

## Design and Simulation of a MEMS-Based FHR Measuring Apparatus

YANG Hong-hong<sup>1</sup>, MAO Yaohui<sup>2</sup>, GAO Martun<sup>1\*</sup>, YUAN Weizheng<sup>2</sup>

1. School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. Micro and Nano Electromechanical Systems Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

**Abstract :** Traditional apparatus for Fetal Heart Rate (FHR) measurement is expensive, and also it's harmful to the fetus. Therefore, a portable FHR apparatus using MEMS accelerometer was designed which has the advantage of high safety. A low pass filter was designed and the simulated result from ORCAD shows that this filter is preferable to gain low-frequent FHR signal. Autocorrelation Function (ACF) and spectral analysis were adopted in the FHR signal processing and simulated in MATLAB. The result demonstrates that it can eliminate the noise effectively.

**Key words :** MEMS accelerometer; FHR; autocorrelation function; spectrum analysis

EEACC: 2575; 7230J

# 一种 MEMS 胎儿心率测量仪的设计与仿真

杨红红<sup>1</sup>, 毛尧辉<sup>2</sup>, 高满屯<sup>1\*</sup>, 苑伟政<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学机电学院, 西安 710072; 2. 西北工业大学陕西省微/纳米系统重点实验室, 西安 710072)

**摘要 :** 针对传统胎儿心率测量仪价格昂贵、对胎儿具有一定副作用等缺点, 运用 MEMS 加速度传感器, 设计了一个高安全性的便携式胎儿心率测量仪。设计了加速度信号低通滤波放大电路并在 ORCAD 上进行了仿真, 仿真结果表明该低通滤波电路能够较好的得到低频率胎心率信号。对于胎心率信号采用自相关函数法和频谱分析相结合的信号处理算法, MATLAB 仿真结果表明此算法能有效的去除噪声。

**关键词 :** MEMS 加速度传感器; 胎心率; 自相关法; 频谱分析

中图分类号: TH79

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)04-0547-03

监测胎心率及其变化, 是判断胎儿状况最简便的方法。由于工作需要, 职业女性通常不能在医院进行长期的监护, 因此家庭胎心监测尤其重要, 也是优生优育必不可少的重要环节。检测胎心率是一项技术性很强的工作, 目前一些医院已经设计了监测胎心率的多功能系统。具有数字显示功能的超声多普勒胎心监护仪, 价格昂贵, 仅为少数大医院使用, 在中、小型医院及广大的农村地区无法普及。此外, 超声振动波作用于胎儿, 会对胎儿产生很大的不利作用, 尽管检测剂量很低, 也属于有损探测范畴, 不适于经常性、重复性的检查及家庭使用<sup>[1]</sup>。有人已提出几种可以代替的方法: 心电图法、磁电图法和心音图法。其中心电图法要依赖于多电极的准确放置; 磁电图法需要大且昂贵的磁传感器, 不能用于便

携式的仪器中; 与上述两个方法相比, 心音图法有两个优点: 无放射源, 对胎儿和母体都无害; 胎心音信号可以方便的由腹部放置的小声敏元件获取, 不用像宫缩图那样需要凝胶体<sup>[2]</sup>。本文采取的是使用加速度传感器对胎儿信号进行测量。

加速度传感器是单位时间内速度的变化量, 因此可以用来测量动态加速度: 加速、减速及物体的晃动和振动<sup>[3]</sup>。本文运用 MEMS 加速度传感器替代超声波对胎心率信号进行测量, 较传统的多普勒超声波法更具安全性。这种方法有 3 个关键性技术问题: 第一, 传感器要足够灵敏, 可以从腹部获取微弱的低频震动信号; 第二, 滤波器需要有良好的去噪能力; 第三, 信号处理算法对于计算胎心率信号要有很好的鲁棒性。对这类仪器而言, 最重要的就是

收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2008-02-21

如何去除干扰和噪声,本文主要针对加速度信号低通滤波放大电路设计与仿真和胎儿心率信号分析与处理进行了初步探讨。

## 1 系统模型与低通滤波器的设计及仿真

本系统的工作原理如图1所示。通过加速度传感器将胎儿心率转换成模拟电压信号,通过两级有源低通滤波器,用A/D转换器将模拟电压信号转换成数字信号,输入到ARM单片机进行分析处理,最后输出处理结果。胎儿心率信号是微弱信号且易受到母体影响,为了方便后期噪声和干扰的去除,还需要对加速度传感器测得的信号在滤波之前先进行前置放大。

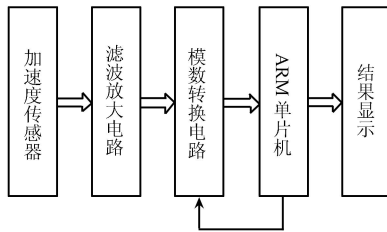


图1 MEMS胎儿心率测量仪硬件原理框图

母体中胎儿心率信号是属于强噪声干扰下的低频微弱信号,由于其非常微弱,同时干扰又很大,因此有效信号往往会被淹没。干扰信号一般包括高频的电磁干扰、50 Hz工频干扰以及母体中的其它干扰源等。工频干扰主要以共模信号的形式存在,通常幅值可达几伏<sup>[1]</sup>。母体中的干扰信号和胎儿心率信号的频率也互相重叠。根据正常胎儿的心率大约是120~160次/每秒,可知胎儿心率信号频率主要集中在低频段(约2 Hz~3 Hz间),而干扰信号的频率主要集中在高频段范围之内,据此特点,设计的低通滤波放大电路如图2所示。

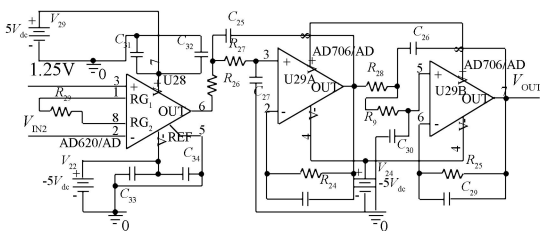


图2 低通滤波放大器原理图

低通滤波放大电路由一个仪表放大器和两级有源低通滤波器组成,截止频率约为4 Hz,放大增益可调。仪表放大器采用AD620,用于滤波的运算放大器采用AD706。电路性能采样ORCAD10.5仿真,将放大增益调为20 dB,对于0.1 V全频率交流差分输入信号,仿真输出结果如图3所示。仿真结果表明该电路与设计参数相符,具有良好的低频微弱信号提取能力。

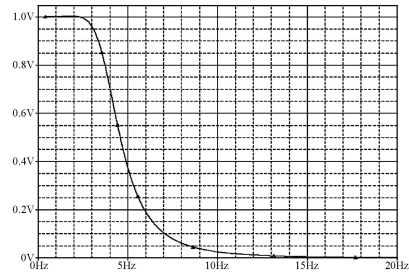


图3 差分输入信号频域仿真图

## 2 FHR信号处理算法及仿真

加速度信号通过低通滤波放大后得到的信号依然还混有噪音信号和母体的信号,还不能直接得到胎儿的心率信号,需要对采集的信号进行处理和识别。本文采用自相关函数法和频谱分析相结合的信号处理算法。利用自相关函数法的特性可有效的从噪音信号中提取周期信号,然后使用快速傅立叶变换算法得到信号的频谱,对频谱数据的分析计算就可有效地过滤噪声信号。

胎儿的心率信号属于非平稳信号,具有游离性并伴有尖刺,由于信号微弱,极易受到母体和环境噪声的影响<sup>[4]</sup>。但胎儿信号与母体或干扰信号也存在着一些显著的差异,如频率和振幅等不同,根据这些差异可计算出胎儿心率。

在正常的状态下,心跳信号并不是一个严格的周期信号,但可以近似地看作一个周期信号,通过计算心跳间隔得到的瞬时心率可以发现,心跳的周期和许多因素有关,通常情况下,人的瞬时心率值在前后两个心跳间的变化幅度不会超过6次,即相邻的心动周期的差异一般不超过10%,故可以将心跳信号近似地看作周期信号,从而可以采用相关检测的方法来确定心跳的周期。目前,高档胎儿监护仪在信号处理方面一般都采用了自相关技术,以提高胎心率的准确度<sup>[5-7]</sup>。自相关法检测心率的原理如下:

设 $N$ 为采样个数, $f(n)$ 为母体心率信号, $g(n)$ 为胎儿心率信号, $(n)$ 为噪声(干扰)信号, $S(n)$ 为三信号叠加后的混合信号,即原始信号 $S(n)$ 是确定周期性心率信号和噪声的叠加,如下式所示。

$$S(n) = f(n) + g(n) + (n)$$

$S(n)$ 的自相关函数如下式所示。

$$\begin{aligned} s(l) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S(n) S(n-1) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [f(n) + g(n) + (n)][f(n-1) + g(n-1) + (n-1)] \end{aligned}$$

$$= f_f(l) + g_g(l) + (l) + f_g(l) + g_f(l) + f(l) + f(l) + g(l) + g(l)$$

由于噪声和周期信号(胎儿心率和母体心率信号)不相关,因此在上式中两信号的自相关  $f_f(l) = f(l) = g(l) = g(l) = 0$ 。而噪声的自相关函数  $(l)$  主要集中在  $l = 0$  处有值,当  $|l| > 0$  时,衰减得很快,因此利用自相关函数法的特性可有效地从混有噪声的信号中提取出周期信号,即得到母体和胎儿的心率信号。

自相关函数计算得到的值可使用快速傅立叶变换算法来得到信号的频谱,算法公式如下所示。通过对频谱数据的分析计算即可得到信号的周期。由于胎儿心率频率范围不同于母体频率范围,据此特点即可得到胎儿的心率周期。

$$X(k) = \sum_{l=0}^{N-1} s(l) e^{-j\frac{2\pi kl}{N}}$$

此算法采用 MATLAB 进行了仿真验证。使用频率为 2 Hz 的正弦波模拟胎儿心脏跳动,频率为 1.2 Hz 的正弦波模拟母体心脏跳动,使用 MATLAB 函数 randn 模拟干扰信号<sup>[8]</sup>,信号叠加后,得到的信号如图 4 所示。通过上述公式可计算得到周期信号频谱,自相关法检测心率的仿真结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,在正半轴有两个波峰,查看 MATLAB 中的变量可得这两个波峰所对应的频率为 1.2 Hz 和 2 Hz,即可得到胎儿心率信号和母体心率信号的周期,证明采用此算法能有效地过滤干扰信号。

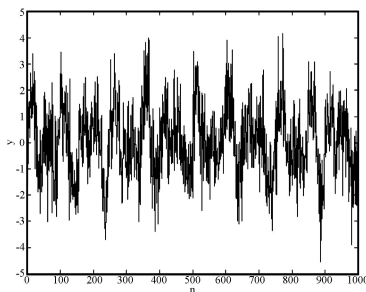


图 4 叠加信号时域图

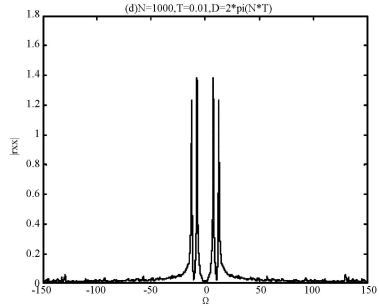


图 5 仿真信号经信号处理后的频谱图

### 3 结束语

运用 MEMS 加速度传感器替代超声波对胎儿心率信号进行测量,较传统的多普勒超声波法更具安全性。通过在 Orcad 和 Matlab 环境下的仿真结果表明,设计的低通滤波器结合后期的自相关法信号处理,能够较好的去除噪声,从而得到胎心率信号。

#### 参考文献:

- [1] 方尼中,高国伟. 基于 MEMS 传感器的胎儿心率检测仪[J]. 传感器世界,2006,3:40-43.
- [2] Chen Jianfeng,Phua Koksoo,Ying Song,Louis Shue. Fetal Heart Signal Monitoring with Confidence Factor[C]//Multimedia and Expo,2006 IEEE International Conference,2006,7:1937-1940.
- [3] 美新公司. 加速度传感器在便携式设备中的应用[J]. 世界电子元器件,2006,6:92-94.
- [4] J. P. Marques de Sa, L. Paulo Reis, J. Nuno Lau, J. Bernardes. Estimation and Classification of Fetal Heart Rate Baselines Using Artificial Neural Networks[J]. Computers in Cardiology 1994, IEEE. Pages:541-544.
- [5] 周怀得,李彦明. 胎心音信号的提取与处理[D]. 北京:中国优秀硕士学位论文全文数据库,2004.
- [6] 李晓,陆尧胜. 胎心率电子监护检测与分析新方法的研究[D]. 北京:中国优秀硕士学位论文全文数据库,2005.
- [7] Mihaela Ungureanu, Johannes W. M. Bergmans, Massimo Mischì, Guid Oei, Rodica Strungaru. Improved Method for Fetal Heart Rate Monitoring[C]// Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference Shanghai,2005:5916-5919.
- [8] 陈怀琛编著. 数字信号处理教程-MATLAB 释义与实现[M]. 北京:电子工业出版社,2004.



杨红红(1981-),女,硕士研究生,研究领域为医疗电子仪器, yanghong8540@163.com.



高满屯(1962-),男,现担任中国工程图学学会常务理事,理论图学专业委员会副主任委员,陕西省工程图学学会理事长。主要从事计算机图形学、计算机视觉、图形图像分析与理解、图学理论及应用研究,先后主持国家自然科学基金和航空基础科学基金等 10 多项科研课题的研究工作, gaomant@nwpu.edu.cn.