

# 利用双谱分析的癫痫脑电特征研究

艾玲梅<sup>1</sup>, 黄力宇<sup>1</sup>, 黄远桂<sup>2</sup>, 王 珏<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学生物医学工程研究所, 710049, 西安; 2. 第四军医大学西京医院神经内科, 710032, 西安)

**摘要:** 根据癫痫患者脑电信号具有非高斯、非线性随机特性,应用高阶累积量技术对癫痫患者的脑电信号进行双谱估计,研究了在不同发病阶段的脑电信号的高斯偏离程度,以获取更加敏感和准确的临床监护和发病预报参量.用参数模型法进行双谱估计,并根据奇异值分解最小二乘法求解模型参数,从而获得高分辨率的双谱估计值和有效的脑电相位信息.用功率谱对高阶谱进行规范,规范化结果可作为相关系数,通过估计双相关系数找出它与癫痫发作的关系.实验结果表明,患者在癫痫发作前、开始发作和发作期,双谱的等高线图具有明显的尖峰,在癫痫发作时的脑电双相关系数值要比癫痫发作前和发作后的系数值高得多,使得脑电波的非高斯性和非线性增强.双谱分析为癫痫脑电信号的研究提供了一些新的思路,双相关系数有望成为临床监护、预报癫痫发作的一个指标.

**关键词:** 癫痫;脑电图;双谱

**中图分类号:** R318104 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)10 - 1097 - 04

## Study of Epileptic Electroencephalogram Using Bispectrum Analysis

Ai Lingmei<sup>1</sup>, Huang Liyu<sup>1</sup>, Huang Yuanguai<sup>2</sup>, Wang Jue<sup>1</sup>

(1. Institute of Biomedical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Neuropathology, Xijing Hospital, Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** Based on the fact that the signals of epileptic electroencephalogram (EEG) possess non-Gaussian and nonlinear stochastic properties, the higher-order statistic methods were used to estimate the bispectrum of epileptic EEG. The Gaussian deviations of the EEGs in different stages of seizure were studied, in order to obtain more sensitive and accurate parameters for clinical epileptic monitoring and seizure prediction. By using the parameter model method to estimate bispectrum of EEG, model parameters are determined based on the singular value decomposition least square method. Thereby the bispectrum estimation with a high resolution and some available EEG phase information can be obtained. The higher order spectrum is normalized with conventional power spectrum, and the result show can be used as coherence coefficient, and its relation with epileptic seizure can be found by estimating the coefficient. The experimental results show that contour diagrams of bispectrum possess obvious peaks in paroxysm, so and before begin paroxysm of epileptic, and bicoherence coefficient of EEG is very high before after paroxysm, so it boosts up non-Gaussian and nonlinear of brain wave. It can offer some new ideas for research of epileptic EEG and they may be potential parameters for clinical epileptic monitoring.

**Key words:** epilepsy; electroencephalogram; bispectrum

高阶累积量(高阶谱)分析是信号处理的常用方法之一,它具有许多独到的优点<sup>[1]</sup>,如能保留系统的

相位信息、可辨识非最小相位系统和消除高斯噪声等<sup>[2, 3]</sup>.脑电是脑神经细胞的电生理活动在大脑皮

收稿日期: 2003 - 12 - 31. 作者简介: 艾玲梅(1965~),女,博士生;黄力宇(联系人),男,副教授. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60371023).

层和头皮表面表现出的电位变化,它除了能提供一  
些疾病(癫痫、脑血栓、精神失常等)的诊断信息外,  
还可用作睡眠监护、药物定量等方面的研究.值得指  
出的是,由于脑电是由大量脑神经细胞在高度相关  
的状态下的电活动在头皮上的总体效应,因此脑电  
具有高度的复杂性.脑电的高阶统计量分析法能反  
映脑电的高阶统计特征,这比传统的功率分析法更  
具优势<sup>[4]</sup>.

目前,已有几种生理条件下的脑电双谱分析法  
研究取得了进展<sup>[5,6]</sup>.本文试图用双谱分析来研究  
癫痫的不同发作期的脑电特征,以寻求更加敏感、准  
确的癫痫病临床监护和发作预报参量.

## 1 高阶谱估计法

### 1.1 双谱的定义

令  $x(n)$  为一稳定的零均值随机过程,其 3 阶  
累积量<sup>[1]</sup>

$$C_{3x}(m_1, m_2) = E\{x(n)x(n+m_1)x(n+m_2)\} \quad (1)$$

与其 3 阶矩一致.其中,  $m_1, m_2$  为任意延迟,  $E\{\cdot\}$  为  
数学期望.由此,  $x(n)$  的双谱

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \sum_{m_2=-\infty}^{\infty} C_{3x}(m_1, m_2) \cdot \exp\{-j(\omega_1 m_1 + \omega_2 m_2)\} \quad (2)$$

可定义为  $C_{3x}(m_1, m_2)$  的二维傅里叶变换.因为 3 阶  
累积量与 3 阶矩相同,所以双谱既是 3 阶累积量谱,  
也是 3 阶矩谱.

### 1.2 主要的性质和计算

可用经典法和参数模型法来分析高阶累积量的  
频谱.经典法是利用快速傅里叶变换及加窗技术进  
行谱估计的,由于数据长度的限制,可用

$$\hat{C}_{3x}(m_1, m_2) = \sum_{n=N} \{x(n)x(n+m_1)x(n+m_2)\} \quad (3)$$

$$\hat{B}_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{m_1=-L}^L \sum_{m_2=-L}^L \hat{C}_{3x}(m_1, m_2) W(m_1, m_2) \cdot \exp\{-j(\omega_1 m_1 + \omega_2 m_2)\} \quad (4)$$

计算双谱,其中的  $W(m_1, m_2)$  是窗函数.

经典双谱法一般较大的估计方差,通常需要  
经过长时间的数据观测才能解决这一问题.虽然可  
以通过增大数据长度来减小方差,但是数据长度的  
增大不仅会增加计算量,而且还可能引发非平稳性.  
为了克服经典双谱估计的不足,可采用参数模型法  
进行双谱估计.在数据观测时间较短的情况下,参数

模型法能够提供高分辨率的双谱估计,能有效地提  
取信号的相位信息,不仅如此,用它还可以在激励信  
号的非高斯分布未知的情况下进行双谱估计.

设采样后的信号为  $x(n)$  且均值为 0,则该信号  
的参数模型<sup>[2]</sup>估计为

$$x(n) = \sum_{k=1}^p a(k)a(n-k) + (n) \quad (5)$$

式中:  $(n)$  为非高斯白噪声序列,可由高斯白噪声  
通过非线性变换获得.又设  $(n)$  的 3 阶矩不为 0,即  
 $E\{^3(n)\} \neq 0$ ,并对式(5)求 3 阶累积量,可得

$$C_{3x}(\omega_1, \omega_2) = \sum_{k=1}^p a(k) C_{3x}(k - m_1, k - m_2) + (m_1, m_2) \quad (6)$$

在求得模型参数  $|a(k)|$  之后,对信号进行参数  
化双谱估计,即

$$\hat{B}_3(\omega_1, \omega_2) = H(\omega_1)H(\omega_2)H(\omega_1 + \omega_2) \quad (7)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^p a(k)\exp(-j\omega k)} \quad (8)$$

式中:  $H(\omega)$  为自回归(AR)模型(1)的传递函数.

在求解模型参数的算法上,可采用奇异值分解  
总体最小二乘法(SVD-TLS),该算法具有很好的数  
值鲁棒性.

### 1.3 双相关系数

对于随机过程  $\{x_1\}$ ,若其为高斯分布,则  $\omega_1, \omega_2$   
的 3 阶中心矩  $C(\omega_1, \omega_2) = 0$ .由式(2)可知,双谱  
 $B(\omega_1, \omega_2)$  的幅值也为 0,因而  $|B(\omega_1, \omega_2)|$  可以作  
为随机过程  $\{x_1\}$  偏离高斯分布的一个测量.用功率  
谱对多谱进行规范化,我们称这种规范化结果为相  
关系数.由此,随机过程  $\{x(n)\}$  的双相关系数为<sup>[7]</sup>

$$I_{2x}(\omega_1, \omega_2) = \frac{B_x(\omega_1, \omega_2)}{(P_x(\omega_1)P_x(\omega_2)P_x(\omega_1 + \omega_2))^{1/2}} \quad (9)$$

式中:  $P_x(\omega)$  为功率谱.

由于高斯过程的高阶累积量恒等于 0,所以当  
双相关系数和三相关系数对所有  $\omega_i$  都恒等于 0 时,  
就判断该过程为高斯过程,否则必是非高斯过程.通  
过估计双相关系数和处理癫痫的脑电信号,我们希  
望能够从中找到该参数与癫痫发病期的一些关系.

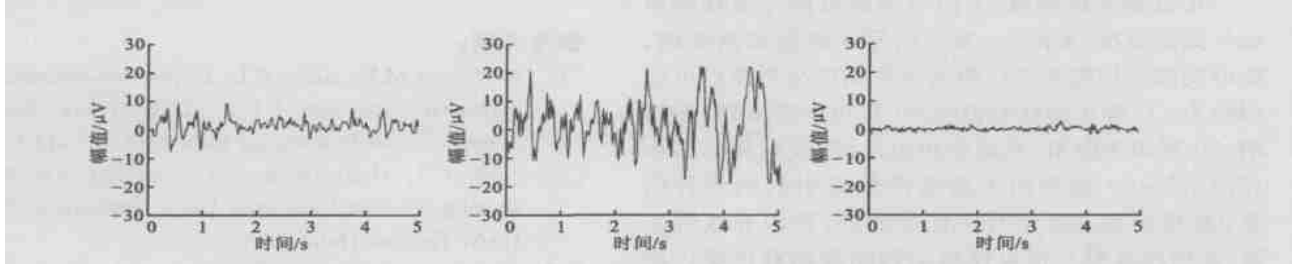
## 2 实验结果

研究数据来源于第四军医大学西京医院临床癫  
痫病例.实验仪器包括 QDBS1018 系列定量数字脑  
电图机、频率/间隔可调闪光刺激器、功率谱分析仪、

比值检验仪、三维脑电地形图、24 小时实时监测仪、棘波自动识别记录仪等。电路设计时采用光电隔离,输入电路具有很强的抗干扰能力。实验用的是 8 导双极导联,采样频率是 200 Hz。图 1 是一个患者在癫痫发病期的脑电波形片段。

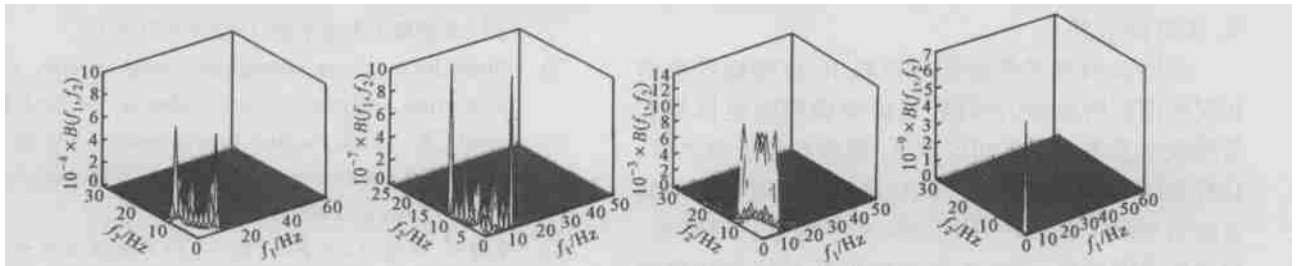
通过上述的双谱算法计算,很容易得到双谱的等高线图,如图 2 所示。

根据式 (9),且由双谱值和功率谱可以得到某一频率下的双相关系数,其中 3 个导联的最大值如表 1 所示,3 个导联的最大值变化如图 3 所示。



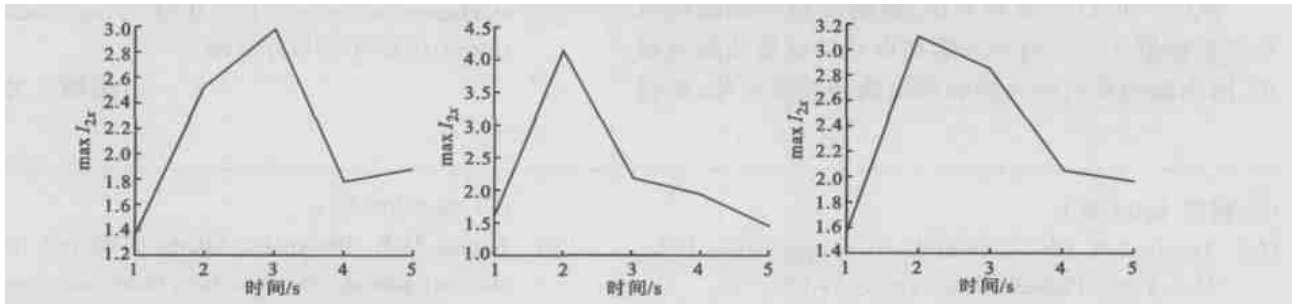
(a) 发病前 (b) 发病时病人手、脚痉挛 (c) 发病后病人大脑处于抑制状态且神志尚不清醒

图 1 某癫痫患者的脑电波形片段



(a) 发病前 (b) 发病时病人手、脚痉挛 (c) 发病后病人神志尚不清醒 (d) 病人恢复神志尚不清醒

图 2 与图 1 对应的癫痫发病时的脑电双谱等高线图



(a) 发病前 (b) 发病时 (c) 发病后

图 3 癫痫发病状态 3 个导联的双相关系数的最大值变化

表 1 癫痫发病状态 3 个导联双相关系数的最大值

导联选择	max $I_{2x}$				
	发病前	开始发病	发病期间	发病结束	结束后 2 min
1	11359 5	21508 3	21966 1	11771 1	11871 6
2	11608 1	41148 5	21170 9	11929 4	11427 4
3	11529 6	31119 4	21868 6	21052 9	11973 4

第2~第4导联数据的双相关系数的最大值分别代表右前颞与中央、左中央与左枕、右中央与右枕之间的脑电电位。

### 3 讨论

在信号处理领域,人们习惯假设信号或者噪声服从高斯分布.实际上,真实信号大都是非高斯的,所以我们使用高阶统计量的主要动机与出发点可以归结为: 抑止加性有色噪声(其功率谱未知)的影响; 辨识非因果、非最小相位系统,或重构非最小相位信号; 抽取由于高斯性偏离引起的各种信息; 检测和表征信号中的非线性,辨识非线性系统.高阶统计量不仅可以自动抑制高斯有色噪声的影响,而且有时也能够抑制非高斯有色噪声的影响.高阶统计量之所以能够大大超越功率谱和相关函数的统计量,是因为它包含了二阶统计量所没有的大量、丰富的信息.

从图2的双谱等高线可以看出,在癫痫发病前和发病期有明显的尖峰值,这说明癫痫脑电信号在某些频率发生了平方相位耦合.癫痫发病结束之后,只有在(0,0)坐标点具有峰值,这说明此时病人的脑电波频率除了在(0,0)附近外,基本趋于高斯特性.特别要说明的是,在各个发病时期所对应的功率谱的变化没有特别大的差异,提示用传统功率谱估计方法分析脑电信号存在固有缺陷.

从图3可以明显地看出,癫痫发病时的脑电双相关系数值比发病前和发病结束后的系数值要高得多,因为癫痫发病时大脑表现出病理波形特征,使得

脑电波的非高斯性和非线性增强,所以双相关系数值明显变大.

本文的一些初步研究结果表明,双谱分析可以用于脑电信号的研究,特别是双相关系数,有望成为一种敏感的临床癫痫监护和诊断的指标.

#### 参考文献:

- [1] Raghuvver M R, Nikias C L. Bispectrum estimation: a parametric approach [J]. IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Processing, 1985, 33(5): 1 213 - 1 230.
- [2] Nikias C L. Higher - order spectra analysis: a nonlinear signal processing framework [M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice2Hall, 1993.
- [3] Nikias C L, Raghuvver M R. Bispectrum estimation: a digital signal processing framework [J]. Proc IEEE, 1987, 75(7): 869 - 891.
- [4] 陈力,吴祈耀. 双谱分析在脑电信号处理中的应用[J]. 北京理工大学学报, 1992, 12(3): 6 - 13.
- [5] Zhang Jiwu, Zheng Chongxun, Jiang Dazong, et al. Bispectrum analysis of focal ischemic cerebral EEG signal [A]. 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Hong Kong, 1998.
- [6] 牛海军,万明习,王素品,等. 不同种类肺音信号的双谱分析[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(5): 486 - 490.
- [7] Huber P J, Kleiner B, Gasser T, et al. Statistical methods for investigating phase relations in stationary stochastic processes [J]. IEEE Tran Audio Electroacous, 1971, 19(1): 78 - 86.

(编辑 苗凌)

(上接第1093页)

- [5] Tsornis A A. Chaos: from theory to applications [M]. New York: Plenum Press, 1992: 149 - 179.
- [6] Nason G P, Silverman B W. The stationary wavelet transform and some statistical applications in wavelet and statistics [A]. Lecture Notes in Statistics [C]. Berlin: Springer2Verlag, 1995. 281 - 299.
- [7] Takens F. Detecting strange attractors in fluid turbulence [A]. Dynamical Systems and Turbulence [C]. Berlin: Springer2Verlag, 1981: 366 - 381.
- [8] Farmer J D, Sidorowich J J. Exploiting chaos to predict the future and reduce noise [A]. Evolution, Learning and Cognition [C]. Singapore: World Scientific, 1988: 277 - 330.
- [9] Kennel M B, Brown R, Abarbanel H D I. Determining embedding dimension for phase space reconstruction using a geometrical construction [J]. Phys Rev: A, 1992, 45(6): 3 40323 411.
- [10] Fraser A M, Swinney H L. Independent coordinates for strange attractors from mutual information [J]. Phys Rev: A, 1986, 33(2): 1 134 - 1 140.
- [11] Sun J C, Zhang T Y, Liu F. Nonlinear prediction of fast fading channel parameters based on the chaotic attractor [A]. IEEE 6th CAS Symposium on Emerging Technologies, Shanghai, 2004.

(编辑 刘杨)