

多普勒血流信号最大频率曲线的特征分析及应用

汪源源, 张羽, 周国辉, 余建国, 王威琪

(复旦大学电子工程系, 上海 200433)

摘要: 文章主要研究从超声多普勒血流信号的最大频率曲线中提取特征值, 并用于临床血管疾病诊断的方法。先利用短时傅里叶变换分析采样所得的音频多普勒血流信号, 接着用百分比法得到信号的最大频率曲线, 然后提取最大频率曲线频谱各峰值的比作为特征值, 并将它们用于血管疾病的诊断。通过对颈动脉多普勒血流信号的临床分析表明: 此方法比传统的声谱参数法有更高的诊断准确性。

关键词: 超声多普勒; 最大频率; 特征分析

中图分类号: TB559

文献标识: A

Feature analysis of the maximum frequency waveform from blood flow Doppler signals and its application

WANG Yuan-yuan, ZHANG Yu, ZHOU Guo-hui, YU Jian-guo, WANG Wei-qi

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: In this paper, a novel method was studied to diagnose the vessel disease using the feature of the maximum frequency waveform from the blood flow ultrasound Doppler signals. The sampled audio Doppler flow signals were analyzed using the short time Fourier transform. Then the percentile method was used to obtain the maximum frequency waveform from whose spectrum feature values were extracted to diagnose the vessel disease. From the clinical analysis of Doppler flow signals from the common carotid arteries, it was shown that the method described here gave a higher diagnosis accuracy than the conventional method, the sonogram parameter method.

Key words: Doppler ultrasound; maximum frequency; feature analysis

1 引言

超声多普勒技术已被广泛应用于临床血管疾病的诊断上。该技术通常通过提取超声多普勒血流信号的特征参数, 从而为疾病诊断提供依据。人们在大量病例的基础上进行统计分析, 提出了一些有临床诊断意义的特征参数, 如超声多普勒血流信号的声谱图参数: S/D 值和阻力指数 RI 值等^[1]。研究还表明^[2]: 血管疾病通常可反映在超声多普勒血流信号最大频率曲线或平均频率曲线的变化上, 因此这两种波形可用于血管疾病的诊断, 特别是最大频率曲线, 对血管疾病的诊断有十分重要的意义。

本文的方法是从超声多普勒血流信号的最大频率曲线中提取的特征值, 用于临床血管疾病的诊断。文中还通过颈动脉多普勒血流信号的临床分析, 比较该方法和传统的声谱参数法的诊断准确性。

2 方法

音频超声多普勒血流信号是非平稳信号, 但在

10 ms 内往往可被看作是准广义平稳的随机信号^[3], 因此可以用短时傅里叶变换进行分析, 从而得到随时间变换的信号频谱。

设 $x_d(t)$ 是采样所得的音频超声多普勒信号, 则短时傅里叶变换得到信号的时变频谱 $S(f, t)$ 为:

$$S(f, t) = \left| W(\tau) x_d(t - \tau) e^{j2\pi f \tau} d\tau \right| \quad (1)$$

其中 $w(\tau)$ 是窗函数, 可以是 Hanning 窗或 Hamming 窗。

得到信号的时变频谱后, 可以将频谱以声谱图的形式进行显示。所谓声谱图, 就是将三维信息的多普勒信号的时变频谱在两维平面上进行显示, 即以横轴表示时间, 纵轴表示多普勒信号的频率, 而某一频率点的频谱幅度则以灰度加以调制。声谱参数就是从声谱图包络上提取出来的^[1], 常用的有 S/D 值和阻力指数 RI 值等。这些声谱参数通常被用于血管疾病的诊断, 但准确性和灵敏度不是很高。

由于血管疾病与最大频率曲线十分有关, 为提高血管疾病诊断的准确性, 可以分析最大频率曲线的特征, 为此需先从时变的信号频谱中提取最大频率曲线。这里利用百分比法估计信号的最大频率曲线。

假设 t 时刻多普勒信号(包括噪声)的功率谱密

收稿日期: 2000-08-04; 修订日期: 2000-10-24。

高等学校骨干教师资助计划项目

作者简介: 汪源源(1968-), 男, 浙江黄岩人, 博士, 复旦大学特聘教授, 博士生导师, 研究方向: 医学超声和医学信号处理。

度为 $S(f)$, 定义函数 (f) 为:

$$(f) = \int_0^f S(f) df \quad (2)$$

由于多普勒信号的功率谱密度 $S_d(f)$ (不包括噪声功率谱密度 $S_n(f)$) 只存在于频率低于信号最大频率 $f_{\max}$ 部分, 因此当 $f > f_{\max}$ 时, $S(f) = S_n(f)$, 只存在噪声谱成分, (f) 的斜率较小, 在 (f) 曲线表现为比较平坦; 而当 $f \leq f_{\max}$ 时, $S(f) = S_d(f) + S_n(f)$, 此时既有信号的谱成分, 又有噪声的谱成分, (f) 斜率较大, 表现为 (f) 曲线比较陡峭。所以从信号加噪声区变化到纯噪声区发生在 (f) 曲线的拐点上。该拐点所对应的频率就是所要估计的信号最大频率。

在百分比法中, 最大频率的估计值 $f_{\max}$ 可以从 (3) 式中解出,

$$(f_{\max}) = (100 - \quad) T / 100 \quad (3)$$

其中 T 是信号加噪声的总功率, 是根据信噪比所选择的常数, 通常为 $2\% \sim 5\%$ 。也就是说, $f_{\max}$ 为 (f) 曲线和水平线 $(100 - \quad) T / 100$ 交点处的 f 值。

利用百分比法分析时变的信号频谱, 就可得到信号的最大频率随时间变换的曲线。而最大频率曲线的形状和血流状况存在一定的关系, 提取出最大频率曲线的特征, 就有望为血管疾病诊断提供依据。

这里利用傅里叶变换计算最大频率曲线的频谱, 得到该曲线幅度谱的平方值 $S_m(f)$, 然后利用峰值点提取法^[4]得到 $S_m(f)$ 的最大的 3 个峰的值 A_1 、 A_2 和 A_3 (其中, $A_1 > A_2 > A_3$), 并计算 3 个特征值 $d_1 = A_2/A_1$; $d_2 = A_3/A_1$; $d_3 = A_3/A_2$ 。当血管存在疾病时, 血管的弹性可能减小, 血管阻力可能增大, 反映在多普勒最大频率曲线上的高频成份可能减小, 3 个特征值 d_1 、 d_2 、 d_3 也会发生相应的变化。因此利用这 3 个特征值就可能为临床的血管疾病诊断提供依据。

3 临床分析及结果

为了比较这种方法和常用的声谱参数法诊断血管疾病的准确性, 我们用研制的 Q-3 多普勒定量血流速度检测仪^[5] 对人体的颈总动脉血流进行检测, 用 16 位声卡以采样率 22.05 kHz 对多普勒仪输出的音频信号进行采样, 并将采样到的数据 (信号持续时间均在 5 个心动周期以上) 存贮于计算机的磁盘中, 然后在奔腾 PC 机上用 MATLAB 编程进行离线的分析: 先将每例的颈总动脉音频多普勒血流信号

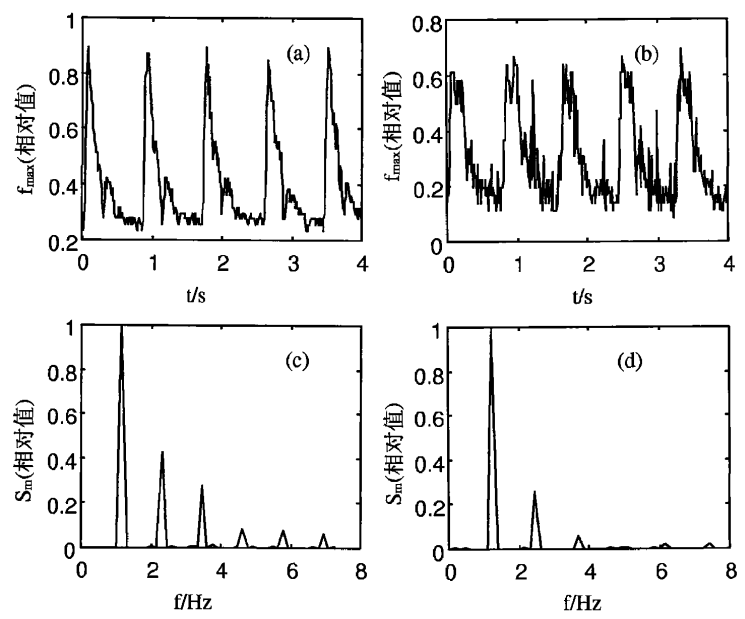


图 1 (a)(c) 正常人颈动脉最大频率曲线及其频谱, (b)(d) 脑梗塞病人颈动脉最大频率曲线及其频谱

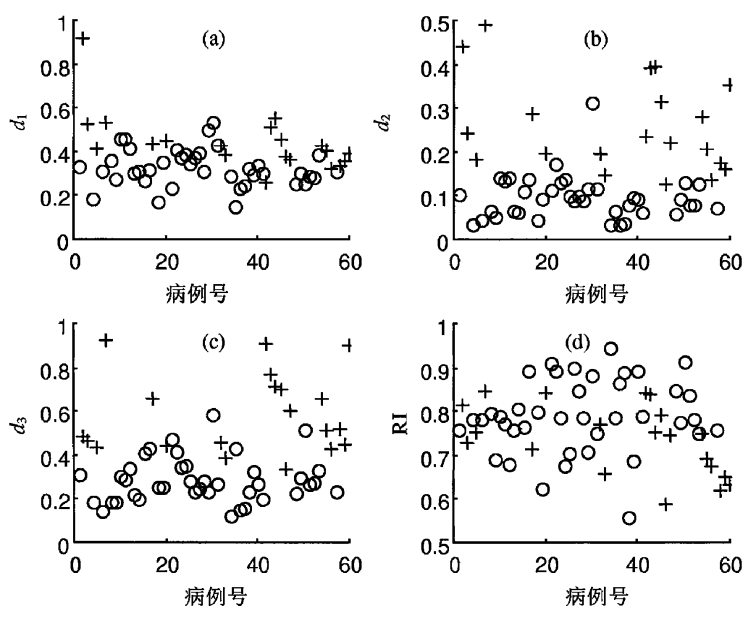


图 2 (a) d_1 , (b) d_2 , (c) d_3 , (d) RI 的分布情况, $\circ$ 代表脑梗塞或高血压的病例; $+$ 代表正常人

进行 10 ms Hanning 窗的短时傅里叶变换,接着用百分比法提取信号的最大频率曲线,并提取曲线的特征值 d_1 、 d_2 、 d_3 ,作为对比,同时还计算出信号声谱图的阻力参数 RI 。

我们共检测了 60 例人体的颈总动脉血流,其中正常人(指无颈动脉疾病或脑血管疾病者) 20 例,临床诊断为脑梗塞或高血压的病人 40 例。

作为例子,图 1(a)、(b) 分别给出了利用短时傅里叶变换和百分比法提取出的 1 例正常人和 1 例脑梗塞病人的最大频率曲线(幅度为相对值),图 1(c)、(d) 分别给出了相应的最大频率曲线的频谱,从频谱中所提取的 3 个最大峰的相对值分别为 1.000, 0.4245, 0.2792 和 1.000, 0.2567, 0.0592。可见,两者之间的区别可以比较明显地体现于频谱 3 个最大峰值间比值。

图 2(a)、(b)、(c) 分别给出了 3 个特征值 d_1 、 d_2 、 d_3 的分布情况,作为对比,图 2(d) 给出了声谱图参数 RI 的分布情况。

从图 2 的比较可见,对于正常人和脑梗塞或高血压病例的区分,特征值 d_2 、 d_3 的性能比较好,大大优于 d_1 和传统的声谱图参数 RI 。该结论在统计结果中也得到反映,各参数的统计结果如表 1 所示。

表 1 特征参数 d_1 、 d_2 、 d_3 和声谱图参数 RI 的统计结果

特征参数	正常人		脑梗塞或高血压病例	
	均值	标准差	均值	标准差
d_1	0.4413	0.1316	0.3313	0.0834
d_2	0.2586	0.1040	0.0977	0.0494
d_3	0.5868	0.1780	0.2898	0.1024
RI	0.7349	0.0777	0.7921	0.0835

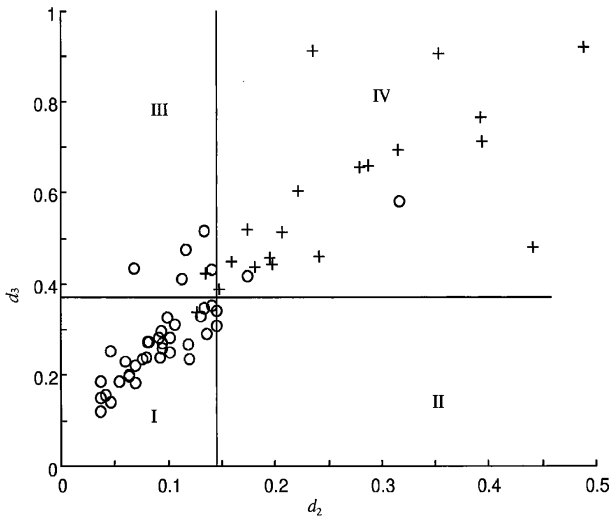


图 3 正常人和血管病例在 d_2 、 d_3 两维空间的分布, o 代表脑梗塞或高血压的病例; + 代表正常人

从图 2 和表 1 中可以看出,特征参数 d_2 、 d_3 可以较好地地区分正常人和血管病例的情况,如果同时以 d_2 、 d_3 为特征,就可以更好地诊断疾病。图 3 给出了正常人和血管病例在 d_2 、 d_3 两维空间的分布。

如果以 $d_2 > 0.145$ 且 $d_3 > 0.370$ (即区域 IV) 作为正常人的诊断依据,以 $d_2 < 0.145$ 或 $d_3 < 0.370$ (即区域 I、II、III) 作为脑梗塞或高血压等病例的诊断依据,则 20 例正常情况和 40 例异常情况中均只有 2 例发生误判,其诊断的准确性较常用的声谱图参数法有了较大的提高。

4 结论和讨论

临床分析表明:本文提出的方法在保持超声多普勒无损伤优点的基础上,比传统的声谱图参数法在血管疾病诊断准确性方面得到较大的提高。如果将该部分的技术设计成后置式,前级为医院的多普勒检测仪器,后级是带采集装置的 PC 机,本文所提出的方法在 PC 机上用软件实现,这样就可以较好地结合我国现有国情,为临床的血管疾病诊断提供一种新的手段。

应该看到本文只提取了最大频率曲线频谱的最大 3 个峰的信息,为了更细地区分何种血管疾病,可以提取最大频率曲线的其他特征,并以人工神经网络或模糊函数的方法建立分类模型,从而进一步提高该技术的临床价值。这方面的问题我们将继续研究。

参考文献:

[1] 汪源源, 吴晓峰, 刘斌等. 超声多普勒声谱参数的定义和应用[J]. 上海生物医学工程, 1997, 18(3): 26-29.

[2] D. Evans, W. McDicken, R. Skidmore, et al. Doppler ultrasound[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1989. 1-20.

[3] L. Mo, R. Cobbold. Speckle in continuous wave Doppler ultrasound spectra: a simulation study [J]. IEEE Trans UFFC, 1986, 33(6): 747-752.

[4] 汪源源, 吴晓峰, 刘斌等. 心动周期性多普勒波形的平均方法[J]. 应用声学, 1998, 17(2): 5-10.

[5] W. Wang, Q Shao. Optimum position and quasicompensation approach for quantitative measurement of blood flow velocity with Doppler ultrasound[J]. Journal of Cardiovascular Ultrasonography, 1988, 5(4): 289-292.