

# 多分辨率分析在 HRV 信号分析中的应用

单立场,蔡坤宝,王永东

(重庆大学 通信工程学院,重庆 400030)

**摘要:**根据 HRV 信号的随机特性,采用小波变换中的多分辨率分析算法对其进行分析,旨在提取海洛因吸毒者 HRV 信号的异常信息。基于小波变换的 HRV 信号的尺度谱携带有人体健康状况的重要特征信息,应用多分辨率分析法,对 22 例海洛因成瘾者和 22 例正常人的 HRV 信号进行 6 尺度分解,计算尺度系数和各小波系数的能量,除  $Cd3$  (0.5~1Hz) 和  $Cd4$  (0.25~0.5Hz) 频段外,成瘾者能量的均值要大于正常人对应的值。研究结果表明,小波包变换是提取海洛因吸毒者 HRV 信号中异常信息的有效工具。

**关键词:**小波变换;多分辨率分析;心率变异性

**中图分类号:**TP399

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2008)01-0250-04

## Application of Multi Resolution Analysis to HRV Signal Analysis

SHAN Li-chang, CAI Kun-bao, WANG Yong-dong

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** According to the randomness of heart rate variability signals, the multiresolution analysis of the wavelet transform is used to analyze such signals in this paper. Its purpose is to extract the abnormal information from the HRV signals of heroin druggers. The scale spectrum based on the wavelet transform of pulse signals carries the important characteristic information of the health situation of human body. In this paper, the heart rate variability signals of 22 heroin druggers and 22 healthy persons are decomposed into 6 layers with multiresolution analysis and calculated the energy of every scaling coefficient and wavelet coefficient. It is found that the mean values of the energy of the decomposition coefficient in subspaces  $Ca6$ ,  $Cd6$ ,  $Cd5$ , ...,  $Cd1$  for heroin druggers, except for bands  $Cd3$  and  $Cd4$ , are all greater than the corresponding values for normal persons. The result shows that the wavelet transform is an effective tool to extract the abnormal information from the HRV signals of heroin druggers.

**Key words:** wavelet transform; multi resolution analysis; heart rate variability

## 0 引言

心率变异性(Heart Rate Variability, HRV)是指连续心跳期间的微小涨落。经典的体内平衡理论认为,在正常状态下心血管系统的其它生理系统是稳定的,但近来研究结果却表明,健康人即使在稳定状态下其心率也有涨落。产生心率波动的因素很复杂,包括脑的高级神经活动、中枢神经系统的自发性节律活动和呼吸等,但最终影响心率波动的是交感神经和迷走神经活动的紧张性、均衡性及其对心血管系统的影响。临床医学还证明:急性心肌梗塞、心脏病患者的猝死,充血性心衰、高血压、冠心病等心血管疾病甚至糖尿病患者的 HRV 都较正常人有显著的降低<sup>[1]</sup>。

笔者对海洛因成瘾者的 HRV 信号进行了研究,毒品对人体中枢神经的损伤在医学上早有定论,然而对海洛因成瘾者 HRV 的研究还不太深入。有人对成瘾者和正常人的功率谱进行研究后发现,两者的高频谱峰的频率位置有差异<sup>[2]</sup>。应用小波变换对训练有素的运动员和久坐者的 HRV 信号分析后发现,在 5 个不同的频段上,运动员 HRV 信号的功率分布明显高于久坐者<sup>[3]</sup>。笔者应用小波变换多分辨率分析对海洛因成瘾者和正常人的 HRV 信号作 6 尺度分解,提取海洛因成瘾者 HRV 信号在各特定频带上功率分布的异常信息。

## 1 基本知识

小波变换方法是一种窗口大小固定但其形状可改变、时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法,即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低

收稿日期:2007-04-05

基金项目:重庆市自然科学基金项目(CST2004BB)

作者简介:单立场(1976-),男,安徽蒙城人,硕士研究生,从事信号处理在生物医学中的应用方面的研究。

的频率分辨率,非常适合用于研究生物医学信号<sup>[4]</sup>。

### 1.1 连续小波变换

小波必须满足以下容许条件:

$$c_{\Psi} = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (1)$$

满足上式的时间函数  $\Psi(t)$  称为母小波,简称为小波,式中  $\hat{\Psi}(\omega)$  为  $\Psi(t)$  的傅里叶变换。

将母小波伸缩和平移后得到的函数族

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a \in R^+, b \in R \quad (2)$$

称为分析小波。式中  $a$  为伸缩参数或尺度参数,取正实数。 $b$  为平移参数,可以取任意实数。对任一能量有限信号  $f(t) \in L^2(R)$ ,其连续小波变换定义为:

$$Wf(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \langle f(t), \Psi_{a,b}(t) \rangle \quad (3)$$

式中星号表示取共轭。

如果  $\Psi(t) \in L^2(R)$  且满足容许条件(1),则对任意  $f(t) \in L^2(R)$ ,均有

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{c_{\Psi}} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |Wf(a,b)|^2 \frac{da db}{a^2} \quad (4)$$

上式左边是信号的能量,故其小波变换的模的平方表示了信号能量在尺度与时间平面内的分布,通常将  $|Wf(a,b)|^2$  称为信号的尺度谱,记为  $P$ 。式(4)可以写成

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{c_{\Psi}} \int_0^{+\infty} \frac{1}{a^2} E(a) da \quad (5)$$

其中

$$E(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |Wf(a,b)|^2 db = \int_{-\infty}^{+\infty} P db \quad (6)$$

函数  $E(a)$  称为尺度-小波能量谱,它给出了信号在不同尺度  $a$  上的能量临界密度函数,反映了信号的能量随尺度的变化情况<sup>[5]</sup>。

### 1.2 多分辨率分析

若将分析小波参数  $a$  和  $b$  离散化,并取  $a = 2^{-j}$ ,  $j \in Z, b = 2^{-j}n, n \in Z$ ,则式(2)定义的分析小波可表示为  $\Psi_{j,n} = 2^{j/2} \Psi(2^j t - n)$ 。

定义满足下列条件的  $L^2(R)$  中的一列线性子空间  $\{V_j\}$  及一个函数  $\phi(t)$  为一个多分辨率分析(MRA)<sup>[6]</sup>:

$$1) V_j \subset V_{j+1}, \forall j \in Z;$$

$$2) f(t) \in V_j \Leftrightarrow f(2t) \in V_{j+1}, \forall f(t) \in L^2(R), \forall j \in Z;$$

$$3) \bigcap_{j=-\infty}^{+\infty} V_j = \{0\};$$

$$4) \overline{\bigcup_{j \in Z} V_j} = L^2(R), \text{这里用 } \overline{X} \text{ 表示集合 } X \text{ 的闭包};$$

5)  $\phi(t) \in V_0$  且  $\{\phi(t-n), n \in Z\}$  是  $V_0$  的标准正交基。称  $\phi(t)$  为此多分辨率分析的尺度函数。而函数系  $\{\phi_{j,n}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - n), n \in Z\}$  为  $V_j$  的标准正交基。

$$\text{令 } h(n) = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(t) \phi(2t-n) dt \quad (7)$$

则有

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_n h(n) \phi(2t-n) \quad (8)$$

式(8)称为二尺度差分方程,它通过  $h(n)$  将尺度函数和尺度函数的二进压缩及平移联系起来。

定理:设  $\{V_j, j \in Z\}$  为多分辨率分析的一列线性子空间,  $\phi(t)$  为对应的尺度函数,总存在与它对应的正交小波  $\Psi(t)$ ,其傅里叶变换  $\hat{\Psi}(\omega)$  由下式给定:

$$\hat{\Psi}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} G\left(\frac{\omega}{2}\right) \hat{\phi}\left(\frac{\omega}{2}\right)$$

其中,  $H(\omega)$  为低通滤波器系数  $h(n)$  的离散时间傅里叶变换,  $G(\omega)$  为高通滤波器系数  $g(n) = (-1)^n h(1-n)$  的离散时间傅里叶变换。由  $\Psi(t)$  二进伸缩及整数平移后得到的函数族  $\Psi_{j,n}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - n)$  即是小波变换所需的分析小波。

### 1.3 多分辨率分析的实现

$L^2(R)$  空间的一个 MRA 产生尺度空间  $\{V_j\}_{j \in Z}$  和小波空间  $\{W_j\}_{j \in Z}$ 。因为

$$V_j = V_{j-1} \oplus W_{j-1} = V_j \oplus W_j \oplus W_{j+1} \oplus \cdots \oplus W_{j-1} (j < J)$$

$$\text{所以 } f(t) = \sum_{n \in Z} \langle f(t), \phi_{j,n}(t) \rangle \phi_{j,n}(t) =$$

$$\sum_{n \in Z} \langle f(t), \phi_{j,n}(t) \rangle \phi_{j,n}(t) + \sum_{j \leq j' < J, n \in Z} \langle f(t), \Psi_{j',n}(t) \rangle \Psi_{j',n}(t)$$

令  $a_j(n) = \langle f(t), \phi_{j,n}(t) \rangle$  为信号  $f(t)$  在尺度为  $j$  时的尺度系数,  $d_j(n) = \langle f(t), \Psi_{j,n}(t) \rangle$  为信号  $f(t)$  在尺度为  $j$  时的小波系数。又有

$$a_j(n) = \langle f(t), \phi_{j,n}(t) \rangle = \sum_k h(k-2n) \langle f(t), \phi_{j+1,k}(t) \rangle = \sum_k h(k-2n) a_{j+1}(k) \quad (9)$$

$$d_j(n) = \langle f(t), \Psi_{j,n}(t) \rangle = \sum_k g(k-2n) \langle f(t), \Psi_{j+1,k}(t) \rangle = \sum_k g(k-2n) a_{j+1}(k) \quad (10)$$

这样只要确定  $V_j$  ( $J$  是一个确定的值) 空间的初始序列  $\{a_j(n)\}_{n \in Z}$ , 就可以得到任意尺度空间  $V_j$  ( $j < J$ ) 的所有尺度系数和小波系数。这就是离散小波变换的分解公式<sup>[7]</sup>。经笔者证明,离散时间信号  $x(n)$  的总能量可以利用小波变换的尺度系数和小波系数计算得到,其公式如下:

$$\sum_n |x(n)|^2 = \sum_n |a_j(n)|^2 = \sum_n |a_j(n)|^2 + \sum_{j \leq j' < J} \sum_n |d_{j'}(n)|^2 \quad (11)$$

因此离散时间信号的尺度谱  $P$  就可以定义为  $|a_j(n)|^2$  或  $|d_{j'}(n)|^2 (j \leq j' < J)$ 。为了便于区分,定义  $P_a = |a_j(n)|^2$  为信号的低频尺度谱,  $P_d' = |d_{j'}(n)|^2$  为高频尺度谱。函数  $E_a$  和  $E_d(j')$  分别定义为

$$E_a = \sum_n |a_j(n)|^2 = \sum_n P_a \quad (12)$$

$$E_d(j') = \sum_n |d_{j'}(n)|^2 = \sum_n P_d' \quad (13)$$

函数  $E_a$  和  $E_d(j')$  反映了信号的能量随尺度的变化情况。对应于  $P_a$  和  $P_d'$ , 可以把  $E_a$  称为低频尺度-小波能量谱,  $E_d(j')$  称为高频尺度-小波能量谱<sup>[5]</sup>。

心率变异性信号的获取传统上是从心电信号 R-R 间期获得,文中所得的心率变异性信号是从左手关位的脉搏信号 B-B 间期获取的,研究资料表明虽然数据获取不同,但实质上是相同的。脉率的变化和心率的变化是一致的,心动周期的长度决定着脉动周期的长短。文中分析的 HRV 信号是通过压力传感器 (MP100 型)在海洛因成瘾者和正常人的左关部位取得的脉象信号,经过滤波、放大及预处理,在计算机控制下,以 128Hz 的抽样频率进行采集,提取 R-R 间期后经变换,再经重采样获取的<sup>[2]</sup>。

## 2 HRV 信号的多分辨率分析

利用前述的多分辨率算法对 44 例 HRV 信号分别进行小波变换。被测对象为 22 例吸毒者(男性为 17 人,女性为 5 人,年龄为 17~40 岁,心率为  $91 \pm 14$  (beat/min))和 22 例正常人(男性为 17 人,女性为 5 人,年龄为 22~31 岁,心率为  $71 \pm 8$  (beat/min))。在 HRV 的获取处理中,重采样频率为 4Hz,现利用多分辨率分解的方法,对其进行小波分析,步骤如下:

1)首先去除直流成分,图 1(a)是去直流前的 HRV 信号,图 1(b)是去直流后 HRV 信号。

2)去直流后,取 HRV 信号 512 点进行 6 层分解进行多分辨率分析。各频段对应频率关系如表 1 所示,信号 Mallat 分解过程如图 2 所示。

3)经多分辨率分解过后,计算各频段上系数的能量分布:

$$P_i = \frac{c_i^2}{\sum_{k=1}^n c_k^2} \quad (14)$$

其中  $c_i$  是多分辨率分解各层小波系数,  $i = 1, \dots, 6$ , 包括 Cd1 ~ Cd6 细节信号和 Ca6 逼近信号。

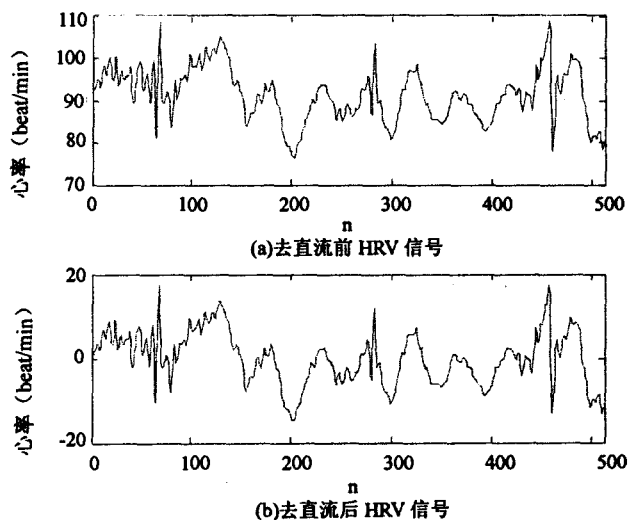


图 1 去直流前后 HRV 信号

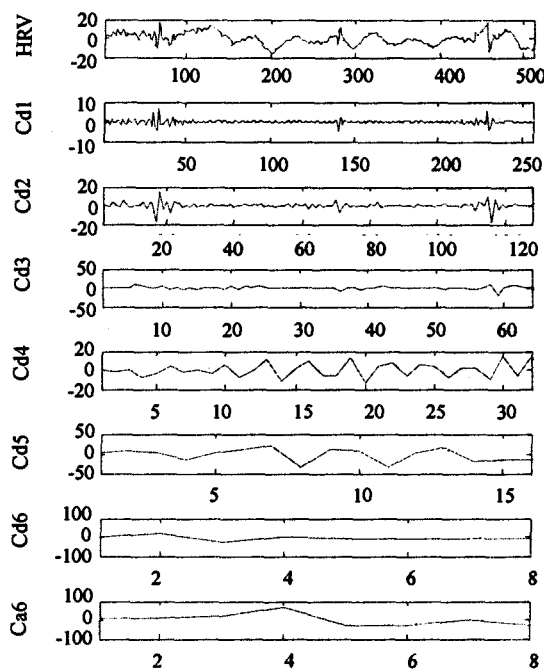


图 2 HRV 信号 Mallat 分解图

表 1 各结点对应频段

2 ~ 4Hz	Cd1
1 ~ 2 Hz	Cd2
0.5 ~ 1 Hz	Cd3
0.25 ~ 0.5 Hz	Cd4
0.125 ~ 0.25 Hz	Cd5
0.0625 ~ 0.125 Hz	Cd6
0 ~ 0.0625 Hz	Ca6

表 2 给出了正常人和成瘾者在各细节信号和逼近信号上的能量分布均值,从表上可以看出,除 Cd3 (0.5 ~ 1)Hz 和 Cd4 (0.25 ~ 0.5)Hz 频段外,成瘾者能量的均值要大于正常人对应的值。

表2 结点能量分布均值

结点	正常人	结点	成瘾者
Cd1	0.0026	Cd1	0.0066
Cd2	0.0249	Cd2	0.0390
Cd3	0.1050	Cd3	0.0718
Cd4	0.1041	Cd4	0.0812
Cd5	0.1301	Cd5	0.1542
Cd6	0.1046	Cd6	0.1061
Ca6	0.5287	Ca6	0.5412

4) 计算 Shannon 熵:

$$E = - \sum_i p_i \log_2(p_i) \tag{15}$$

计算正常人和海洛因成瘾者的 Shannon 熵的均值,正常人的 Shannon 熵均值要大于成瘾者对应的值。

### 3 结 论

利用小波变换的多分辨率算法分析海洛因成瘾者的 HRV 信号,从新的角度揭示了隐含于信号内部的更多有用信息。上述研究结果对戒毒治疗的药物筛选和疗效的评估提供了更多客观的指标。文中进行的研

(上接第 249 页)

#### 3.2 进一步的工作

交互设计的方法有很多,可以是以用户为中心来设计,可以基于使用场景来设计。基于流程的设计方式是在考察了传统的管理信息系统重视流程设计的基础上建立起来的。在实际的应用中,需要对流程的许多细节方面做出分析。同样基于流程的设计方法不是孤立的,还需要与其他的方法进行结合。例如在定义角色、考察交互特点的时候,需要借鉴以用户为中心的设计方式;在定义交互类型的时候需要考虑到不同场景的情况等。

### 4 总 结

试着从交互设计的概念入手,明确了交互设计的重要性的意义。然后结合管理信息系统自身的概念和所遇到的挑战,提出将交互设计的思想引入管理信息系统的设计中去。最后就基于流程的管理信息系统的交互设计的方法展开讨论。此方法的核心思想是结合企业的流程分析,在此基础上进行交互设计的分析,具有一定的可操作性。

究是初步的,其结论是在小样本的情况下得到的。在后续的研究工作中将进行大样本的分析和医学证实。

#### 参考文献:

- [1] 邵锐光. 对 200 例吸毒者之临床分析[J]. 广东微量元素科学,1994,1(1):47-49.
- [2] 朱英华,蔡坤宝,王永东. 海洛因成瘾者的心率变异性研究[J]. 生物医学工程杂志,2002,19(1):68-70.
- [3] Verlinde D, Beckers F. Wavelet Decomposition Analysis of Heart Rate Variability in Aerobic Athletes [J]. Autonomic Neuroscience: Basic & Clinical,2001,90(7):138-141.
- [4] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [5] 于丙星,蔡坤宝. 小波变换在吸毒者脉象信号分析中的应用[J]. 重大学报,2006,29(12):48-51.
- [6] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [7] MALLAT S G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1989,2(7):674-693.

#### 参考文献:

- [1] Jennifer P. Interaction Design: beyond human-computer interaction[M]. [s.l.]:John Wiley & Son, Inc, 2002.
- [2] Cooper A. 交互设计之路——让高科技产品回归人性[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [3] Laudon K C, Laudon J P. Management Information System: Organization and Technology in the Networked Enterprise [M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [4] 石 扬,张燕平. 基于 Struts+ Spring+ Hibernate 的 Web-MIS 开发研究[J]. 计算机技术与发展,2007,17(1):46-48.
- [5] 徐 迟. Ajax 模式在异步交互 Web 环境中的应用[J]. 计算机技术与发展,2006,16(11):228-230.
- [6] Granlund A. A Pattern-Supported Approach to the User Interface Design Process[C]// Proceedings of HCI International 2001 9th International Conference on Human-Computer Interaction. New Orleans, USA: [s. n. ],2001.
- [7] Tokuda Y, Lee E S, Shiratori N. Synthetic and Analytic Methods for User-Computer Interaction Design[C]// Proceedings of the 13th International Conference on Information Networking. Washington DC, USA: [s. n. ],1998.

《计算机技术与发展》欢迎投稿,欢迎订阅。