

文章编号: 1671-7104(2015)02-0083-04

基于循环平稳算法的脉搏信号质量评估与滤波

【作者】 张爱华^{1,2}, 胡文龙^{1,2}, 丑永新^{1,2}

1 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州市, 730050

2 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 兰州市, 730050

【摘要】 针对实际采集脉搏信号中各种噪声对信号质量的影响, 采用循环平稳算法对脉搏信号进行质量评估与滤波。首先, 根据循环谱提出脉搏信号的质量评价指标——质量系数, 评估脉搏信号受噪声影响程度; 然后, 设计循环相关匹配滤波器对脉搏信号滤波。采用建模产生的脉搏信号与MIT-BIH噪声数据库提供的噪声信号叠加产生实验数据, 对提出的质量评估与滤波方法进行验证, 并将所提出方法应用于实际采集的脉搏信号。结果表明, 质量系数可以准确地反映脉搏信号的质量; 循环相关匹配滤波器可以有效地消除脉搏信号中的噪声。

【关键词】 脉搏信号; 循环平稳; 循环谱估计; 质量系数; 循环相关匹配滤波器

【中图分类号】 R318.6; TN911.7

【文献标志码】 A

doi:10.3969/j.issn.1671-7104.2015.02.002

Pulse Signal Quality Estimation and Filtering Based on Cyclostationary Algorithm

【Writers】 ZHANG Aihua^{1,2}, HU Wenlong^{1,2}, CHOU Yongxin^{1,2}

1 College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050

2 Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou, 730050

【Abstract】 In order to reduce the impact of various noise in pulse signal, the quality estimation and filtering algorithms based on cyclostationarity are proposed to reprocess pulse signal. First, A quality evaluation index of pulse signal which named quality factor is defined by cyclic spectrum to describe the quality variation of the pulse signal affected by noise; Second, a cyclic correlation matched filter (CCMF) is designed to remove noise. The simulation of pulse signal is produced by ourselves and noise signal is provided by MIT-BIH physiological database are used to test the function of proposed method, and then the method is applied to the actual pulse signal. The results show that the quality factor can accurately reflect the quality of the pulse signal and the CCMF can effectively remove noise from pulse signal.

【Key words】 pulse signal, cyclostationarity, cyclic spectrum estimation, quality factor, CCMF

脉搏信号是人体常见的生理信号, 蕴涵着丰富的生理与病理信息, 在疾病预防和治疗等方面得到广泛应用^[1-2]。脉搏信号在采集过程中不可避免地受到基线漂移、肌电干扰和工频干扰等噪声的影响, 不仅会降低脉搏信号的质量, 甚至会淹没有用的信号, 导致医疗监护设备错误报警, 增加了病人和医护人员的压力, 造成医护人员对报警信号的不信任和麻痹大意, 这严重影响了对真实危重疾病的报警和及时响应与处理。因此, 识别并剔除脉搏信号中质量不好的信号段, 对剩余信号段进行滤波, 对降低监护设备的误警率有十分重要的研究意义。

脉搏信号的每个脉动周期不完全一样, 不是严格的周期信号, 属于非平稳信号, 但却呈现出一定周期平稳性, 即脉搏信号具有循环平稳特性。目前, 有

关脉搏信号质量评估与滤波方法并没有考虑信号的循环平稳特性^[3-4]。近年来, 随着循环平稳理论的完善和发展, 在通信、雷达等领域得到广泛的应用^[5]。相比之下, 对人体生理信号的循环平稳特性研究刚刚起步。与脉搏信号类似, 心音信号也属于循环平稳信号, 有学者将循环平稳算法应用于心音信号的质量评估和包络估计, 取得了一定的研究成果^[6], 可作为脉搏信号质量评估的参考。于是, 本文提出基于脉搏信号循环平稳特性的质量评估与滤波方法, 定义了可反映脉搏信号质量变化的质量系数, 用于评估脉搏信号受噪声污染的程度; 对于受噪声污染小的信号段利用循环平稳算法与最大信噪比准则设计循环相关匹配滤波器进行降噪, 并将污染严重的脉搏信号剔除。采用建模产生的仿真脉搏信号与本课题组实际采集的脉搏信号验证所提出方法的准确性和实用性。

1 方法

1.1 脉搏信号的循环谱

收稿日期: 2014-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(81360229)

甘肃省自然科学基金(1308RJZA225)

模式识别国家重点实验室开放课题(201407347)

作者简介: 张爱华, 教授, 博士生导师。E-mail: lutzhangah@163.com

脉搏信号为循环平稳信号(记为 $x(t)$),其周期在一个常数上下波动(该常数为理想情况下的脉搏周期,记为 T)。根据循环平稳理论^[7],任意时刻 t , $x(t)$ 的循环自相关函数定义为:

$$R_x^\alpha(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (1)$$

其中, α 为循环频率, τ 为时间延迟,上标*表示取共轭。如果循环频率 $\alpha=0$,那么循环自相关函数 $R_x^\alpha(\tau)$ 就变成普通的自相关函数 $R_x(\tau)$ 。对 $R_x^\alpha(\tau)$ 做傅里叶变换可得:

$$S_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2)$$

$S_x^\alpha(f)$ 被称为循环谱密度函数。 f 是谱频率,如果循环频率 $\alpha=0$,那么 $S_x^\alpha(f)$ 就变成了普通的功率谱密度函数 $S_x(f)$ 。由于噪声会影响脉搏信号的循环平稳特性,所以不同噪声环境下信号的循环谱不同,对应的循环频率也不同。

1.2 脉搏信号质量系数

对于受到噪声污染的脉搏信号,需要判断其质量是否符合后期分析的要求。本文根据脉搏信号的循环谱提出质量系数,反映脉搏信号质量变化。由于循环平稳算法基于循环频率 α 而非谱频率 f ,因此, $S_x^\alpha(f)$ 对循环谱积分后可消除谱频率 f 。对式(2)积分得到:

$$\gamma_x(\alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} |S_x^\alpha(f)| df \quad (3)$$

其中, $\gamma_x(\alpha)$ 叫做循环频率频谱密度(Cycle Frequency Special Density, CFSD)。据此再定义质量系数为:

$$d(\lambda) = \frac{\gamma_x(\lambda)}{\int_0^\mu \gamma_x(\alpha) d\alpha} \quad (4)$$

式中, μ 是最大循环频率; λ 是基本循环频率,即 $\gamma_x(\alpha)$ 波形的第一个峰值所对应的频率位置^[8]。由于噪声会影响脉搏信号的循环平稳特性,因此,通过质量系数的大小可以有效地反映脉搏信号受噪声污染的程度。

1.2.1 滑窗的选取

将式(4)用于脉搏信号,可得到整段脉搏信号的质量系数,为一常数,不能反映脉搏信号局部质量变化。于是,引入滑窗的思想,给脉搏信号加入一个动态的窗口(窗宽记 2ζ),采用式(4)计算该窗口 $[t-\zeta, t+\zeta]$ 内信号的质量系数作为 t 时刻的质量系数。则式(4)变为:

$$d(\lambda, t) = \frac{\gamma_x(\lambda, t)}{\int_0^\mu \gamma_x(\alpha, t) d\alpha} \quad (5)$$

其中, $\gamma_x(\lambda, t)$ 是表示在 $[t-\zeta, t+\zeta]$ 窗口内脉搏信号的循环频率频谱密度。从时变质量系数 $d(\lambda, t)$ 可以看出,滑动窗的长度太短,无法体现脉搏信号的循环平稳特性,也就无法得到循环频率 α 。所以,滑动窗的宽度不能小于2个完整的脉搏周期。

1.2.2 循环谱估计

对于实际脉搏信号,循环频率 α 是未知的,所以循环谱 $S_x^\alpha(f)$ 也是未知的,质量系数 $d(\lambda, t)$ 也无法得到。于是,需要对脉搏信号的循环谱 $S_x^\alpha(f)$ 进行估计。本文采用常用的非参数化时域平滑方法——分段谱相关算法(Strip Spectral Correlation Algorithm, SSCA)^[11]得到估计值 $S_x^\alpha(f)$ 。

根据互谱分析理论^[9]与时域平滑理论^[10],得到分段谱相关算法表达式:

$$S_{X_T}^{f_k + q\Delta\alpha}(n, \frac{f_k - q\Delta\alpha}{2}) = \sum_r X_T(r, f_k) X_T^*(r) g(n-r) e^{-j2\pi q r / N} \quad (6)$$

$$X_T(n, f) = \sum_{r=-N'/2}^{N'/2} a(r) x(n-r) e^{-j2\pi f(n-r)T_s} \quad (7)$$

其中, T_s 为采样周期, $f_s=1/T_s$ 为采样频率; Δt 为时间长度; N 为在 Δt 内的数据采样点数; $X_T(n, f)$ 是输入信号 $x(t)$ 的复解调,即 $x(t)$ 的 N' 点快速傅立叶变换, N' 一般等于或者大于2的整数次幂; q 是循环频率分辨率 $\Delta\alpha$ 倍数; $g(n-r)$ 是 $P \times L$ 阶的矩形平滑窗;循环频率分辨率 $\Delta\alpha=1/\Delta t=f_s/N$;频率分辨率 $\Delta f=f_s/N'$ 是一个不随循环频率 α 的改变而改变的常数, $\Delta f=\Delta\alpha$; $\Delta t \Delta f=N/N'$ 为一个常量。

利用SSCA算法得到循环谱的估计值 $S_x^\alpha(f)$ 之后,可通过其峰值对应的横坐标得到循环频率 α ,再运用式(3)和式(4)就得到质量系数 $d(\lambda, t)$,对脉搏信号进行质量评估。

1.3 循环相关匹配滤波器

根据质量系数反映出脉搏信号受噪声污染的程度,剔除质量差的信号段,对剩余信号进行滤波处理。结合脉搏信号的循环平稳特性及滤波器输出信噪比最大的要求,在匹配滤波器的基础上引入循环平稳算法,设计循环相关匹配滤波器(Cyclic Correlation Matched Filter, CCMF)对脉搏信号进行降噪。

设输入信号 $x(t)=s(t)+n(t)$,其中, $s(t)$ 是已知循环谱 $S_x^\alpha(f)$ 和循环频率 α 的循环平稳信号; $n(t)$ 是噪声信号,与 $s(t)$ 统计独立。根据循环相关匹配滤波器设计算法^[11]得到滤波器传递函数:

$$H'(f) = c(S_x^\alpha(f))^* e^{-j2\pi f\tau} \quad (8)$$

其中 $S_s^a(f)$ 是信号 $s(t)$ 的循环谱密度。

对应的滤波器时域传递函数为:

$$h'(\tau) = c(R_s^a(\tau_0 - \tau))^* \quad (9)$$

所以, 循环相关匹配滤波器输出为:

$$y(t) = x(t) * h(t) = x(t) * c(R_s^a(\tau_0 - \tau))^* \quad (10)$$

其中, c 是常数; $R_s^a(\tau_0 - \tau)$ 是脉搏信号 $s(t)$ 滞后时间常数为 τ_0 的循环自相关函数。

2 数据

由于无法获得实际脉搏信号的真值, 所以, 无法对算法的准确性进行评估。于是, 本文给干净的脉搏信号(真值信号)叠加噪声信号产生实验数据。干净脉搏波由三个高斯函数来合成^[12-13], 分别对应于脉搏波的主波、重搏波及重搏前波。每个高斯函数由3个参数确定, 即幅度 V 、时间 T 和宽度 U 。合成的脉搏波 $p(t)$ 由下式表示:

$$p(t) = \sum_{i=1}^3 V_i e^{-(t-T_i)^2/U_i} \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (11)$$

其中, $V_1=0.8$, $V_2=0.5$, $V_3=0.4$, $T_1=0.25$, $T_2=0.45$, $T_3=0.7$, $U_1=0.012$, $U_2=0.01$, $U_3=0.03$ 。

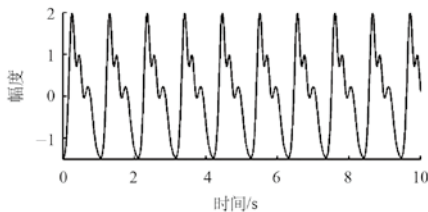


图1 干净的脉搏信号
Fig.1 Clean pulse signal

对式(11)的单个脉搏波进行延拓, 产生一组脉搏信号, 将其作为干净脉搏信号, 1 s内信号含有250个数据点, 信号总长度为10 s。为了消除信号幅值不同的影响, 将其归一化(均值为0, 标准差为1), 如图1所示。噪声信号取自PysioNet BIH Noise Stress Test数据库^[14]。该数据库包含了健康受试者在脉搏采集的3.5 h, 采样频率为250 Hz的噪声信号, 主要有基线漂移(bwm)和肌电干扰(mam)。截取与脉搏信号相同长度的噪声信号, 加入干净的脉搏信号, 如图2所示。

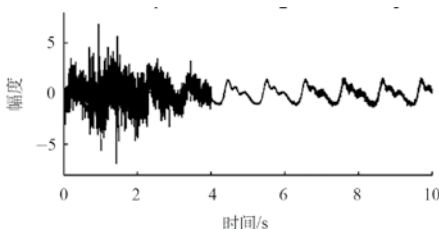
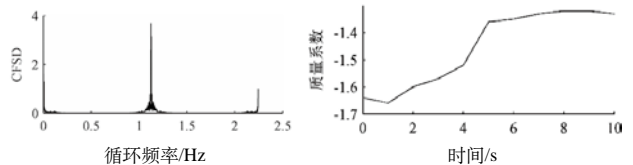


图2 被噪声污染的脉搏信号
Fig.2 Pulse signal before and after noise pollution

3 结果

3.1 质量系数结果

利用分段谱相关算法计算出被噪声污染脉搏信号循环谱估计值 $S_x^a(f)$, 分别通过式(3)与(5)得到循环频率频谱密度 $\gamma_x(a)$ 与质量系数 $d(\lambda, t)$, 如图3(a)与图3(b)所示。从图3(a)中看出, 被噪声污染的脉搏信号循环频率范围是0~2.4 Hz, 峰值点对应基本循环频率 $\eta=1.2$ Hz。从图3(b)中看出质量系数在0~4 s段明显下降, 在4~10 s段上升。其中质量系数 $d(\lambda, t)$ 最小值为-1.7。而对于图2(a)中干净的脉搏信号, 其基本循环频率 $\eta=1.25$ Hz, 质量系数 $d(\lambda, t)=-1.2$ 。实验结果表明, 质量系数随噪声的增大而减小, 即质量系数可以准确地反映脉搏信号质量的变化。



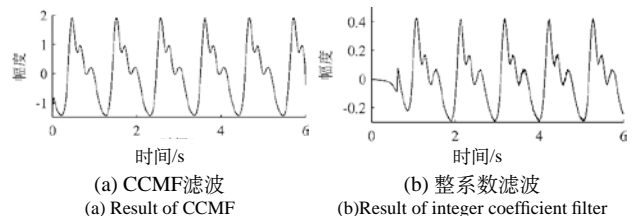
(a) 受噪声污染的脉搏信号循环频率频谱密度
(b) 受噪声污染的脉搏信号质量系数
(a) Cycle frequency special density of polluted pulse signal
(b) Quality factor of polluted pulse signal

图3 受噪声污染的脉搏信号质量系数仿真实验
Fig.3 Simulation experiment of polluted pulse signal

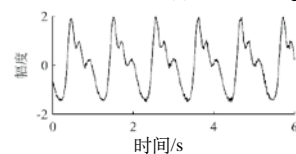
3.2 滤波结果

3.2.1 循环相关匹配滤波器

将被噪声淹没的脉搏信号(如图2(b)中0~4 s段)剔除后, 将剩余部分(如图2(b)中4~10s段)通过循环相关匹配滤波器滤波, 结果如图4(a)所示。由图4可见, 脉搏信号中的噪声被有效去除。



(a) CCMF滤波 (b) 整系数滤波
(a) Result of CCMF (b) Result of integer coefficient filter



(c) EMD 滤波
(c) Result of EMD filter

图4 三种滤波结果
Fig.4 Results of three methods

3.2.2 三种滤波方法的比较

采用整系数滤波法(实时性高, 但滤波效果一般)、EMD分解滤波法(滤波效果好, 但实时性差)和

本文方法进行对比。将图2(b)中4~10 s段脉搏信号分别通过设计的整系数滤波器与EMD滤波器^[15-16]后得到的输出信号如图4(b)和4(c)所示。3种滤波器输出信号与原始干净的脉搏信号(图3(a))比较后可以看到,整系数滤波存在明显的群时延并且滤波效果不好;EMD滤波没有群时延但噪声未完全滤除;相比之下CCMF滤波效果明显好于整系数滤波和EMD分解滤波。

分别采用均方根误差(MSE)、信噪比(SNR)、运算时间(TIME)对三种滤波器的性能进行评价。计算三种滤波方法的质量系数,SNR及运算时间(软件:Matlab R2010a,计算机配置: Intel E4600双核处理器,主频2.4 GHz,内存1.5 GB),对比三种方法的滤波性能。结果如表1所示。

表1 三种滤波方法性能比较结果
Tab.1 Comparison of three filtering methods

滤波方法	MSE	SNR	TIME
CCMF	0.292 2	7.968 1	0.951 9
整系数滤波	0.5423	4.525 0	0.138 1
EMD	0.314 6	4.636 5	3.736 8

注: MSE: 均方根误差; SNR: 信噪比(dB); TIME: 运算时间(s)

通过表1可以看到CCMF与其它两种滤波方法相比, MSE最小(0.292 2), SNR最大(7.968 1),但是由于CCMF的输出需要计算循环频率,所以运算时间比整系数滤波器时间长。

综上所述,整系数的运算量小但是准确性不高,同时存在群时延;EMD准确性较好但是算法复杂度也高,不利于脉搏信号的实时分析处理;相比之下,CCMF不仅在准确性和时效性上较好,而且信噪比高,可以很好地保留脉搏信号的特征信息并有效地去除噪声。

3.3 应用

选取本课题组实际采集的一组脉搏信号,如图5(a)所示,前后部分存在受噪声严重污染的信号段,特征已完全丢失,中间部分(4~8 s)受噪声污染小。利用质量系数对该段脉搏信号的质量进行评估,结果如图5(b)所示,由于中间段受信号噪声污染小,所以其质量系数比两端大。通过质量系数可以反映脉搏信号质量的变化,将信号质量不好的,即信号被噪声淹没的部分(0~4

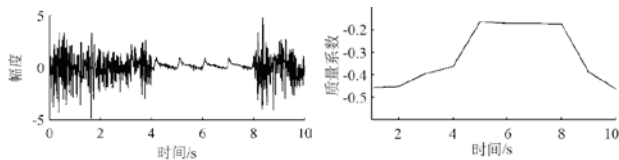


图5 实际脉搏信号的质量系数实验
Fig.5 Simulation experiment of actual pulse signal

s与8~10 s)剔除;对剩余部分(4~8 s,图6(a)所示)采用CCMF滤波,结果如图6(b)所示,可以看到CCMF能够有效地去除脉搏信号中的噪声。

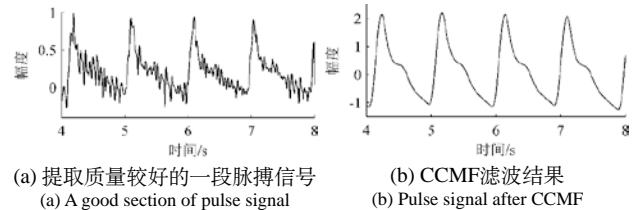


图6 实际脉搏信号质量评估和CCMF滤波结果

Fig.6 The results of actual pulse signal after CCMF and quality evaluation

4 总结

本文针对脉搏信号的循环平稳特性,提出了基于循环平稳算法的质量评估与循环相关匹配滤波方法。利用循环谱定义质量系数作为脉搏质量的评价指标,设计循环相关匹配滤波器对脉搏信号降噪,为后续的脉搏信号分析奠定了基础。相比传统的滤波方法,循环相关匹配滤波器可更有效地对脉搏信号降噪。同时,该方法也可用于心电、血压和呼吸等具有循环平稳特性的生理信号,在降低医疗器械误警率方面有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 张爱华,丑永新.动态脉搏信号的采集与处理[J].中国医疗器械杂志,2012,36(2):79-84.
- [2] 王兰,朱宪,马为,等.重视无症状型心脑血管病的预防[J].中国全科医学,2010,13(8):876-877.
- [3] 李桥.危重病人生命体征信号质量评估与分析[D].山东大学,2008.
- [4] Sutton PD, zgül B, Doyle LE. Cyclostationary signatures for LTE Advanced and beyond[J]. Phys Commun, 2014, 10: 179-189.
- [5] 贾维敏,姚敏立,宋建社,等.信号循环平稳特性及其应用[J].现代雷达,2005,27(9):35-39.
- [6] 唐洪,李婷,邱天爽,等.一种循环频率域内的脉搏包络合成方法[J].中国生物医学工程学报,2009,28(5):662-667.
- [7] 张贤达,保铮.非平稳信号分析与处理[M].北京:国防工业出版社,1998.
- [8] 李婷,邱天爽,唐洪,等.基于循环平稳特性的脉搏信号噪声评价指标[J].计算机工程与应用,2012,48(24):10-14.
- [9] 史建锋,朱良学.有限数据下循环谱的频域平滑对称式周期图法估计性能分析[J].数据采集与处理,2004,19(2):155-159.
- [10] 韩德民.基于循环平稳特征的频谱感知技术研究[D].电子科技大学,2012.
- [11] 黄知涛,周一宇.循环相关匹配滤波器设计[J].电子学报,2003,31(1):98-102.
- [12] Liu C, Zheng D, Murray A, et al. Modeling carotid and radial artery pulse pressure waveforms by curve fitting with Gaussian functions[J]. Biomed Signal Process Control, 2013, 8(5): 449-454.
- [13] Martin-Martinez D, Casaseca-de-la-Higuera P, Martin-Fernandez M, et al. Stochastic modeling of the PPG signal: a synthesis-by-analysis approach with applications[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2013, 60(9): 2432-2441.
- [14] 庞兴梅. PhysioNet信息资源解析及利用[J].医学信息学杂志,2010,(7):28-30.
- [15] 兰瑞芬,胡广书.高采样率下简单整系数频陷滤波器的设计[J].航天医学与医学工程,2008,21(2):152-156.
- [16] 李刚,门剑龙,孙兆敏,等.小波变换提高动态光谱法血液成分无创检测的精度[J].光谱学与光谱分析,2011,31(2):469-472.