

颈动脉血流多普勒信号的特征提取*

张 羽 汪源源 王威琪 余建国

(复旦大学电子工程系 上海 200433)

2000 年 8 月 14 日收到

2000 年 11 月 3 日定稿

摘要 利用小波变换在表征信号瞬态特性上的优点,对颈动脉血流多普勒信号的最大频率曲线进行多尺度小波分析,并从不同尺度模极大值的变化曲线上提取出特征参数,临床初步试用结果表明,该参数比传统声谱图参数以及零极点模型参数对脑血管疾病的诊断具有更好的效果。

PACS 数: 43.35, 43.60

Characteristic extraction of Doppler signals from the carotid artery

ZHANG Yu WANG Yuanyuan WANG Weiqi YU Jianguo

(Department of Electronic Engineering, Fudan University Shanghai 200433)

Received Aug. 14, 2000

Revised Nov. 3, 2000

Abstract The maximum frequency waveform of Doppler signals from the carotid artery was analyzed using a multi-scale wavelet transform for its advantage in the signal's transient property characterization. A novel index was extracted from the variation of the maximas of the wavelet transform modulus under the different scales. The results of the clinical application showed that this index has a better effect in the cerebral vascular disease diagnosis than the traditional indices from the spectrogram and the indices from the zero-pole model.

引言

随着生活水平的提高,脑血管疾病的发病率和死亡率不断上升,且有年轻化的趋势,所以脑血管疾病的诊断和治疗已成为目前医学上的热点问题,而诊断作为治疗的前提,具有重要的临床意义。利用超声多普勒技术测量血流速度具有无损性的优点,在临床上被广泛用于血管疾病的诊断。但是脑血管被颅骨所包围,给超声检测脑血管中的血流状况带来困难,以往采用的经颅多普勒技术(TCD)只能检测到小部分脑血管的血流状况,无法对整个脑部供血状况进行评估。鉴于以上原因,考虑到颈动脉是脑部供血的主要途径,临床上一般可通过检测颈动脉的血流状况来估计脑部的供血状况。目前,临床上通常将颈动脉血流速度的最大值、最小值作为诊断的依据。另外,研究还表明^[1]:由声谱图上提取的声谱参

数,如 S/D 、 RI 等也与血流状况有一定的联系,可以用于脑血管疾病的诊断。我们还曾经直接对音频多普勒信号进行零极点模型的研究,提取出的零极点参数也具有一定的临床诊断价值^[2,3]。

但由于受仪器检测精度和分析方法本身的限制,这些参数对脑血管疾病未能表现出非常好的敏感性。考虑到声谱图上提取的最大频率曲线具有明确的物理意义,而且已有的 S/D 、 RI 等传统声谱图参数均是从该曲线上计算获得的,我们认为以最大频率曲线为基础进行研究,有望从中提取更具临床价值的参数。而利用小波变换的奇异点(Singularity,如极值点、过零点等)在多尺度上的综合表现来表征信号的突变或瞬态特征,是小波变换的一个重要应用领域^[4]。因此本文提出一种提取多普勒信号新特征的方法:先对颈动脉血流多普勒信号的最大频率曲线进行小波变换,获得小波变换模极大值随

* 高等学校骨干教师资助计划资助

尺度的变化曲线后,从中提取新的特征参数,并通过临床试用,比较该参数和传统参数对脑血管疾病诊断的敏感性。

1 原理和方法

几乎一切信号都较难直接根据原始观察数据作出解释,总需要提取它的某些特征来表征它。信号(或图像)的急剧变化之处往往是分析特性的关键之处。例如脑电图中的尖波和棘波、心电图中的 QRS 波群、图像中各物体的边缘等。由信号的小波变换的奇异点或多尺度上的综合表现来表征信号的突变或瞬态特性,在信号处理的各个领域已获得了广泛的应用。信号的瞬变或边缘有不同的表现,有时过渡较陡峭,有时则较平缓。小波变换的模极大值在多尺度上的变化情况与信号的这种瞬变特性直接相关。Mallat 等人首先提出了由信号小波变换的奇异点来表征信号^[4]。

设 $x(t)$ 为信号观察值,在信号瞬态特性研究中常用的小波变换的卷积形式为:

$$WT_a x(t) = \frac{1}{a} \int x(\tau) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau = x(t) * \psi_a(t), \quad (1)$$

其中:

$$\psi_a(t) = \frac{1}{a} \psi\left(\frac{t}{a}\right). \quad (2)$$

这也就是把信号 $x(t)$ 的小波变换 $WT_a x(t)$ 看成是 $x(t)$ 通过冲激响应为 $\psi_a(t)$ 的系统后的输出,其中小波基函数 $\psi_a(t)$ 具有在不同尺度下保持其频谱的幅频特性大小一致的优点^[5]。

颈动脉血流多普勒信号的最大频率曲线反映了血管内血流的流速随心脏搏动的变化情况,在收缩前期流速快速上升,达到最大值后流速开始下降,直至下一个心动周期的开始。我们认为颈动脉作为脑部供血的主要途径,它的流速上升和下降的快慢特性包含了脑血管供血通畅程度的信息。所以,通过小波变换分析颈动脉血流多普勒信号最大频率曲线的模极大值变化情况来表征这种突变特性,可能为脑血管疾病的临床诊断提供一条新的途径。

小波变换模极大值随尺度的变化曲线的提取方法为:首先选取 10 ms 的海宁窗对音频多普勒信号进行短时傅里叶变换,获取信号的声谱图^[6],利用百分比法提取声谱图的最大频率曲线^[7];然后对获得的最大频率曲线用它的最大值进行归一化处理,对归一化后的最大频率曲线进行小波变换分析,本文中变换选用的小波为三阶样条小波;由于在较小尺

度受曲线的高频噪声影响大,而在较大尺度则主要反映了因超声探头移动、挤压等引起的低频漂移,所以我们将变换的尺度范围确定为 4~96,这样就获得了最大频率曲线的时间尺度分布图;对于每个心动周期,我们都可以提取出它的模极大值随尺度的变化曲线,并对多个心动周期内的曲线进行平均,其中心动周期的自动划分详见文献 8。

2 临床试用和结果

为了验证该方法的有效性,我们用自行研制的 Q-3 连续波多普勒定量血流速度检测仪在上海市虹口区赤峰医院对人体的颈总动脉血流进行检测。声束与颈动脉夹角约为 60°,超声波发射频率为 5 MHz。人体颈动脉内流速最大值通常不超过 1.5 m/s,则多普勒最大频偏不超过 10 kHz(当声束与动脉夹角为 0°时的多普勒频移),所以用 16 位声卡以 22050 Hz 的采样频率对多普勒仪输出的音频信号进行采样,所得数据存入计算机。离线分析在 PC 机上用 MATLAB 软件实现。

我们共检测了 64 例人体的颈动脉血流多普勒信号,其中正常 23 例,高血压 11 例,脑梗塞 30 例。实验发现:模极大值曲线的形状与脑血管疾病有一定的联系。

作为例子,图 1(a)和图 1(d)分别给出了正常人和脑梗塞病人的颈动脉血流多普勒信号归一化后的最大频率曲线,图 1(b)和图 1(e)为相应的时间尺度分布图,图 1(c)和图 1(f)为提取出的模极大值随尺度的变化曲线。

由图 1 可见,正常人的模极大值曲线在较小尺度上达到极大值后随尺度的增大而不断衰减,而脑梗塞病人的模极大值曲线往往包含两个极大值,在较大的尺度上达到第二个极大值后才随尺度的增大而衰减。所以就直观而言,正常人和脑血管病人在模极大值曲线上的表现是不一样的。

考虑到正常和异常病例在模极大值曲线上所表现的不同特征,为了对该曲线的特征进行定量的描述,我们选取该模极大值曲线第二次增高阶段的升高幅度作为新的特征参数,记为 A_r 。该参数可通过直接检测极大值、极小值后测量其相对高度,也可对微分后的模极大值曲线的第二个大于零的区域进行积分获得。对于图 1 所示的两种情况,其模极大值曲线微分运算后的曲线如图 2 所示。显然,图 2(a)所示的正常人该区域不存在,即 $A_r = 0$;图 2(b)所示的脑梗塞病人该区域存在,计算得参数 $A_r = 0.1624$ 。

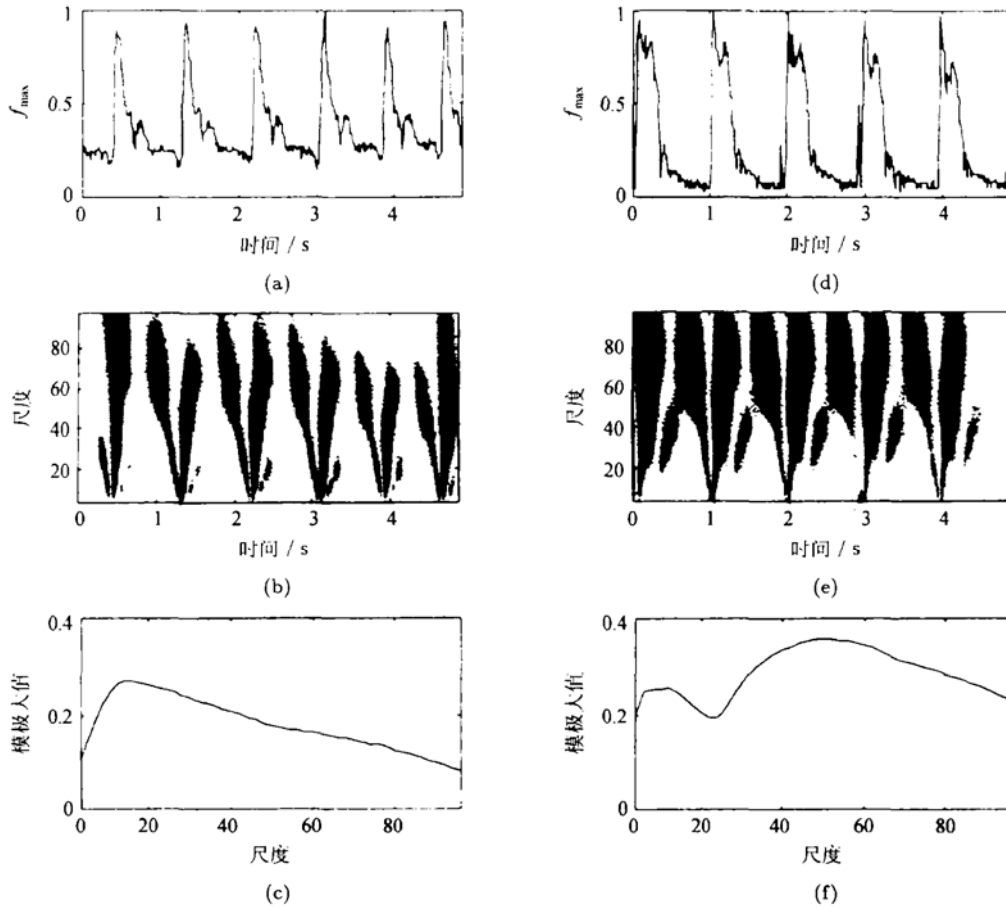


图 1 颈动脉血流多普勒信号最大频率曲线(上)及其时间尺度分布图(中)和提取的模极大值曲线(下), 左: 正常人; 右: 脑梗塞病人。

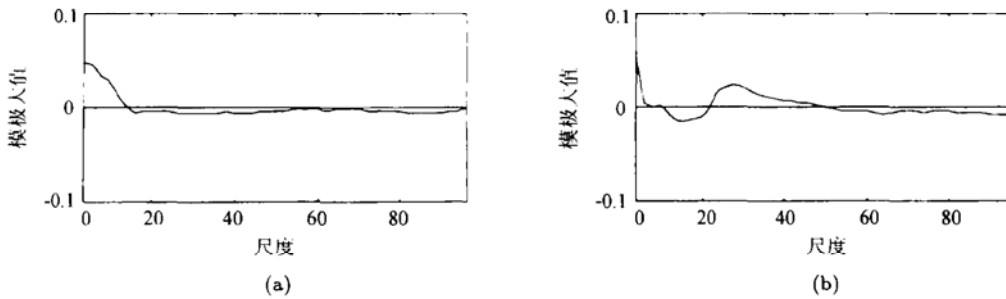


图 2 模极大值曲线的差分 (a) 正常人, (b) 脑梗塞病人

图 3 显示了新参数 A_r 相对于年龄的分布情况, 作为比较同时显示了传统声谱图参数 S/D 、 RI 以及零极点模型参数中的复极点重心幅长 r_P 、复极点重心幅角 ϕ_P 和实极点重心幅长 r_R 三个参数的分布情况。其中零极点参数的定义和计算详见文献 3。

由图 3 可见, 脑梗塞病人的参数 A_r 明显偏大, 而正常人的参数 A_r 为零, 或是接近零的数值。高血压作为第三类研究对象, 由图可见他们的参数 A_r 与正常人相比也明显偏大。若将脑梗塞与高血压患者归为异常类, 对现有的 64 例病例以 $A_r = 0.019$ 为

阈值, 发现: 所有异常病例均落入大于该阈值的范围内, 而正常病例中仅有 1 例参数 A_r 稍偏大。而声谱图参数 S/D 、 RI 与零极点参数复极点重心幅长 r_P 等都与脑梗塞疾病有一定程度的相关性, 但它们与正常病例的差异不是很明显, 而且对高血压病例与正常病例也无法区分。从总体上来看, 这些参数的分类效果要比参数 A_r 差得多。所以, 从小波变换模极大值曲线提取的新参数 A_r 可能比现有的声谱图参数、零极点参数与脑血管疾病更具相关性, 可以为脑血管疾病的临床诊断提供一个更有效的指标。

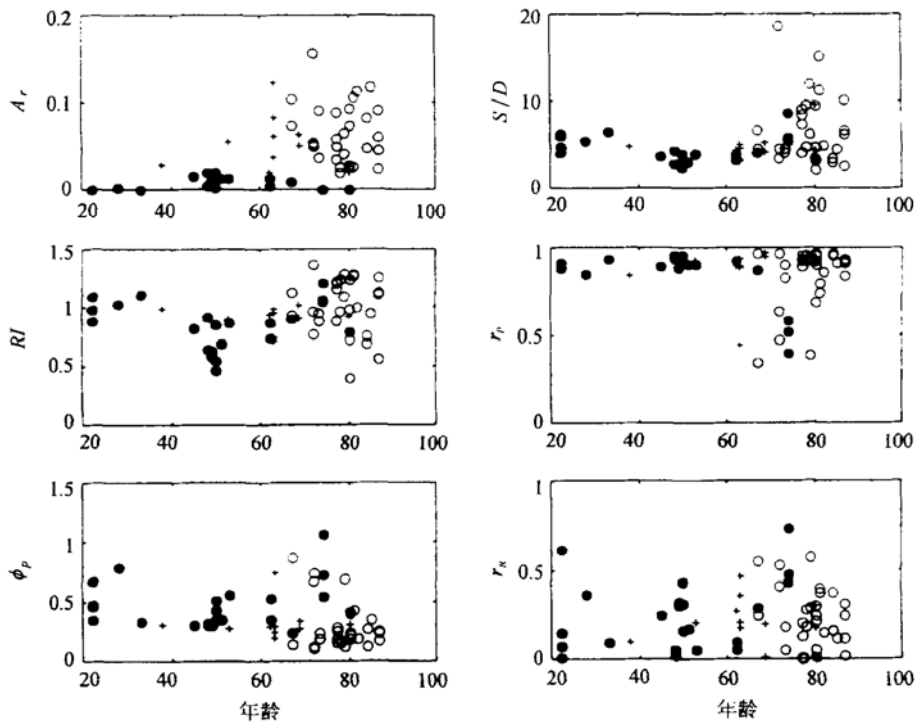


图 3 各参数相对于年龄的分布情况 (○: 脑梗塞病人; +: 高血压病人; ●: 正常人)

3 结论与讨论

本文利用小波变换分析颈动脉血流多普勒信号的最大频率曲线,并从小波变换模极大值随尺度的变化曲线上提取新的特征参数。初步的临床试用表明:与传统声谱图参数以及零极点参数相比,新参数对脑血管疾病的诊断更具敏感性,可以为临床诊断提供较为可靠的依据。

但作为一个有效的临床指标,该参数对正常人、高血压病人以及脑梗塞病人所表现出来的特异性,其明确的物理解释仍有待于进一步的研究。另外,要想让该参数在临床上得到推广应用,还需要作大量的病例资料积累,以建立较为完整的诊断数值库和更为准确的判别标准。

感谢

作者对长海医院李友法医生在临床数据采集方面给以的帮助深表谢意。

参 考 文 献

- 1 Sillesen H, Schroeder T. Changes in Doppler waveforms can predict pressure reduction across internal carotid artery stenoses. *Ultrasound in Med. Biol.*, 1988; 14(8): 649—655
- 2 汪源源, 王威琪, 蔡大卫等. 医学超声中音频多普勒信号的零极点分析法. *复旦学报*, 1994; 33(5): 535—539
- 3 陈斯中, 汪源源, 王威琪. 脐血流音频多普勒信号的极点分布及特征分析. *仪器仪表学报*, 2000; 21(3): 248—251
- 4 Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1992; 38(2): 617—643
- 5 杨福生. 小波变换的工程分析与应用. 北京: 科学出版社, 1999
- 6 Leeuwen G, Hoeks A, Reneman R. Simulation of real-time frequency estimators for pulsed Doppler systems. *Ultrasonic Imaging*, 1986; 8(4): 252—271
- 7 Mo L, Yun L, Cobbold R. Comparison of the four digital maximum frequency estimators for Doppler ultrasound. *Ultrasound in Med. Biol.*, 1988; 14(5): 355—363
- 8 刘斌, 汪源源, 王威琪. 利用小波变换提取声谱图参数的一种方法. *中国生物医学工程学报*, 2000; 19(1): 104—109