

· 技术交流 ·

用小波变换的模极大值提取胎儿心率的方法

曹毅¹ 张榆锋² 蒋丽华¹

摘要 对胎儿监护的主要方法是监听胎儿心率,而超声多普勒测量胎儿心率是一种很好的无创方法。但是,由于测量得到的原始信号成分非常复杂,干扰严重,从而使其对胎心率的提取造成很大困难。本文利用小波变换系数的模的平方值与信号奇异性指数之间的关系,从超声回波信号中提取出了胎儿的心率。由于噪声的小波变换系数随尺度的增大而减小,因此,该方法具有较高的抗干扰能力。通过模拟仿真和实际信号处理,证明该方法能准确地从超声多普勒信号中提取胎心率信号。

关键词 胎心率 小波变换 模极大值 奇异性指数 超声波

中图分类号 R318.04

文献标识码 A

文章编号 1002-3208 (2005) 01-0056-04

A Method of Extracting the Fetal Heart Rate by the Modulus Maxima of Wavelet Transform CAO Yi¹, ZHANG Yufeng², JIANG Lihua¹. 1 Department of Electronic & Information Technology, Chongqing Social Work Professional College, Chongqing 400055; 2 Department of Electronic Engineering, School of Information, Yunnan University, Kunming 650091

[Abstract] The main fetal-detecting method is used to monitor the fetal heart rate. The Doppler ultrasound is a good noninvasive way to detect the fetal heart rate. But the components of the original signal obtained from the detector are very complex and easily disturbed by many factors, which make it very difficult to abstract fetal heart rate. The fetal heart rate can be extracted from the returning signal of ultrasound by way of the connection between the modulus of the wavelet transform coefficient and the singular exponent. The wavelet transform coefficient of noise decreases with the increasing of the scale, so this method has the high ability of anti-interference. This method has been proved to be able to pick up the signal of fetal heart rate from Doppler ultrasound signal precisely by simulation and proceeding practical signals.

[Key words] fetal heart rate wavelet transform modulus maxima singular exponent ultrasound

胎儿在母体内生长发育状况的好坏以及胎儿的很多疾病将直接反应在胎儿的心率上^[1] (胎儿正常心率值为: 100 ~ 160 次/min)^[2], 所以, 对胎儿心率的检测是孕妇产前检查的一个重要指标, 是保证胎儿健康发育的必要措施, 对提高人口质量具有重要的现实意义, 因此, 在围产期对胎儿心率进行监护是十分必要的。

目前获取胎儿心率的传统方法是听筒拾取法和麦克风拾取法^[3]。这些方法均要求监护人员根据听到的声音人工计数, 得出胎儿心率。同时, 也有一些胎儿心率检测仪设计的研究^[2,4], 但这些研究大多注意系统设计, 在算法上, 大多使用传统的傅里

叶变换 (Fourier transform), 而胎儿心率是非平稳信号, 特别是胎儿的心脏运动状况很容易受到母体子宫内环境的影响 (如羊水的多少、胎盘供氧、供血状况等), 胎儿心率极不平稳。傅里叶变换是全局变换, 适用于对平稳信号的处理, 不适宜对非平稳信号的处理, 在对非平稳信号的处理过程中, 小波变换是目前最理想的变换方法^[5,6]之一, 鉴于此, 本文提出了用小波变换方法提取胎儿心率。

1 小波变换方法的提出

超声波检测胎儿心率时, 发出的超声波遇到胎儿心脏的收缩和舒张运动, 其反射回来的超声波频率将发生改变。当心脏收缩时, 心脏移动方向与超声波方向相同, 回波信号频率将降低; 当心脏舒张时, 心脏移动方向与载波方向相反, 回波频率升高。因此, 检测胎儿心率的超声波信号的频率随心脏的移动而发生改变, 即回波频率受到心脏运动状况的调制形成一调频波, 故超声波检测胎儿心率的

基金项目: 云南省自然科学基金 (2002C0002Z) 资助

作者单位: 1 重庆社会工作职业学院电子与信息技术系 (重庆 400055)

2 云南大学信息学院电子工程系 (昆明 650091)

作者简介: 曹毅 (1967—), 男, 副教授, 研究方向为生物医学信息处理。

目的就是要从回波中提取胎儿心脏移动的情况,也就是提取回波的频率随时间的变化规律,对信号处理来说,属于信号的时频分析。

在现代信号处理的时频分析方法中,小波变换具有变焦距的多分辨率分析特点^[6],且局部性能好,所以,本文采用小波变换来提取胎儿的心率:首先对超声回波信号进行小波变换,然后对适当尺度的小波系数求平方,得到小波变换模极大值的分布曲线,最后对模极大值的分布曲线进行滤波即可得到胎儿的心率曲线。该方法通过模拟仿真及实际信号处理,均得到了理想的结果,能准确地从超声多普勒信号中提取胎儿心率。

下面将首先介绍该方法的数学原理,然后介绍模拟仿真及实际信号处理方法,最后对方法及实验结果进行分析讨论。

2 数学背景

2.1 小波变换

对于连续的情况,定义小波函数

$$\Psi_{a,\tau} = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$$

式中, a 为伸缩因子(或尺度因子); τ 为平移因子。

对信号 $x(t)$ 的连续小波变换(CWT)定义为

$$\begin{aligned} \text{CWT}_x(a, \tau) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \\ &= [x(t), \Psi_{a,\tau}(a, \tau)] \end{aligned} \quad (2)$$

$\text{CWT}_x(a, \tau)$ 即是小波变换系数。

对于离散的情况,定义了小波函数(其实为二进小波)

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \Psi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in Z$$

对信号 $x(t)$ 的离散小波变换(DWT)定义为:

$$\text{DWT}_x(j, k) = 2^{-j/2} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi^*(2^{-j}t - k) dt$$

2.2 信号奇异性指数——李氏指数

奇异性指数的定义:设信号 $x(t)$ 在 t_0 点附近具有下述特征:

$$|x(t) - x(t_0)| \leq k |t - t_0|^\alpha$$

k 为常数,则称 $x(t)$ 在 t_0 附近的李氏(Lipschitz)指数为 α 。 α 的物理意义是其值越大,

信号在该点越光滑,反之,则表明信号在该点变化越剧烈。对于信号在某一点可导(函数可导),它的 $\alpha \geq 1$; 如果信号在某点不连续,但其值有限,则 $0 \leq \alpha \leq 1$; 对于脉冲信号, $\alpha = -1$, 而对于白噪声 $\alpha \leq 0$ ^[8,9]。

2.3 小波变换模极大值与信号奇异性指数之间的关系

根据文献[8, 9]证明,在 t_0 的邻域, $x(t)$ 的小波变换系数满足

$$|W_{2^j}x(t)| \leq k(2^j)^\alpha \quad (3)$$

式中, $|W_{2^j}x(t)|$ 为信号 $x(t)$ 的二进小波变换系数的模; k 为常数; 2^j 为二进小波变换尺度。对(3)式取对数得

$$\log_2 |W_{2^j}x(t)| \leq \log_2 k + \alpha j \quad (4)$$

(4)式表明了小波变换模极大值与奇异性指数 α 之间的关系:①在同一尺度下,当 $\alpha > 0$ 时,小波变换的模极大值随 α 的增大而增加;②当某一点的 $\alpha \geq 0$ 时, $x(t)$ 的小波变换在该点的模极大值幅度将随尺度的增大而增加;③当 $\alpha < 0$ 时, $x(t)$ 的小波变换在该点的模极大值幅度随尺度的增大而减小,这一点说明噪声在大尺度下,其模值将很小,这是消除白噪声的数学原理。

3 提取胎儿心率的方法

当心脏运动由舒张变为收缩时,心脏运动方向反向,根据(1)式分析,回波信号的频率将由增加变为减小,即 $\Delta f = f_{k+1} - f_k$ (f_k 表示 k 时刻的瞬时频率)由正变为负,此刻回波信号发生了跳变,表现出较大的奇异性,则此时小波变换模将出现最大值,于是,心脏由舒张变为收缩的转换时刻将和回波信号的小波变换模最大值之间存在一一对应关系。

根据上述分析,提取胎儿心率的方法如下:

- ①对超声回波信号进行小波变换;
- ②取适当尺度的小波变换系数,然后对系数求平方,得到小波变换模极大值的分布曲线;
- ③对模极大值的分布曲线进行滤波;
- ④计算滤波后的曲线的频率,所得频率值就是胎儿的心率值。

模极大值里存在着大量的干扰,经过适当的滤波(本文采用小波变换强制消噪方法^[10])即可得

到反应胎儿心率的平滑信号,判断该信号相邻波峰之间的距离就可以算出胎儿的心率。

4 模拟仿真与实际信号处理

为了验证方法的可行性,用一锯齿波模拟胎儿心脏的舒张与收缩过程,然后用该锯齿波去调制一高频正弦信号得一个调频信号,该调频信号用来模拟超声检测胎儿心率的回波信号,然后利用 2 的方法得出一反应调制信号(锯齿波)频率的曲线如图 1d,计算该信号的频率值与锯齿波信号频率相比较,结果完全相等,证明了算法的可行性。仿真过程的主要参数:调制信号频率 $\omega_m = 4\pi$,载波频率 $\omega_c = 60\pi$,采样频率 $f_s = 1000\text{Hz}$,信号长度 $L = 2\text{s}$,尺度 $a = 4$ 。小波函数为 db8 (Daubechies 小波)。仿真结果如图 1 所示。

用文中的方法对实际超声 Doppler 信号进行处理,实际采集到的超声多普勒信号是用云南大学信息学院电子工程系研制的胎儿心率检测仪(SWM200A 胎心仪)获取的。实验结果如图 2 所示。实验中,对多个实际样本信号进行处理,通过计算机求得的胎心率值均符合正常生理值,实验结果的合理性证明了算法的有效性。

5 实验分析与讨论

由于超声回波中存在各种干扰^[3],故对提取胎儿心率是很不利的,幸好,白噪声的小波系数随尺度的增加而减小(因为噪声的奇异指数),故在小波变换中可以选择较大的尺度,以消除信号噪声对模极大值的影响。但是,根据小波变换多分辨分析特点,当尺度增加时,其时间窗增大,此时具有较高的频率分辨率,根据海森堡(Heisenberg)测不准原理,频率分辨率和时间分辨率是相互约束的,故其时间分辨率将下降,因此,在大尺度下,时间定位能力下降,将影响对峰点位置的精确定位,所以,在实际提取信号频率时,要兼顾消除噪声影响和精确定位这两方面的矛盾。

超声回波信号的频率变化是渐进的、非跳跃的,故在寻求模极大值点时为了更明显,对小波变换系数不直接取模,而是取模的平方来代替模极大值,使信号在模极大值的地方更加明显——相当于非线性放大,使大的更加突出,小的更小。

在实验中,由于计算机处理的信号是因果的能

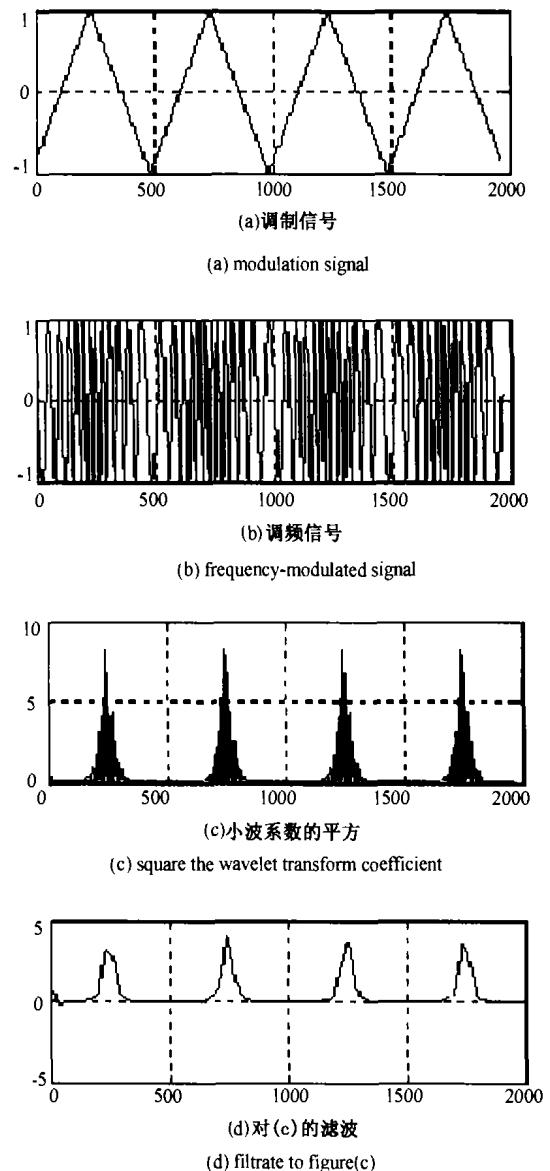


图 1 模拟信号处理结果

Fig 1 The result of proceeding to simulation signals

量有限信号,不可能无限长,小波变换系数在一段信号的起始和结束的一段时间(几个或几十个采样点)里的模极大值特别大(图 1、2 中已经舍去模极大值前 20 点的值,故显示不出来),将影响频率值的提取,所以,必须进行剔除。其主要原因是信号在开始(结束)的时候从无跳变到有(从有跳变到无),跳跃性很大,则奇异性特强,所以,模极大值很大。

小波变换模极大值提取胎儿的心率算法简单,容易实现。根据信号噪声在小波变换系数不同尺度的表现,可以选择合适的尺度提取小波系数,以避免噪声的影响,所以,该方法具有较强的抗干扰的

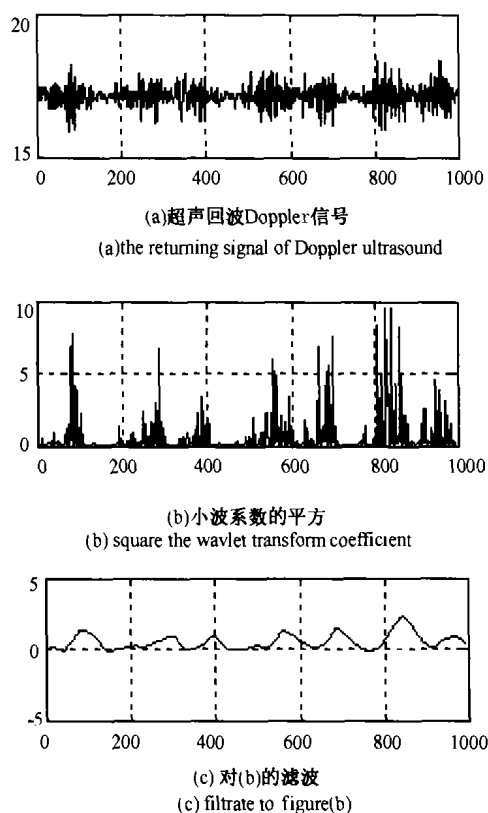


图2 实际 Doppler 超声信号处理结果

Fig 2 The result of proceeding to practical
Doppler ultrasound signals

能力。

参考文献

- [1] 刘欢欢,吕善根,翁霞云,等.超声心动图诊断胎儿先天性心脏病的研究.中华儿科杂志,1998,36(3):159
- [2] 方少元,艾育华,孙季丰,等.数字式胎儿心率计的设计与实现.华南理工大学学报(自然科学版),1999,27(9):41
- [3] 曹毅,张榆锋,陈建华,等.一种多普勒胎音信号提取方法的研究.北京生物医学工程,2003,22(2):89
- [4] 黄会汀,黄军,黄伟英,等.无线多路胎心信号监测仪的研制.计算机工程,1997,23(3):69
- [5] 张贤达著.现代信号处理.第2版.北京:清华大学出版社,2002.378
- [6] 杨福生著.小波变换的工程分析与应用.北京:科学出版社,1999.152
- [7] 冯若主编.超声诊断设备的原理与应用.第七章.中国医药科技出版社,1992.152
- [8] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelet. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643
- [9] Mallat S, Zhang S. Characterization of signals from multiscale edges. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 710-732
- [10] 张榆锋,曹毅,毛选珍,等.小波变换去噪方法在多普勒胎儿心率提取中的应用研究.生物医学工程学杂志(2004年已经正式录用)

(2003-07-10 收稿)