器对 $s(t)$ 的滤波输出,只要观察长度 q 足够小,就能保留 $s(t)$ 中的大部分高频成分,使得 $s'(t)$ 近似于 $s(t)$ 。白化滤波器结构如图 1 所示。

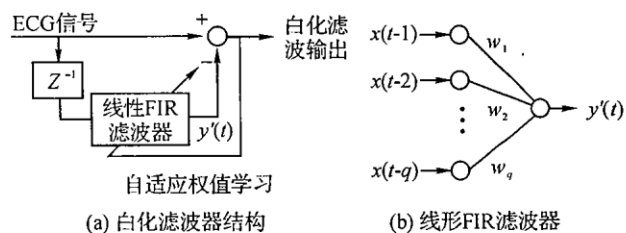


图 1 自适应线性白化滤波

为跟踪 QRS 波检测中噪声的变化,可选用随机梯度法(或 LMS)估计 AR 模型的参数。对于每一输入矢量,按式(3)更新模型参数:

$$W(t+1) = W(t) + 2\mu e(t)X(t) \quad (3)$$

式(3)中, μ 称为步长因子, $e(t) = x(t+1) - X^T(t)W(t)$ 是滤波器的输出误差。为减少幅度随机性的影响,再引入幅度因子 β ,即

$$W(t+1) = W(t) + 2\mu e(t)X(t) + \beta[W(t) - W(t-1)] \quad (4)$$

2 QRS 波检测的具体算法

运用自适应小波网络^[7]去逼近 ECG 中除 QRS 波之外的其他信号,包括 P、T 波和基漂等,从而在消除这些有色噪声后,再用匹配滤波技术检出 QRS 波。图 2 是本算法的框图。

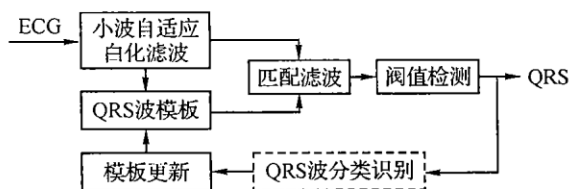


图 2 QRS 波检测算法

白化滤波方案如图 3 所示,笔者希望输出 y 中包括除 QRS 波以外的其他所有信号,这样白化滤波器的输出中将仅含 QRS 波,能较容易地从中检测出 QRS 波。因此,白化滤波的关键是设计自适应小波滤波器。

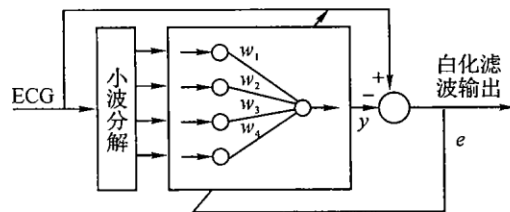


图 3 基于小波的自适应白化滤波器

QRS 波的中心频率要比 P、T 波及伪迹的高,因此,可在小波分解后选择适当的尺度,使 y 跟随这些信号。而 EMG 近似于白噪,经小波尺度的选择仍不

能完全去除,其影响将由后续的QRS波匹配滤波检测算法来消除。神经网络中常用函数作神经元的激励函数,即

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-Tx}} \quad (5)$$

式(5)中, T 为温度系数,控制函数的斜率。如图3, S 函数是一能量无限函数,不能作小波函数。如将若干个经一定时移后的 S 函数叠加即可得到一能量有限的函数。本文采用3个 S 函数构成分析小波 $^{[8]}$ ψ ,其时域、频域特性解析式为:

$$\psi(x) = \frac{1}{1 + e^{-2(x-2)}} + \frac{1}{1 + e^{-2x}} + \frac{1}{1 + e^{-2(x+2)}} \quad (6)$$

根据小波变换的定义,在360 Hz采样频率时,对应尺度 $\alpha = 0.1 \sim 0.8$ 的等效滤波器其3 dB带宽如表1。不难发现, α 为0.6和0.7两尺度的中心频率与P、T波接近。因此,选 α 为0.5,0.6,0.7,0.8的ECG小波分解结果,作为参与自适应滤波的输入信号。

表1 小波变换的等效带宽

尺度 α	3 dB 带宽 / Hz	尺度 α	3 dB 带宽 / Hz
0.1	25 ~ 78	0.5	6 ~ 16
0.2	13 ~ 40	0.6	5 ~ 14
0.3	9 ~ 27	0.7	4 ~ 12
0.4	7 ~ 20	0.8	3 ~ 10

对于ECG的输入点 $x(n)$,其4个尺度上的WT变换值构成的向量为:

$$\mathbf{X}(n) = \{x_1(n), x_2(n), x_3(n), x_4(n)\} \quad (7)$$

自适应小波滤波输出 y 为:

$$y(n) = \sum_{i=1}^4 w_i(n) x_i(n) \quad (8)$$

式(8)中, $w_i(n)$ 为 n 时刻的权值,其更新算法如下:

$$\begin{aligned} w_i(n+1) &= w_i(n) + 2\mu e(n) x_i(n) + \\ &\quad \beta[w_i(n) - w_i(n-1)], \\ i &= 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (9)$$

图4是一段ECG经自适应白化滤波后的输出,其中基本上已消除基漂和P、T波的干扰。因此可从中直接寻找模板,并进行模板的更新。QRS波宽度一般在110~200 ms之间,笔者将模板宽度设为112 ms。当某一QRS波检出后,可根据其类型来决定是否要更新当前模板。只有正常QRS波,且T-P间期的方差系数小于给定阈值,才更新模板,当匹配滤波器的输出超过阈值 k 时,便检出一个QRS波, k 值是一与模板同时更新的变量。在检出R波后设置200 ms不应期,并在平均RR间期的1.5倍范围内搜寻最大匹配滤波输出绝对值作为新的R波点。当这期间的最大值大于 $0.8k$,且仅有1到2个点

时,则以最大值点为R波。

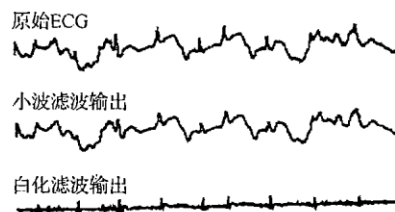


图4 ECG的小波自适应白化滤波输出

3 讨论

本文提出的这种基于自适应小波变换的自动检测算法,拟采用以下步骤来实现:

- 1) 将连续15 s ECG输入检测器,找出每段中的最大值作为R波点,得到初始QRS波模板;
- 2) 进行自适应小波白化滤波,其差值输出进行匹配滤波;
- 3) 检测到一个QRS波,进行模板和参数的更新。该算法较为准确地提取了有效的模式参数,因而使得计算机在心电图QRS波自动检测分类时更为准确、简单。这样既减小了检测的误检率也提高了运行速度,从而弥补了上述算法的一些不足。

参考文献:

- [1] 张开滋,郭继鸿,刘海祥,等. 临床心电信息学[M]. 湖南:湖南科学技术出版社,2002.
- [2] ROSARIA S, CARLO M. Artificial neural networks for automatic ECG analysis[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(5): 1417-1425.
- [3] AFONSO V X, TOMPKINS W J, NGUYEN T Q, et al. ECG beat detection using filter banks[J]. IEEE Trans on Biomed Eng, 1999, 46(2): 192-202.
- [4] TRAHANIAS P E. An approach to QRS complex detection using mathematical morphology [J]. IEEE Trans on Biomed Eng, 1993, 40(2): 201-205.
- [5] ROSARIA S, CARLO M. Artificial neural networks for automatic ECG analysis[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(5): 1417-1425.
- [6] FRIENSEN G M, JANNETT T C, Jadallah M A, et al. Comparison of the noise sensitivity of nine QRS detection algorithms[J]. IEEE Trans on Biomed Eng, 1990, 37(1): 85-98.
- [7] 朱洪俊. 心电信号深层识别机理的研究与虚拟式心电图仪的研制[D]. 重庆:重庆大学理学院, 2002: 105-106.
- [8] 李清顺, 杨定楚, 秦前清. 基于分形小波变换的医学图像增强[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(3): 807-809.