

PSD-Based Feature Extraction for the Third Heart Sound Analysis

Shuping Sun, Hui Li, Biqiang Zhang, Tingting Huang, Xiaohang Li, Xu Zhang

Nanyang Institute of Technology, Nanyang Henan
Email: shp_sun@yeah.net, lihui_jhh@163.com

Received: Feb. 19th, 2020; accepted: Mar. 5th, 2020; published: Mar. 12th, 2020

Abstract

In view of the complex characteristics of the third heart sound (S3) in the frequency-domain, this study employs a power spectrum density (PSD)-based frequency features extraction method to evaluate the characteristics of the S3 and to discriminate normal from abnormal S3. The stages corresponding to this study are arranged as follows: 1) The heart sound is firstly collected via an electronic stethoscope and is preprocessed based on wavelet decomposition to eliminate the background noise and retain the effective signal. 2) The PSD-based power spectrum is generated for the artificially selected S3. And then, an envelope for the power spectrum is based to extract the frequency features over a given threshold value (*Thv*) line. 3) By comparatively analyzing the normal S3 and abnormal S3 from the patient with mitral regurgitation heart disease, the statistical results expressed as *Thv*-Frequency range (mean \pm standard deviation) Hz show that the features of normal S3 are distributed in 0.2 - (56.0832 \pm 6.3373) Hz, 0.8 - (21.0824 \pm 2.2393) Hz, while those of abnormal S3 are in 0.2 - (126.7094 \pm 27.0634) Hz, 0.8 - (64.7820 \pm 11.6584) Hz.

Keywords

Power Spectrum Density, Third Heart Sound, Wavelet Transform, Envelope Line, Threshold Line, Feature Extraction

基于功率谱第三心音特征提取研究

孙树平, 李 辉, 张弼强, 黄婷婷, 李肖航, 张 旭

南阳理工学院, 河南 南阳
Email: shp_sun@yeah.net, lihui_jhh@163.com

收稿日期: 2020年2月19日; 录用日期: 2020年3月5日; 发布日期: 2020年3月12日

摘要

针对第三心音在频域上的复杂特征,本研究采用基于功率谱密度的频率特征提取方法,对第三心音的特征进行评价,并将正常和异常的第三心音进行区分。与本研究相对应的阶段安排如下:1)首先通过电子听诊器采集心音,并基于小波分解对其进行预处理,消除背景噪声,保留有效信号。2)人为选择的第三心音生成基于PSD的功率谱。然后,基于功率谱包络提取给定阈值线上的频率特征。3)通过对正常第三心音和来自二尖瓣回流心脏病患者的异常第三心音对比分析,以阈值 $-(\text{平均值} \pm \text{标准差})$ Hz表示的统计结果显示,正常第三心音的特征分布在 $0.2 \sim (56.0832 \pm 6.3373)$ Hz、 $0.8 \sim (21.0824 \pm 2.2393)$ Hz,异常S3为 $0.2 \sim (126.7094 \pm 27.0634)$ Hz、 $0.8 \sim (64.7820 \pm 11.6584)$ Hz。

关键词

功率谱密度函数,第三心音,小波变换,包络线,阈值线,特征提取

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来心血管疾病的患病率和死亡率均呈现持续增长趋势,并且心血管疾病死亡人数连续多年位居疾病死亡人数之首。根据《中国心血管报告 2018》[1],2016年农村因心血管疾病死亡人数占全部因疾病死亡人数的45.50%,城市因心血管疾病死亡人数占全部死亡人数的43.16%,如图1所示。依据心血管疾病患病率持续上升的趋势,推测我国现有2.9亿患者,其中心脏病占有很大比重。我国心血管病防治工作面临严峻挑战。现代对心音信号频率分析研究刻不容缓。此外,心脏的功能状态还可以在心音信号上体现,心音信号含有心脏各个部分(如心房、心室、大血管、心血管及各个瓣膜)功能状态的大量病理生理信息以及心脏本身之间相互作用的生理和病理之间的信息[2][3]。在当代,医疗器械是诊断心血管疾病的主要仪器,心电和心音是检测心血管疾病最常用的两种手段。

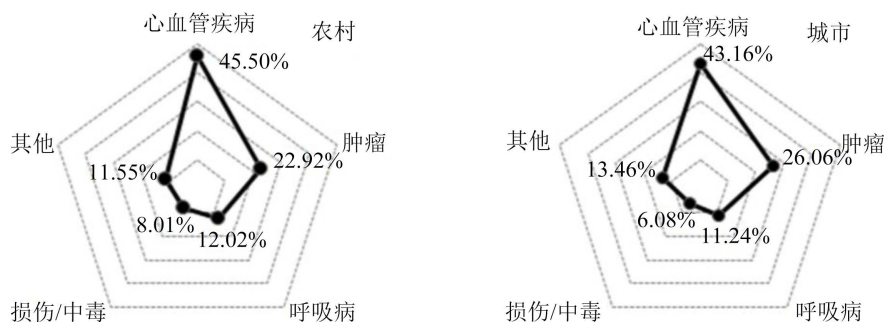


Figure 1. The main cause of death in rural and urban residents in China in 2016

图 1. 2016 年中国农村和城市居民主要疾病死因构成

第三心音基本发生在心室舒张早期,标志着心室快速充盈期结束,多数情况下发生在健康的儿童和年轻人身上[4][5]。而在成年人身上检测出第三心音则是各种心脏瓣膜病变、肺动脉高压、缺血性心脏病

等病发的一种潜伏的内在征兆[5][6]。因此检测第三心音以及对第三心音频率分析研究具有十分重要的临床意义[7]。心音听诊是利用听诊器诊断心脏发出的声音—心音，是一种古老的诊断心脏疾病的方法。传统的听诊方式是医生凭经验用听觉分析心音信号，对医生的经验要求很高，而且听觉听诊远远不能满足临床上高精确度的要求。所以对心音的数字分析引起很多研究者的关注。心音的改变和心脏杂音的出现，一般是器质性心脏病的最早体征，分析心音的频率特性为分辨正常和异常心音提供了重要的理论根据。较为典型的时频分析方法有小波变换、自回归模型(autoressive model, ARM)、广义Cohen类时频分布等，小波变换能有效的降低噪声。鉴于此本文采用小波变换对心音信号进行预处理降噪，基于功率谱采用阈值线法对心音包络线进行特征提取，以实现第三心音的频率分析。本研究所提算法势必为心音信号分类提供可靠的分类保证。

2. 方法

综上所述，本研究针对第三心音在频率分布具有复杂特征，提出一种基于功率谱结合包络线法的第三心音研究，总体安排如图2所示：

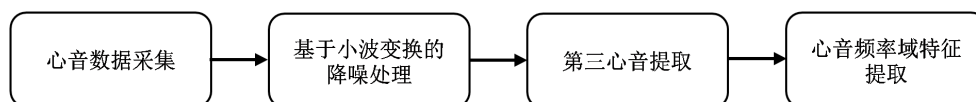


Figure 2. Heart sound frequency analysis flow chart

图2. 心音频率分析流程框图

2.1. 心音数据采集

本课题小组采用3M公司的3M-3200电子听诊器采集心音数据。3M-3200型电子听诊器不仅可以实时存储心音信号，而且能够导出wav文件，便于进行后续分析处理，所以本研究采用3M-3200型电子听诊器采集记录心音。采样频率设置为44.1 kHz，灵敏度调节至最高档，频带宽度设置为20 Hz~20 kHz，记录时间30~60 s，要求被测者30~40°仰卧，尽量屏住呼吸，其数据采集实例如图3所示。



Figure 3. Heart sound signal data acquisition example diagram

图3. 心音信号数据采集实例图

2.2. 心音信号的降噪处理

我们用信号采集系统所采集的心音信号大多是有噪声的。对于微弱的心音信号中噪声的存在使我们对于心音信号的研究分析带来了极大的困难，噪声会使我们所采集心音信号分析产生极大的误差，我们需要通过降噪处理来保留有效信号，因此对于心音信号降噪在我们研究心音信号中发挥着极大的作用[8]。我们可以利用小波变换对心音信号降噪。其公式如下：

对于任意的 $f \in L^2$ 及 $t \in R$ ，若在 t 处连续，则有小波变换的反变换如公式(1)：

$$f(t) = \frac{1}{C_\varphi} \int \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (1)$$

小波变换的时频窗口特性与短时傅里叶的时频窗口不一样。其窗口形状为两个矩形如公式(2)：

$$[b - a\Delta\varphi, b + a\Delta\varphi] \times [(\pm\omega_0 - \Delta\varphi(\omega))/a, (\pm\omega_0 + \Delta\varphi(\omega))/a] \quad (2)$$

在对信号进行降噪处理时我们可以把噪声信号看成是一个普通信号，并利用 MATLAB 软件对心音信号进行小波分析。因为小波变换具有时域频率局部化特性，保留由主要信号控制的小波系数，发现并去掉有噪声控制的小波系数，降噪的理论依据：经小波分解后，信号的小波系数幅度值要大于噪声的系数幅值[9] [10]。利用小波变换对心音信号降噪与利用小波变换对图像降噪的原理主要都是阈值的选择，这就显得阈值的选择对于小波变换降噪对信号尤为重要[11]。常见的小波与之函数包括硬阈值函数和软阈值函数，它们都是将绝对值小于给定阈值的系数置零，若大于给定的硬阈值系数则给予保留，软阈值则是将小波系数减去阈值[12]。再设计阈值时根据噪声小波系数的特点，随着分解层数的改变而自适应的变化[13]。经过多次实验比较最终在选择的心音信号中分别采用了不同的小波频率分解降噪的范围进行比较。在本文中选用的是对于心音信号降噪较好的几个小波分解频率范围，再选取最佳的小波频率分解的范围。对心音信号进行 5 层分解心音信号的降噪效果最佳，即在小波分解频率在 21.5~689 Hz 范围内既能保持原始心音成分的同时还能把多余的噪声过滤掉，降噪效果如图 4 所示。

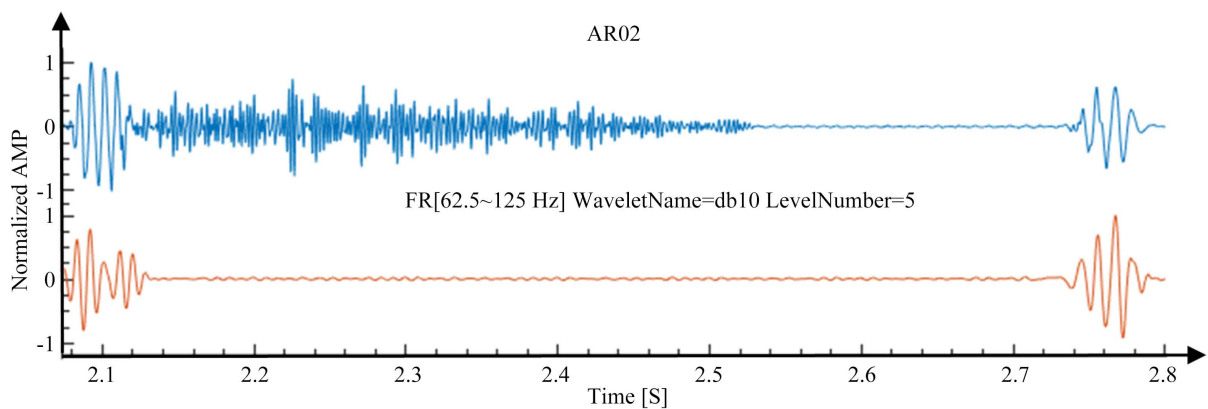


Figure 4. Heart sound signal noise reduction effect diagram

图 4. 心音信号降噪效果图

2.3. 第三心音的提取

第三心音的提取是在基于 MATLAB 平台的自制可执行文件中，将采集的心音信号经过小波分解降噪处理后，通过手动绘制矩形框以选中该段心音信号中的第三心音信号，如图 5 中粉色矩形框所示。提取方法如下所述，据长时间研究经验所得，第一心音音调低沉，持续时间较长(约 0.15 秒)，第二心音频

率较高，持续时间较短(约 0.08 秒)，第一第二心音时间间隔短，第三心音发生在第二心音后 0.1~0.2 秒，第四心音发生在第一心音前的低频振动，持续约 0.04 秒，通过以上经验，就可以辨别出第三心音信号，从而进行提取。

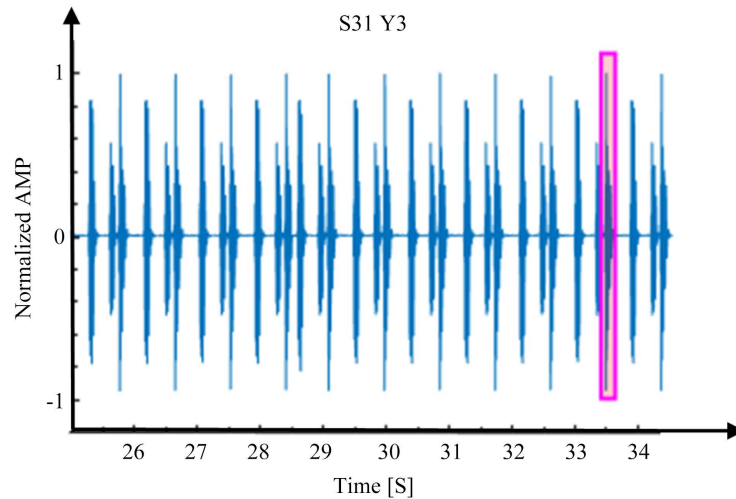


Figure 5. Heart sound signal extraction diagram
图 5. 心音信号提取图

2.4. 提取心音频率特征分布

经过研究发现对于心音信号，有很多详细的频率组件，可以被认为是区域的峰值。但是使用这些方法不利于分析频率组件，因为有很多详细的组件被认为是相同的频率组件[14]。在提取第三心音时运用包络线的方法不仅可以减少心音信号的频率分量还可以是每个频率分量的局部区域基本上是对称的[14]。在频率域内，包络线的频率宽度超过一个给定的阈值可以用于检测室间隔缺损和其他心脏杂音。因此包络线法是以提取心音频率域特征的有效方法诊断时间间隔缺损[14]。采用包络线法公式如下：

$$S_{3_E}[k] = \frac{1}{2L+1} \sum_{l=k-L}^{k+L} |S_F[l]|, k = L+1, N-1-L \quad (3)$$

其中 $S_F[l]$ 计算公式如下：

$$S_F[l] = \frac{1}{2L+1} \sum_{n=0}^{N-1} \left| S_3[n] \exp\left(-\frac{2\pi}{N}nl\right) \right|, l = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

其中 S_{3_E} 是第三心音， S_F 是心音周期， L 是时间宽度。

因此基于功率谱分析并用包络线法对第三心音的频率成分进行自动定位[14]。用包络线和阈值线的交点来确定频带宽度，本文用阈值 0.2~0.8 进行分析，如图 6 所示，其中红色线为第三心音的频域包络线，蓝色实线为阈值线，蓝色虚线交点处为频率重心。如图 6 可以得出第三心音的频率阈值设置的大小以及阈值频带分布的范围。

3. 实验分析

本研究通过对 100 例心音信号(正常心音信号来源于南阳理工学院的健康志愿者，异常心音信号取自于 3M 公司数据库[15])进行频率特征分析，利用基于 MATLAB 运行平台自主设计的一款可执行文件(PSD-AnalysisForSignal.exe)，实现了基于功率谱结合包络线法的第三心音研究。对心音信号提取的第三

心音阈值频率进行数据对比分析，其均值和正负一倍标准差的均值图如图 7 所示，正常心音信号包含 S33Y1、S3Y4，异常第三心音包含 S31Y3、S32Y2，通过对正常第三心音和异常第三心音对比分析，统计结果表示为阈值 - 频带范围(均值 \pm 标准差) Hz：正常第三心音阈值 - 频带范围为 0.2~(56.0832 \pm 6.3373) Hz、0.8~(21.0824 \pm 2.2393) Hz，而异常第三心音阈值 - 频带范围为 0.2~(126.7094 \pm 27.0634) Hz、0.8~(64.7820 \pm 11.6584) Hz。两者的频带分布范围，势必为心音信号的分类提供可靠的分类保证。

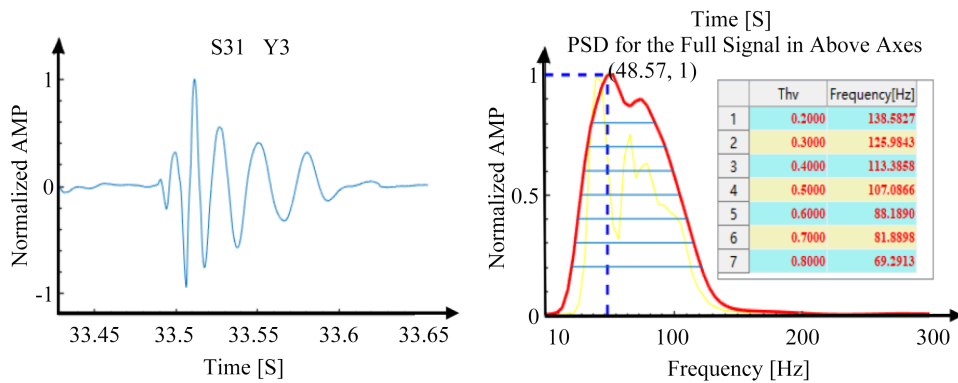


Figure 6. Third heart tone threshold frequency
图 6. 第三心音阈值频率

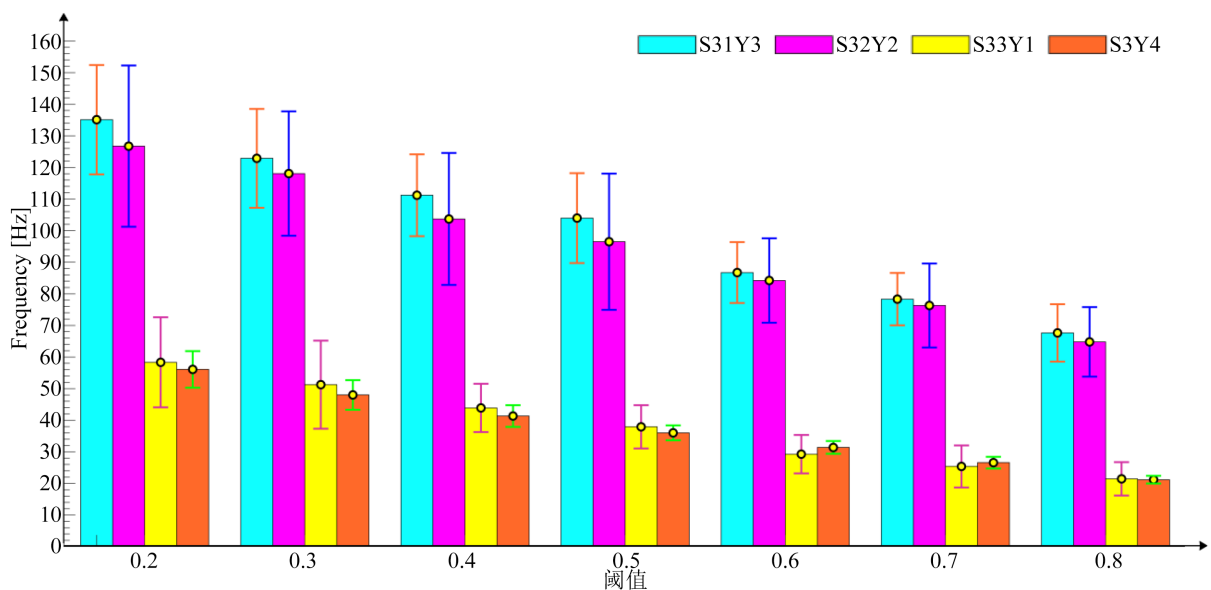


Figure 7. Third heart tone threshold frequency profile
图 7. 第三心音阈值频率分布图

4. 结论

本研究主要对第三心音频率分布进行分析研究，算法软件是由本课题组开发设计的一款基于 MATLAB 软件平台的名为 PSD-AnalysisForSignal.exe 的可执行文件。此软件实现的功能包含基于小波变换对心电信号进行降噪处理、第三心音的提取和基于功率谱结合包络线法提取心音频率域特征分布并用阈值法提取心音频率特征。通过对 100 例心音信号(正常心音信号来源于南阳理工学院的健康志愿者，异常心音信号取自于 3M 公司数据库[15])进行频率特征分析，对比正常第三心音和异常第三心音，统计结

果表示为阈值 - 频带范围(均值 \pm 标准差) Hz: 正常第三心音阈值 - 频带范围为 0.2~(56.0832 \pm 6.3373) Hz、0.8~(21.0824 \pm 2.2393) Hz, 而异常第三心音阈值 - 频带范围为 0.2~(126.7094 \pm 27.0634) Hz、0.8~(64.7820 \pm 11.6584) Hz。本研究的缺点体现在, 人为主动对第三心音进行提取, 其不可避免的依赖于人的主观能动性, 鉴于此, 如何自动提取第三心音避免人为主观能动性是我们下一步的研究目标。

参考文献

- [1] 胡盛寿, 高润霖, 刘力生, 等. 《中国心血管病报告 2018》概要[J]. 中国循环杂志, 2019, 34(3): 209-220.
- [2] 徐少平. 心瓣膜病患者第三心音的意义[J]. 国外医学心血管疾病分册, 1993(3): 170.
- [3] Tseng, Y.L., Ko, P.Y. and Jaw, F.S. (2012) Detection of the Third and Fourth Heart Sounds Using Hilbert-Huang Transform. *BioMedical Engineering OnLine*, **11**, 8. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-11-8>
- [4] 王鹏巨, 何意亭. 第三心音产生机理和临床意义的研究进展[J]. 心血管病学进展, 1988(3): 25-27.
- [5] 杨永玲, 解少柏, 王彦成. 对第三心音的评估[J]. 河北新医药, 1979(1): 38-39.
- [6] 邓万俊. 第三心音的病理生理决定因素[J]. 国外医学(内科学分册), 2002(5): 220.
- [7] Minami, Y., Kajimoto, K., Sato, N., *et al.* (2015) Third Heart Sound in Hospitalised Patients with Acute Heart Failure: Insights from the ATTEND Study. *International Journal of Clinical Practice*, **69**, 820-828. <https://doi.org/10.1111/ijcp.12603>
- [8] 姚瑶. 基于小波变换的语音信号去噪研究[J]. 信息通信, 2013(2): 13-14.
- [9] 刘学, 李婷, 孙宸. 基于小波变换的心音信号去噪方法[J]. 科技信息, 2013(2): 189-190.
- [10] 寇俊克, 魏连鑫. 一种改进的小波阈值图像去噪方法[J]. 现代电子技术, 2012, 35(4): 102-104.
- [11] 杨勇, 郭兴明. 基于心音信号的生物识别技术研究[J]. 山西警官高等专科学校学报, 2013(2): 90-93.
- [12] 刘娅, 李春明, 李栋. 基于小波分析的图像去噪处理[J]. 电脑开发与应用, 2009, 22(9): 33-34.
- [13] 余进. 数字信号处理技术的应用与发展[J]. 数字技术与应用, 2015(12): 224.
- [14] Sun, S. (2015) An Innovative Intelligent System Based on Automatic Diagnostic Feature Extraction for Diagnosing Heart Diseases. *Knowledge-Based Systems*, **75**, 224-238. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2014.12.001>
- [15] Littmann Library, Ventricular Septal Defect Database, 3M Company. <http://www.3m.com/healthcare/littmann/pn111.html>, 2019-05-25.