

基于Choi-Williams分布的心音信号时频分析

高清河^{1,2}, 刚 晶¹, 王和禹¹, 刘海英¹

1. 辽宁中医药大学信息工程学院, 辽宁 沈阳 110847; 2. 东北大学理学院, 辽宁 沈阳 110004

【摘要】目的:通过心音信号的时频特性分析, 为心血管疾病提供辅助诊断。**方法:**首先对心音信号进行阈值去噪, 然后基于非线性时频表示Choi-Williams分布对心音信号进行时频分析, 给出正常心音与心律过快心音的三维图和等高线分布。**结果:**基于平稳小波的Penalized high 硬阈值去噪效果最好, Choi-Williams分布三维图可清晰地看出时间-频率平面上的能量分布特性, 而心音信号的各个部分在等高线分布的时频面上能够清晰地表现出来。**结论:**通过Choi-Williams分布对心音信号时频分析, 从一个新的视角较好地反映出了人体心音信号的一些本质性特征, 有望成为心血管疾病诊断的一种重要判别依据。

【关键词】Choi-Williams分布; 心音信号; 时频分析; 小波阈值去噪

【中图分类号】R318; TP391

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2015)04-0503-03

Time-frequency analysis of heart sound signals based on Choi-Williams distribution

GAO Qing-he^{1,2}, GANG Jing¹, WANG He-yu¹, LIU Hai-ying¹

1. College of Information Engineering, Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, Shenyang 110847, China; 2. College of Science, Northeastern University, Shenyang 110004, China

Abstract: Objective To provide auxiliary diagnosis for cardiovascular disease by analyzing the time-frequency characteristics of heart sound signals. **Methods** The heart sound signals were employed to threshold denoise. And then Choi-Williams distribution based on nonlinear time-frequency was applied to analyze the time-frequency distribution of heart sound signals, which provided three-dimensional graphs and contour lines of normal heart sounds and the heart sound with quick rhythm, respectively. **Results** Penalized high hard threshold denoising based on stationary wavelet had the best denoising effect. The energy distribution characteristics on the surface of time-frequency were clearly presented on the three-dimensional graph of Choi-Williams distribution, and various parts of the heart sound signal were clear on the surface of the time-frequency contour distribution. **Conclusion** The time-frequency analysis of heart sound signals based on Choi-Williams distribution can preferably reflect some essential characteristics of human heart sound signals from a new perspective. The application of Choi-Williams distribution in the heart sound signals is expected to become a kind of important criterion on the diagnosis of cardiovascular disease.

Key words: Choi-Williams distribution; heart sound signals; time-frequency analysis; wavelet threshold denoising

前言

心音信号是一种具有非平稳特性的时变生物学信号, 时频分析已经被证明是研究时变信号强有力的工具之一, 是研究非平稳信号的一种有效办法, 在非平稳信号的处理中具有突出的优越性^[1]。时频分析方法可以分为线性时频表示和非线性时频表示, 线性时频表示只能提供粗略的时频分布, 难以描述信号的瞬时功率谱密度, 其优点是在多信号进行分析时不会产生交叉项, 其中以短时傅里叶变换和

小波变换应用最为广泛^[2-4]。而二次型非线性时频表示方法是一种更直接更合理的信号分析方法, 其中典型的方法为维格纳(Wigner-Ville)分布。Wigner-Ville分布是一种典型的Cohen类时频分布, 它具有较高的时频分辨能力和时频表示特性, 但其缺点是难以消除交叉干扰项^[5-6]。而与Wigner-Ville分布同处Cohen类的Choi-Williams分布, 即消除了Wigner-Ville分布的交叉干扰项, 同时也提高了运算的效率, 在工程实践及信号处理等领域得到了广泛应用。

【收稿日期】2015-01-25

【基金项目】辽宁中医药大学非医药专业项目(601152)

【作者简介】高清河(1977-), 男, 博士, 讲师。E-mail: gqhscu@163.com。

1 基本原理

1.1 Cohen类时频分布

由于理论物理学和力学的应用需求, 诺贝尔物理学奖获得者 Wigner 于 1932 年提出了 Wigner 分布。1948 年, Ville 把 Wigner 分布引入信号分析领域, 提出了 Wigner-Ville 分布。Cohen 在对 Wigner-Ville 分布进行进一步研究时发现, 多种时频分布从数学形式看, 只是 Wigner-Ville 分布的一种变形, 可以采用统一的形式进行表示^[7-9]:

(1)

式中, $x(t)$ 为信号, $K(t, \tau)$ 为 Cohen 类时频分布的核函数, $\eta(t)$ 为模糊函数:

(2)

1.2 Wigner-Ville 分布(WVD)

在 Cohen 类时频分布中, 取 $\eta(t) = \delta(t)$, 信号的 Wigner-Ville 分布如下:

(1) 信号的时域表达式

(3)

(2) 信号的频域表达式

(4)

由(1)和(2)可知 Wigner-Ville 分布的时域与频域之间存在着对称性、时移不变性以及频移不变性等^[10-11]。

1.3 Choi-Williams 分布(CWD)^[12]

在 Cohen 类时频分布中, 取 $\eta(t) = \exp(-j\pi\alpha t^2)$, 并满足 $\alpha > 0$ 时, 信号 $x(t)$ 的 Choi-Williams 分布如下:

(5)

由于 CWD 满足时移和频移不变、时间边缘和频率边缘特性, 以及时间支持和频率支持特性(), 所以 Choi-Williams 分布反映了心音信号在时间-频率平面上的能量分布。在处理幅度和频率变化较大的信号时取较大的 (); 反之取较小的 (), 当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, Choi-Williams 分布能获得较高的时频分辨率并可以对较多的交叉项具有抑制效果^[8]。

2 心音信号时频分析

采用 MATLAB 7 实验环境, 对正常心音以及心律加快心音的音频信号进行采样, 采样频率为 11 025 Hz, 量化值为 16 bit, 截取 10 000 个采样点进行分析。由

于心音信号是一种微弱的人体生理特征信号, 心音采集过程中不可避免地会混入环境噪声、工频噪声、肌电噪声、采集设备与皮肤的摩擦等多种噪声, 因此在时频分析之前要对采集的心音信号进行去噪。

2.1 小波阈值去噪^[13-15]

采用基于平稳小波的阈值去噪方法, 通过对各个小波基实验, 选用小波函数 Daubechies5(db5), 分解层数为 3 层, 用 σ 来衡量去

噪的效果, 式中 $x(t)$ 表示原始信号, $\hat{x}(t)$ 表示经处理后的估计信号。

综合比较各种阈值去噪方法, Penalized high 硬阈值对应的评价指标 SNR 数值最大, 去噪效果最好(表 1)。因此本文在心音信号时频分析之前, 首先对正常心音以及心律加快的心音进行 Penalized high 硬阈值去噪方法, 见图 1。

2.2 Choi-Williams 分布对心音信号的分析

为使 Choi-Williams 分布用于心音信号并得到最好的分析效果, 本文中参数取值如下: $\alpha = 100$, 时域窗函数和频域窗函数均采用 Kaiser 窗, 时窗的长度为 7, 频窗长度为 21。

3 结 论

本文首先对心音信号进行阈值去噪, 经实验对比发现基于平稳小波的 Penalized high 硬阈值去噪效果最好。在此基础上, 提出了基于 Choi-Williams 分布对心音信号进行时频分析的方法, 给出了正常心音与心律过快心音的三维图(图 2)和等高线(图 3)。通过 Choi-Williams 分布三维图可清晰地看出时间-频率平面上的能量分布特性, 而 Choi-Williams 分布的等高线分布图是三维图在时频面上的投影, 心音信号的各个部分在时频面上都能清晰地表现出来。从图中可以看出, 正常心音和心律过快心音的 Choi-Williams 分布具有明显的不同。正常心音信号的能量分布集中, 主要集中在 0.2 s~0.4 s 和 0.6 s~0.8 s 间, 峰值位置的出现较为规律, 峰值出现具有周期性。而心律过快心音的能量分散, 能量峰值出现的时间位置不具有周期性, 峰值位置的出现杂乱, 峰值间的时间间隔较短。由此可见, Choi-Williams 分布对心律加快的时

表 1 平稳小波变换阈值去噪

Tab.1 Threshold denoising based on stationary wavelet transform (SWT)

SWT	Sqtw-olog	Rigr-sure	Heur-sure	Mini-maxi	Penalized high	Penalized medium	Penalized low
SNR(soft)	97.280 9	108.737 3	108.750 3	99.640 1	89.620 6	96.373 9	97.200 5
SNR(hard)	98.114 2	128.789 1	133.206 2	101.373 1	137.345 6	103.307 1	104.182 6

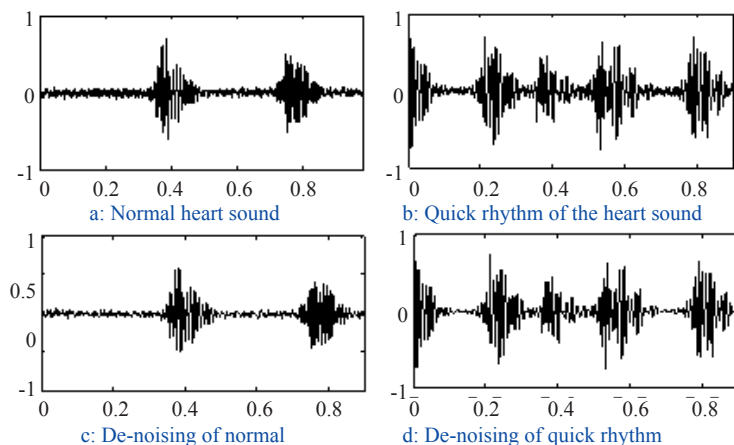


图1 信号降噪前后对比 (Penalized high 阈值)

Fig.1 Comparison between original signal and de-noising signal (penalized high)

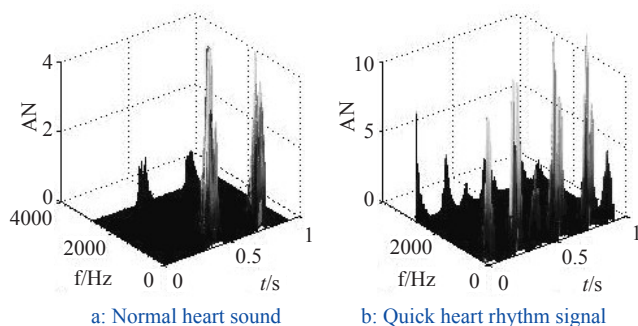


图2 正常心音信号与心律过快心音的三维图

Fig.2 Three-dimensional diagram of normal heart sound and quick heart rhythm signal

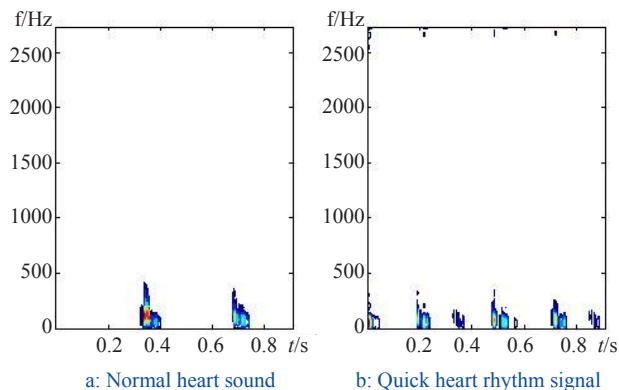


图3 正常心音信号与心律加快信号的等高线

Fig.3 Contour line of normal heart sound and quick heart rhythm signal

频分析与医学的诊断是一致的, 随着 Choi-Williams 分布在心音信号时频分析中的不断深入, 对心音信号样本的时频分布特征进行分类, 建立心音信号数据库, 为心血管疾病的诊断提供计算机辅助。

【参考文献】

[1] 李战明, 韩 阳, 韦 哲. 心音信号时频分析方法研究[J]. 中国医学

装备, 2012, 9(6): 1-4.
 Li ZM, Han Y, Wei Z. Methods for time-frequency analysis of heart sound[J]. China Medical Equipment, 2012, 9 (6): 1-4.
 [2] 陈天华. 基于现代信号处理技术的心音与心电信号分析方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 90-109.
 Chen TH. Analysis method of heart sound signal and ECG signal based on modern signal processing technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2012: 90-109.
 [3] 郭兴明, 袁志会. 基于小波变换和经验模式分解的心音信号研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2012, 31(1): 39-44.
 Guo XM, Yuan ZH. Research on heart sounds signal based on wavelet transform and empirical mode decomposition [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2012, 31(1): 39-44.
 [4] 张磊邦, 唐荣斌, 蒋建波, 等. 心音信号的预处理与包络提取算法研究[J]. 生物医学工程学报, 2014, 31(4): 734-741.
 Zhang LB, Tang RB, Jiang JB. et al. Research on pretreatment and envelope extraction algorithm of heart sound signal, journal of biomedical engineering[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2014, 31(4): 734-741.
 [5] 田 琳, 陈颖频, 梁华兰. 平滑伪 Wigner-Ville 分布在地震信号处理中的应用[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 1-4.
 Tian L, Chen YP, Liang HL. The application of smoothing pseudo Wigner-Ville distribution in seismic signal processing [J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2013, 32 (3): 1-4.
 [6] 谢 斌, 严碧歌. 基于 Wigner-Ville 分布的心电信号时频分析[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 41-45.
 Xie F, Yan BG. The time-frequency analysis of ECG signals based on Wigner-Ville distribution [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2012, 40(2): 41-45.
 [7] Cohen L. Time-frequency distribution: A review[J]. IEEE Proc, 1989, 77(7): 941-981.
 [8] Williams J, Kernel W. Design for reduced interference distributions [J]. IEEE TSP, 1992, 40(2): 402-412.
 [9] 陈若珠, 李军红, 韦 哲. 基于 Cohen 类时频分布的心音信号分析[J]. 医疗卫生装备, 2011, 32(7): 17-19.
 Chen RZ, Li JH, Wei Z. Analysis of heart sounds signal based on Cohen time-frequency distribution[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2011, 32(7): 17-19.
 [10] Classen TA, Mecklenbräuker WF. The Wigner distribution: A tool for time-frequency signal analysis. Part I: Continuous-time signals [J]. Phillips J Res, 1980, 35(3): 217-250.
 [11] Classen TA, Mecklenbräuker WF. The Wigner distribution: A tool for time-frequency signal analysis. Part II: Continuous-time signals [J]. Phillips J Res, 1980, 35(4): 276-300.
 [12] Choi H, Williams W. Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels[J]. IEEE TASSP, 1989, 37(6): 862-871.
 [13] Donoho DL. De-Noising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans Inform, 1995, 41(3): 613-627.
 [14] Donoho DL, Johnstone IM. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425-455.
 [15] 罗 强. 基于小波分析的心电信号去噪研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2006.
 Luo Q. Research on ECG signal denoising based on wavelet analysis [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2006.