

基于组合窗 Welch 法的心率变异性分析系统设计

张杰¹, 肖玲玲¹, 张攀登², 项里伟¹

1.江西理工大学信息工程学院,江西 赣州 341000; 2.中国科学院/深圳先进技术研究院工程与科学计算研究室,广东 深圳 518055

【摘要】目的:为了改善 Hamming 窗分辨率低的特性,提出了一种组合窗函数的方法。**方法:**该窗函数是由 Hamming 窗和矩形窗按照横向变化因子和纵向变化因子有机组合而成。**结果:**MATLAB 仿真结果表明组合窗的分辨率较 Hamming 窗提升 12.5%,频谱泄漏也较少,基本达到了在尽量控制频谱泄漏的前提下改善 Hamming 窗分辨率的目的。在改进窗函数的同时,分别在 MSP430 和 MATLAB 平台上使用组合窗的 Welch 算法,并计算两者之间的误差,结果表明误差均值及方差较小。归一化的功率谱密度图也表明得到的归一化功率密度整体上基本接近。**结论:**基本上实现了 Welch 算法的 MSP430 平台上的移植。

【关键词】组合窗;分辨率;频谱泄漏;Welch 法;心率变异性

【中图分类号】R318.03;Q4-33

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)02-0194-05

Design of heart rate variability analysis system based on Welch method using combination window

ZHANG Jie¹, XIAO Lingling¹, ZHANG Pandeng², XIANG Liwei¹

1. School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Laboratory for Engineering and Scientific Computing, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China

Abstract: Objective A combination window function is proposed in the paper to improve the low resolution ratio of Hamming window. **Methods:** The window function was composed of Hamming window and rectangular window according to horizontal and longitudinal variation factors. **Results** Simulation results from MATLAB showed that the resolution ratio of the combination window increased by 12.5% compared to the Hamming window, and that the leakage of frequency spectrum was effectively limited. At the same time, Welch algorithm using combination window was transplanted into the MSP430 and MATLAB platforms, respectively, and the errors between the results from MSP430 and MATLAB platforms were calculated. Results showed that the mean error and variance was smaller. Normalized power spectral density figure also indicated that the normalized power density from MSP430 and MATLAB platforms was basically close. **Conclusion** The analysis system based on Welch method using combination window basically realizes the transplantation of Welch algorithm on the MSP430 platform.

Keywords: combination window; resolution ratio; leakage of frequency spectrum; Welch method; heart rate variability

前言

心率变异性(Heart Rate Variability, HRV)是指持续心跳间 R-R 间期的微小涨落。HRV 是心脏交感神

经和迷走神经活动的紧张性和均衡性的一种体现,它是一种对自主神经性活动检测的一项尤为重要的非侵入性指标^[1]。目前 HRV 的分析方法分为时域分析方法、频域分析方法和非线性分析方法。

基于时域的分析方法,计算简单、意义直观、易于为临床医生所接受,但是它的灵敏度、特异性低,不能进一步区分心脏交感、迷走神经的张力及均衡性的变化,因此还要结合频域的分析方法。基于频域的分析方法有 Welch 法、Burg 法以及 Lomb-Scargle

【收稿日期】2016-08-01

【基金项目】深圳市孔雀技术创新项目(KQCX2015033117354152)

【作者简介】张杰,硕士研究生,研究方向:医学信号处理、嵌入式系统,
E-mail: jack19920101@outlook.com

【通信作者】肖玲玲,副教授,研究方向:信号处理、控制理论及应用,E-mail: gzxll@aliyun.com

法等。其中, Lomb-Scargle 法很少应用于临床研究^[2], Burg 法容易发生谱分裂和谱偏移^[3]。Welch 法就是把 R-R 间期序列化为有相互重叠的部分, 每个部分都用窗函数以减少频谱泄露, 再分别对这些数据进行傅里叶变换(FFT)得到每段的谱估计, 对得到的谱估计求均值即为信号的功率谱^[4]。即基于 Welch 的 HRV 频谱分析方法, 实际上就是平均周期图的一个修正。Welch 法相比周期图法, 方差性能改善明显, 如果选用主瓣较宽的非矩形窗, 造成谱峰加宽, 分辨率略有下降^[5]。但因为非矩形窗在两边渐变为零, 所以非矩形窗降低了由于选择矩形窗而导致重叠的段间统计相依的效应, 而且一个合适的非矩形窗可以减少旁瓣效应, 即谱泄露^[6]。因此基于 Welch 方法的 HRV 分析的关键是选用一个分辨率较好的窗函数, 而又不致于导致太严重的频谱泄露, 但是这两个参数是一个相对矛盾的参数。合理的窗函数可以减少因为数据截断带来的能量泄露, 继而减少谱估计的

系统误差^[7]。

1 组合窗函数

研究表明, 矩形窗能实现较好的分辨率, 但是其频谱泄露相对严重。而 Hamming 窗能较好控制频谱泄露, 但其分辨率不行。为了改善 Hamming 窗分辨率低的特性, 本文提出一种组合窗函数的方法, 该窗函数是由两个基本窗函数组合而成, 分别是 Hamming 窗和矩形窗, 式(1)表示 Hamming 窗的组成, 式(2)表示组合窗函数的组成。其中, M 为整个组合窗函数的宽度, α 为横向变化因子, β 为纵向变化因子, $\alpha \in (A \cap B)$, $\beta \in A$, $A = \{x | 0 < x < 1\}$, $B = \{x | x * M = x * M\}$ 。MATLAB 仿真实验结果表明, 当 $\alpha = 0.875$ 、 $\beta = 0.05$ 时, 该组合窗的频谱泄露较少, 分辨率较高, 此时的组合窗函数的时域图和单边频谱图如图 1 和图 2 所示, 图 3 和图 4 分别是矩形窗函数和 Hamming 窗函数的单边频谱图。

$$\text{ham}(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right) \quad 0 \leq n < M \quad (1)$$

$$w(n) = \begin{cases} (1-\beta)\text{ham}\left(\frac{n}{\alpha}\right) \\ (1-\beta)*1 + \beta \left[\text{ham}\left(\frac{(n-\alpha(M-1)/2)}{(1-\alpha)}\right) \right] \\ (1-\beta) \left[\text{ham}\left(\frac{(n+(\alpha-1)M)}{\alpha}\right) \right] \end{cases} \quad \begin{matrix} 0 \leq \frac{n}{M-1} < \frac{\alpha}{2} \\ \frac{\alpha}{2} \leq \frac{n}{M-1} < \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \\ \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \leq \frac{n}{M-1} \leq 1 \end{matrix} \quad (2)$$

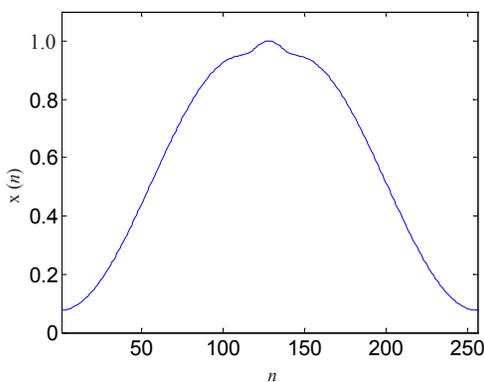


图1 组合窗的时域图

Fig.1 Time-domain graph of combination window

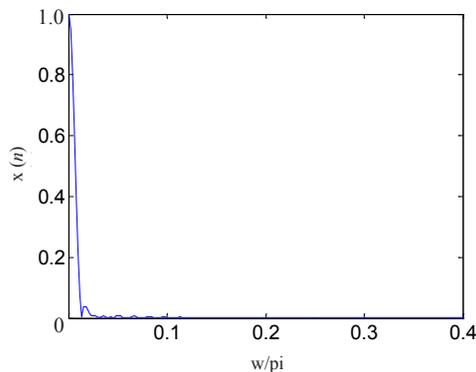


图2 组合窗的单边频谱图

Fig.2 Unilateral spectrum graph of combination window

从图 2~图 4 可以看出, 组合窗函数的频谱泄露相对矩形窗较少而基本接近 Hamming 窗, 而经过计算 Hamming 窗函数的主瓣带宽为 $8\pi/M$, 组合窗函数的主瓣带宽为 $7\pi/M$, 窗函数的主瓣宽度越窄, 分辨率越高。由此可知相应的分辨率相比 Hamming 窗改善

了 12.5%, 基本上达到了在尽量控制频谱泄露的前提下改善 Hamming 窗分辨率的目的。

2 在 MSP430 平台上的实现

基于组合窗函数的 Welch 法分析 HRV 整个系统

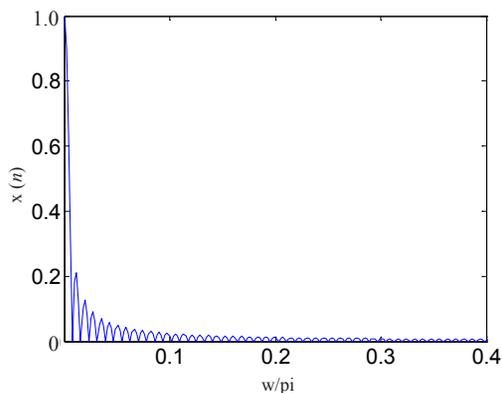


图3 矩形窗的单边频谱图

Fig.3 Unilateral spectrum graph of rectangular window

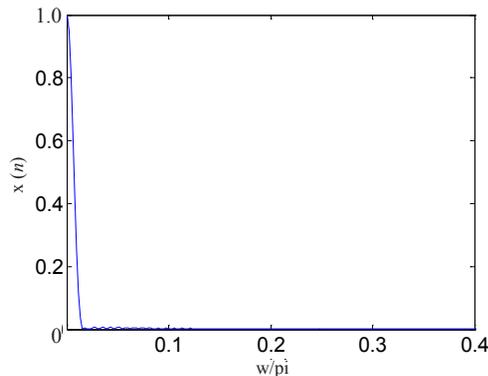


图4 Hamming窗的单边频谱图

Fig.4 Unilateral spectrum graph of Hamming window

在MSP430平台上单次运行实现的功能框图见图5,处理器芯片选择拥有10 kB容量RAM的MSP430F1611

芯片,系统时钟选择8 MHz时钟。

对数据的预处理包括对数据的放大、去除线性

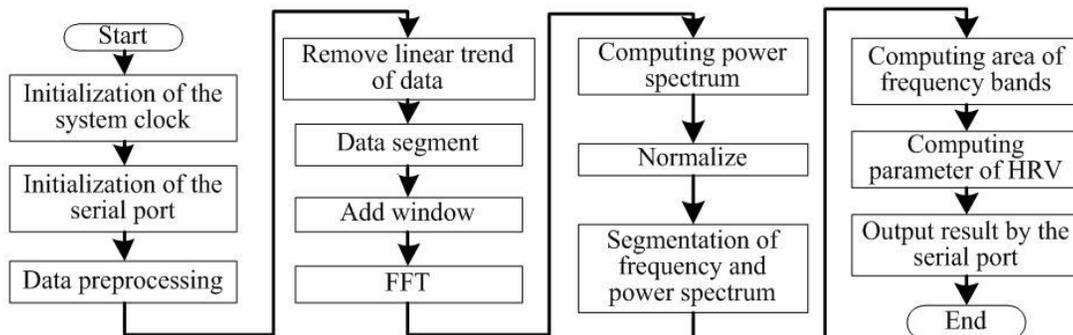


图5 系统运行框图

Fig.5 Diagram of system

趋势以及减去均值以便为FFT变换做准备,去除线性趋势主要采用最小二乘拟合方法剔除原始数据的线性趋势。采用最小二乘拟合法剔除原始数据的线性趋势为式(3),其中,data为原始数据经放大后的数组,N为数组长度。

$$\begin{cases} \text{sum_t2} = \sum_{n=0}^{N-1} (n - \frac{N}{2} + 0.5)^2 \\ \text{sum_t} = \sum_{n=0}^{N-1} (n - \frac{N}{2} + 0.5) \\ a = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \text{data}(n) - \frac{N-1}{2} * \frac{\text{sum_t} * \text{data}(n)}{\text{sum_t2}} \\ \text{data}(n) = \text{data}(n) - (a + \frac{\text{sum_t} * \text{data}(n)}{\text{sum_t2}} * n) \end{cases} \quad (3)$$

在经过对原始N个数据一系列预处理之后对数据进行分段加窗,窗函数选择上一节介绍的组合窗函数。研究表明,重叠分段的方法效果更佳,信号的谱峰加宽,而噪声谱均在0 dB附近,更为平坦^[8]。所以窗函数的重叠率选择50%,分为L段,每段数据宽

度为M个数据,把每一段加窗后的数据分别进行FFT变换。采用FFT变换的优势节省系统运行时间,而且相比AR算法,采用FFT变换的Welch算法能获得更高精度的HRV谱估计^[9]。

每段数据经过FFT变换后进行归一化处理,归一化因子为式(4)。最后对得到3个段数据的对应位取数据平均,得到一个平均数据段,整个过程表述为式(5)。其中,psd(f)为FFT变换后的数组,PSD(f)为经过归一化以及数据平均的数据数组。

$$U = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w^2(n) \quad (4)$$

$$\text{PSD}(f) = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} \frac{1}{MU} \text{psd}(f) \quad (5)$$

频域分析的数据包括:高频以及低频的归一化分量计算见式(6)及式(7),交感神经张力与迷走神经张力平衡状态值的计算见式(8)^[10]:

$$\text{aHF}_{\text{nu}} = \text{aHF} / (\text{aLF} + \text{aHF}) \quad (6)$$

$$aLF_{n.u.} = aLF / (aLF + aHF) \quad (7)$$

$$P_{ratio} = aLF / aHF \quad (8)$$

在 MSP430 上实现对 HRV 信号的频谱分析,除了基本的数据处理功能外,相关的功能主要有通过 IO 口输出高低电平实现对运行时间的追踪以及相关数据的串口发送。

3 实验结果及分析

本实验所用的原始心率信号 R-R 间期数据来源于复杂生理信号研究资源网站 PhysioNet (<https://www.physionet.org>)。另外 PhysioNet 官网里面有相关 MATLAB 程序,本文可以将其作为一个参照对象,

不过例程里面所使用窗函数为 Hamming 窗,本实验应改为组合窗。实验中选用 6 组数据,每组数据含有 512 个 R-R 间期数据,分为 3 段,每段 256 个数据,数据重叠率为 50%。HRV 信号的频域参数:极低频 VLF 为 0.00~0.04 Hz,低频 LF 为 0.04~0.15 Hz,高频 HF 为 0.15~0.40 Hz。表 1 为整个系统运行的结果以及使用组合窗的 MATLAB 例程输出结果及两者之间的误差。本文主要比较的是两个数据高频及低频归一化分量即表中的 Power(n.u.)以及交感神经张力与迷走神经张力的平衡状态值,即表中的 aLF/aHF 的数据误差,表中误差为相对误差。表 2 为 Welch 算法在两个平台之间的误差均值及方差。

表 1 两个平台的输出结果及误差

Tab.1 Output result and error of MATLAB platform and MSP430 platform

Data group	Frequency band	MATLAB platform		MSP430 platform		Error/%	
		Power (n.u.)	aLF/aHF	Power (n.u.)	aLF/aHF	Power (n.u.)	aLF/aHF
1	VLF+LF	0.815	4.394	0.820	4.569	0.614	3.983
	HF	0.185		0.180		2.703	
2	VLF+LF	0.810	4.261	0.797	3.937	1.605	7.604
	HF	0.190		0.203		6.842	
3	VLF+LF	0.791	3.790	0.783	3.618	1.011	4.538
	HF	0.209		0.217		3.828	
4	VLF+LF	0.842	5.324	0.841	5.281	0.119	0.808
	HF	0.158		0.159		0.633	
5	VLF+LF	0.792	3.806	0.788	3.721	0.505	2.233
	HF	0.208		0.212		1.923	
6	VLF+LF	0.892	8.263	0.886	7.767	0.673	6.003
	HF	0.108		0.114		5.556	

VLF:Very low frequency; LF: Low frequency; HF: High frequency

表 2 两个平台实现的误差均值及方差

Tab.2 Mean and variance of error of MATLAB platform and MSP430 platform

Frequency band	Mean error/%		Variance of error/%	
	Power (n.u.)	aLF/aHF	Power (n.u.)	aLF/aHF
VLF+LF	0.754	4.195	0.214	5.062
HF	3.581		4.468	

选取一组测试数据,将使用组合窗的 Welch 法在 MSP430 平台上计算的中间结果 PSD 值和 f 值通过串口发送出来记录在 txt 文本中,然后使用 MATLAB 画出图 6 所示的来自 MSP430 归一化后的功率谱。图 7 为使用组合窗的 Welch 法在 MATLAB 平台上输出的

归一化后的功率谱。

综合分析表 2、图 6 和图 7 可以看出,使用组合窗函数 Welch 算法的两个平台之间误差较小,功率谱密度图的整体基本接近没有引起大的频谱泄漏,基本实现了对 Welch 算法的移植。但是在信号的信噪比较低的情况下,将无法区分信号与噪声,这是 Welch 法在实际应用中的一个局限性^[11]。

在实验系统初始化时,利用 IO 口置高电平,在系统结束运行时,将 IO 口置低电平来追踪系统运行时间。循环运行系统利用示波器观看高电平维持时间即为系统运行时间,这对于有实时性要求的产品尤为重要。本实验系统运行时间为 2.48 s,基本满足实时性要求一般的场合。

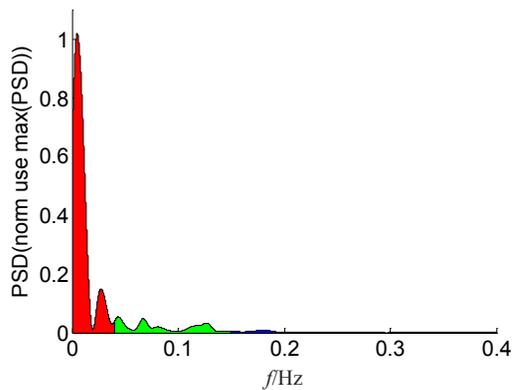


图6 MSP430平台计算的功率图谱

Fig.6 Power spectrum from MSP430 platform

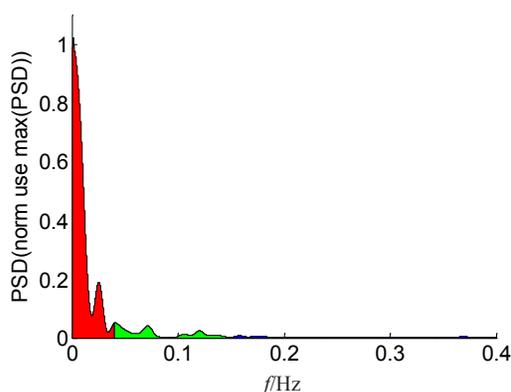


图7 MATLAB平台计算的功率图谱

Fig.7 Power spectrum from MATLAB platform

4 结论

本文提出一种将Hamming窗和矩形窗按照横向变化因子和纵向变化因子有机组合的组合窗方法, MATLAB仿真结果表明组合窗的频谱泄漏相比矩形窗有所改善,分辨率也比Hamming高12.5%。而在MSP430上移植使用组合窗的Welch算法,并同MATLAB上使用组合窗的Welch算法仿真结果分别进行对比,结果表明使用组合窗的Welch算法在两个平台实现的误差均值和方差都较小,基本实现了使用组合窗Welch算法的移植。另一方面,对比分别在MSP430和MATLAB上使用组合窗的Welch算法,发现两个功率谱密度曲线基本接近。从算法在MSP430上的处理能力可以看到,在时间上能满足一定的实时性要求,在空间上能一次性处理512个数据的HRV频谱分析,实现了短时HRV分析。相比传统Welch方法,本文使用组合窗函数的Welch算法,在控制频谱泄漏的前提下,提高系统的分辨率,而且计算过程中采用最小二乘拟合法剔除了原始数据的线性趋势,将数

据归一化能有利于比较,最后利用IO口追踪系统运行时间。不过由于处理的数据量比较大,实验中发现对MSP430的内存消耗较大。

【参考文献】

- [1] 王步青,王卫东. 心率变异性分析方法的研究进展[J]. 北京生物医学工程, 2007, 26(5): 551-554.
WANG B Q, WANG W D. Research progress of the methods for heart rate variability analysis[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2007, 26(5): 551-554.
- [2] ESTEVEZ M, MACHADO C, LEISMAN G, et al. Spectral analysis of heart rate variability[J]. Int J Dis Hum Dev, 2016, 15(1): 5-17.
- [3] 丁玉美, 阔永红, 高新波. 数字信号处理—时域离散随机信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 158.
DING Y M, KUO Y H, GAO X B. Digital signal processing—discrete random signal processing [M]. Xidian: Xi'an University Press, 2002: 158.
- [4] TARVAINEN M P, NISKANEN J P, LIPPONEN J A, et al. Kubios HRV-heart rate variability analysis software[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2014, 113(1): 210-220.
- [5] 邓泽怀, 刘波波, 李彦良. 常见的功率谱估计方法及其Matlab仿真[J]. 电子科技, 2014, 27(2): 50-52.
DENG Z H, LIU B B, LI Y L. Common power spectrum estimation methods and matlab simulation[J]. Electronic Science and Technology, 2014, 27(2): 50-52.
- [6] 余训锋, 马大玮, 魏琳. 改进周期图法功率谱估计中的窗函数仿真分析[J]. 计算机仿真, 2008, 25(3): 111-114.
YU X F, MA D W, WEI L. Simulation analysis of window function in power spectrum estimation based on modified periodogram [J]. Computer Simulation, 2008, 25(3): 111-114.
- [7] 朱学旺, 刘青林, 张思箭. Welch谱估计的随机误差与置信度[J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 34-38.
ZHU X W, LIU Q L, ZHANG S J. Random error and confidence level of Welch spectral estimation [J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(1): 34-38.
- [8] 李铮, 武林俊, 杨晓东. 周期图谱估计及其改进方法的Matlab仿真[J]. 电子质量, 2010(7): 15-16.
LI Z, WU L J, YANG X D. Periodogram and Welch PSD estimation and simulation via matlab[J]. Electronic Quality, 2010(7): 15-16.
- [9] POLIAKOVA N, DIONNE G, DUBREUIL E, et al. A methodological comparison of the Porges algorithm, fast Fourier transform, and autoregressive spectral analysis for the estimation of heart rate variability in 5-month-old infants[J]. Psychophysiology, 2014, 51(6): 579-583.
- [10] 徐文会, 刘开华, 王丽婷. 使用改进Welch法估计心率变异功率谱分析人体疲劳程度[J]. 生物医学工程学杂志, 2016, 33(1): 67-71.
XU W H, LIU K H, WANG L T. Estimation of power spectrum of heart rate variability using improved Welch method to analyze the degree of fatigue[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2016, 33(1): 67-71.
- [11] 杨晓明, 晋玉剑, 李永红. 经典功率谱估计Welch法的MATLAB仿真分析[J]. 电子测试, 2011(7): 101-104.
YANG X M, JIN Y J, LI Y H. MATLAB simulation and analysis of the Welch method in the classical power spectrum estimation [J]. Electronic Test, 2011(7): 101-104.

(编辑:陈丽霞)