

人体脉搏信号的功率倒谱与倒滤波谱分析*

王炳和

董彦武 吴胜举

(中国人民武装警察部队技术学院, 西安 710086)

(陕西师范大学应用声学研究所, 西安 710062)

杨颢

相敬林 张效民 王海燕

(西安市中医医院, 西安 710005)

(西北工业大学三系, 西安 710072)

关键词 脉搏信号、功率倒谱与倒滤波谱、谱特征

脉象是中医辨证施治的重要依据, 古代就有“切之以九脏之动”, “微妙在脉, 不可不察”之说。但长期以来, 中医一直是靠手指的感觉来获取和分辨脉象。因而, 存在一些主观臆断因素。人们渴望对中医脉象能有一个客观、定量的辨识标准, 以便更细致、更科学地揭示脉象的实质与特征。过去国内在时域内对这一研究做了不少工作^[1-3]。1983年加拿大和中国台湾学者在频域内分析了脉搏信号的特征^[4]。本文首次采用倒谱及倒滤波技术研究人体脉搏信号, 获得了脉象的功率倒谱、倒滤波谱及其特征值, 发现由频域返回时域的特征值能更好地反映脉象的实质差异。

1 倒谱技术研究人体脉象的独到之处

倒谱技术自60年代因语言信号的分析提出以来, 近年来在其它领域内得到了愈来愈广泛的应用, 它对分析信号的特征和各种故障诊断有特殊的优越性^[5], 但目前尚未见到其用于脉搏信号分析的报道。倒谱技术用于脉搏信号分析有如下优点:

1.1 倒谱技术可准确地提取脉象的周期性

由于倒谱是对频谱取对数后进行傅氏变换的, 它将频域内的周期成分(如谐波族)转化为倒谱上的单根线谱及其倒谐波, 这样可从倒谱峰的特征(如图1(b)中倒谱峰位置 τ_s)而准确、方便地得到脉搏周期。其中取对数的目的, 是为了使谱图中大小不同的峰值得以不同的倍数, 提升较小的峰, 更明显地体现不同信号之间的特征差异。

1.2 倒谱上 $\tau = 0$ 处的谱值反映了脉搏强度的特征

对于各种脉象(即使同一种脉象), 由于每个受检者的体质和生理病理等因素的不同, 其脉搏信号的强度大小亦不同, 因此讨论其信号的强度大小对谱分析结果的影响是很重要的。

对于脉搏信号 $x(t)$, 它的功率谱 $S_x(f)$ 和倒谱 $C(\tau)$ 分别为

$$S_x(f) = |F\{x(t)\}|^2, \quad (1)$$

$$C_x(\tau) = F^{-1}\{10 \log S_x(f)\}. \quad (2)$$

对于脉搏信号 $x'(t) = k \cdot x(t)$, (常数 $k > 0$), 其功率谱为

$$S_{x'}(f) = |F\{k \cdot x(t)\}|^2 = k^2 |F\{x(t)\}|^2, \quad (3)$$

由傅氏变换的线性性质,可知其倒谱为

$$\begin{aligned} C_{x'}(\tau) &= F^{-1}\{10 \log S_{x'}(f)\} \\ &= F^{-1}\{10 \log k^2 S_x(f)\} \\ &= F^{-1}\{20 \log k\} + F^{-1}\{10 \log S_x(f)\}, \end{aligned}$$

$$\text{即 } C_{x'}(\tau) = 20 \log k \cdot \delta(\tau) + C_x(\tau). \quad (4)$$

上式中的 $F\{\}$, $F^{-1}\{\}$ 分别表示傅氏正、逆变换。(4)式说明: 对于不同强度的同一种脉搏信号,比例系数 k 只影响倒谱中 $\tau = 0$ 处的数值大小,而与 $\tau \neq 0$ 处的谱值无关。也就是说,在脉象倒谱上, $\tau = 0$ 处的谱值大小反映了脉搏信号的强度特征。本文的实验分析结果也证明了此结论的正确性。

1.3 倒谱经倒滤波技术处理后,可得到脉象的倒滤波谱

如图 1,这是滑脉功率谱转化成倒谱的示意图。图 1(b) 原点附近的一簇分量是整个功率谱包络对应的变换,远离原点的倒谱峰及其倒谱波是功率谱中周期成分在倒谱中相应的变换。而脉搏基频峰值的变换与功率谱包络变换之间的间隔总是较大的,从而使我们一方面可容易地识别与提取脉搏基频信息(脉象周期值),另一方面可从倒谱中剔除掉脉搏频域周期成

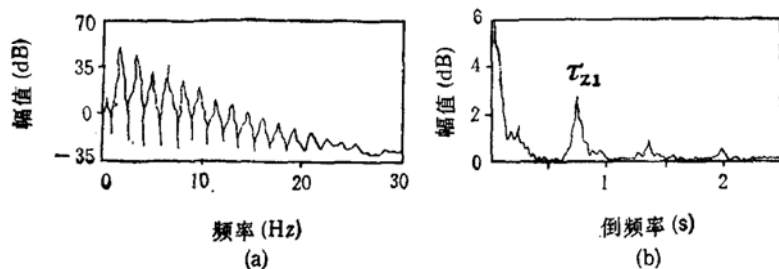


图 1 脉象(细脉)功率谱(a)和倒谱(b)

分所对应的变换,保留下其包络的变换,再经倒滤波处理之后,便可得到脉象功率谱的包络谱(即倒滤波谱)。

2 实验和分析方法

实验中的受检者来自中医医院的患者,年龄在 17—65 岁之间。由两位经验丰富的老中医采用“双盲法”切诊,取两人切诊结果一致者作为受检对象。共采集脉象 105 例(其中滑脉 33 例,弦脉 48 例,细脉 24 例)。选用 B&K-4166 型电容传声器接收信号,在其前端紧套一有机玻璃套管,使脉搏声波经一密闭空气腔传至电容传声器振膜上,由声信号转换成电信号,进入到 B&K-2639 型前置放大器中放大,然后一路输入于一长余辉慢扫描示波器进行现场监视,一路输入日本 TEAC R-61 型数据记录仪记录脉搏信号。记录过程中,要求受检者情绪稳定,检测室内十分安静。将记录好的音频磁带送入计算机中心进行处理。记录仪重放的信号需先经一模拟低通滤波器(截止频率 50Hz)滤波,然后输入计算机分析。其分析处理方法如图 2 所示。脉搏信号 $x(t)$ 经采样和预处理,转化成数字信号 $x(n)$,再计算瞬时频谱

$$S_x(K) = F[W(n) \cdot x(n)], 0 \leq n < N-1, 0 \leq K < N-1, N = 2048, \quad (5)$$

其中 $W(n)$ 为汉宁窗,即

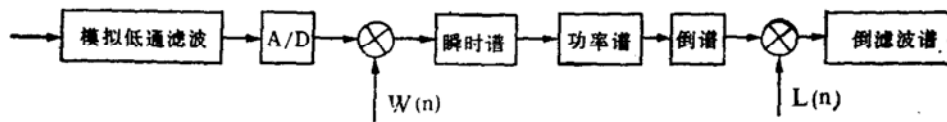


图 2 脉象信号分析处理框图

$W(n) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2n\pi}{N-1}\right) \right] \cdot R_N(n)$, ($R_N(n)$ 为矩形窗), $F[\]$ 表示离散傅氏正变换, 其正、逆变换关系分别为

$$\begin{cases} X(K) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi Kn}{N}\right), \\ x(n) = \sum_{K=0}^{N-1} X(K) \cdot \exp\left(j \frac{2\pi Kn}{N}\right), \end{cases} \quad (6)$$

$$0 \leq n < N-1, 0 \leq K < N-1, N = 2048.$$

自功率谱

$$\bar{S}_{xx}(K) = S_x^*(K) \cdot S_x(K) = |S_x(K)|^2, \quad (7)$$

其中 $S_x^*(K)$ 为 $S_x(K)$ 的共轭复数. 则功率倒谱为

$$C_{xx}(n) = F^{-1}[10 \log \bar{S}_{xx}(K)], \quad (8)$$

$$0 \leq n < N-1, 0 \leq K < N-1, N = 2048.$$

倒滤波谱

$$S_{xx}^L(K) = F[L(n) \cdot C_{xx}(n)], \quad (9)$$

$$0 \leq n < n_0, 0 \leq K < N-1, N = 2048,$$

其中 n_0 应取得比脉搏周期数 N_p ($N_p = \Delta\tau_{x1}/\Delta T$, ΔT 为时间分辨率) 更小; $L(n)$ 为倒滤波窗, 即

$$L(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n < n_0, \\ 0, & n_0 \leq n < N-1. \end{cases}$$

其中的 FFT 处理参数选择为: 采样频率 $f_s = 128\text{Hz}$, 频率分辨率 $\Delta f = 0.0625\text{Hz}$, 取样长度 $T = 16\text{s}$, 时间分辨率 $\Delta T = 7.81\text{ms}$, 采样点数 $N = 2048$.

3 结果与讨论

对滑、弦、细三种脉象的分析处理结果如表 1 和图 3 所示.

(1) 倒谱上滑脉与弦、细脉的特征差异要比在时域^[2]和频域内的差异大得多. 如图 3(a) 中 b 所示, 滑脉在 $\tau = \tau_x$ 处的倒谱峰十分显著, 即 h_{c0}/h_{c1} 值比其它两种脉的为小, h_{c1}/h_{c2} 值比其它二者的大. 产生这种特征的原因是滑脉频域内的谐波较多, 且几乎成简谐函数. 因此, 脉象倒谱上 $\tau = \tau_x$ 处的峰值大小可表征脉象的“流利”程度. (2) 对于不同的脉象, 倒谱上 $\tau = \tau_x$ 处的谱峰位置稍有不同, 此不同来源于各个脉象频率的不同, 即 τ_{x1} 恰好反映了脉象的周期大小. (3) 从表 1 中 h_{c0} 值可以看出: 滑脉的 h_{c0} 值为 10.04dB, 弦脉的为 7.45dB, 细脉的为 5.19dB, 这充分说明了倒谱上的 h_{c0} 值正好反映了脉搏强度的信息特征, 实验结果证实了理论分析的正确性. (4) 从倒滤波谱上获得了其共振峰频率. 滑脉出现两个共振峰: 3.28

表 1 三种脉象的谱特征值($\bar{x} \pm SD$)^{a)}

脉象名称	例数	倒 谱						倒滤波谱			
		第一主峰高度 h_{c0} (dB)	第二主峰高度 h_{c1} (dB)	第三主峰高度 h_{c2} (dB)	h_{c0}/h_{c1}	h_{c1}/h_{c2}	周期 T_p (ms)	共振峰		谱能比	
								个数 M	频率 (Hz)	E_3/E_{50} (%)	E_{10}/E_{90} (%)
滑脉	33	10.04 ± 1.94	3.52 ± 0.55	0.83 ± 0.13	2.85	4.24	715.2 ± 78.1	2	3.28 ± 0.52 7.24 ± 1.21	89	99
弦脉	48	7.45 ± 0.81	1.67 ± 0.80	0.92 ± 0.41	4.46	1.82	941.4 ± 82.6	4	2.31 ± 0.18 5.90 ± 0.37 9.56 ± 0.63 14.10 ± 0.76	72	98
细脉	24	5.19 ± 1.57	1.04 ± 0.38	0.46 ± 0.16	4.99	2.26	936.6 ± 44.9	1	4.63 ± 0.95	85	99

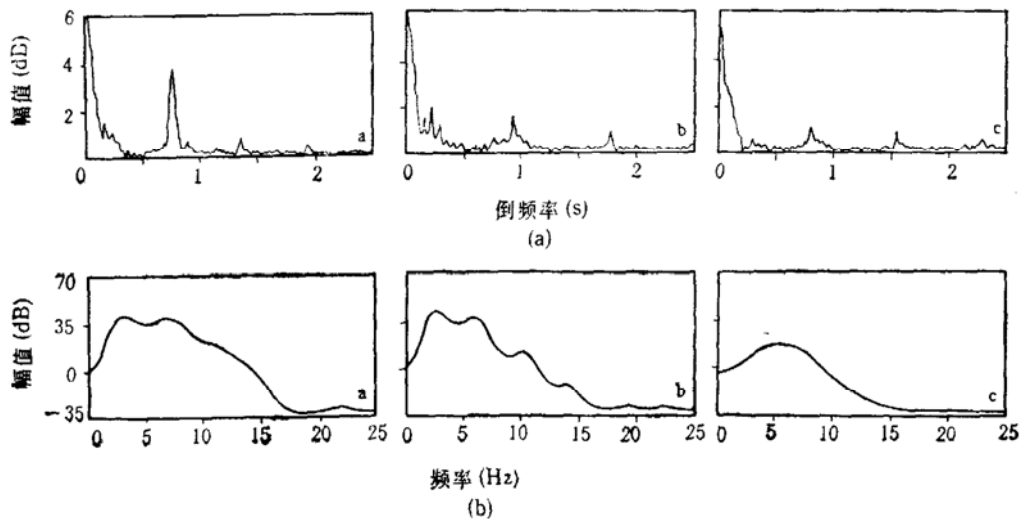
a) 表中 E_i 为 0—iHz 内的功率谱能量。

图 3 三种脉象的倒谱(a)与倒滤波谱(b)

a——滑脉, b——弦脉, c——细脉

Hz; 7.24 Hz. 弦脉出现四个共振峰频率: 2.31 Hz; 5.90 Hz; 9.56 Hz; 14.10 Hz. 而细脉仅有一个共振峰: 4.63 Hz. (5) 本文采用模糊模式识别的原理^[6], 对所获取的脉象谱图特征值进行了筛选, 用倒谱第一主峰高度 h_{c0} 、高度比 h_{c0}/h_{c1} 、 h_{c1}/h_{c2} 、传递函数的共振峰数目 M 和脉象周期 T_p (即 τ_s 值) 作为元素, 拟合^[1]出了三种脉象的特征模糊集:

滑脉: $A_1 = (0.72, 0.15, 0.60, 0.33, 0.18)$,

弦脉: $A_2 = (0.48, 0.39, 0.12, 1.00, 0.73)$,

细脉: $A_3 = (0.27, 0.47, 0.21, 0, 0.46)$.

将临床获取的 74 倒脉象 (滑脉 21 例, 弦脉 28 例, 细脉 25 例) 的特征模糊集 $X_i (i = 1, 2, \dots, 74)$ 分别与 A_1, A_2, A_3 进行处理, 求得贴近度 $(X_i, A_1), (X_i, A_2), (X_i, A_3)$, 再根据择近原则对

1) 王炳和, 硕士学位论文(待发表).

X_i 归类,将辨识结果返回临床与中医切脉结果对证,发现对三种脉象的符合率平均在 85% 以上。

参 考 文 献

- [1] 上海中医学院,上海中医药杂志,1979,(10): 43—45.
- [2] 北京中医学院,上海中医药杂志,1980,(2): 8—11.
- [3] 张丽蓉等,中华妇产科杂志,1980,(15): 156.
- [4] Lee, C. T., We, L. Y., *IEEE Trans. BME*, 1983, 30:348—352.
- [5] Randall, R. B., *Frequency Analysis*, B&K Press, Denmark, 1987, 272—301.
- [6] 冯德益等,模糊数学方法与应用,地震出版社,1983.