

双谱估计在地震前兆数字化资料分析中的应用

刘希强, 周彦文, 李 红, 王 梅, 石玉燕, 张 坤

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘 要: 仿真信号的试验结果表明, 基于双谱的时延估计方法对高斯噪声具有屏蔽能力, 能更好地压制噪声, 并准确估计信号的时间延迟; 基于双谱功率谱重构要比直接用 FFT 变换方法估计功率谱具有更高的精度和性能; 初步研究结果表明, 对于正常背景下的前兆观测记录基于双谱的特征参数分布具有较好的一致性, 在异常背景下则表现出明显的离散性, 显现出双谱估计具有良好的异常信息识别能力。

关键词: 双谱理论; 时延估计; 功率谱重构; 双谱特征参数; 地震前兆异常识别

中图分类号: P315.61 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2007)03-0201-06

Application of Bispectrum Estimation in Digital Earthquake Precursory Monitoring Data

LIU Xi-qiang, ZHOU Yan-wen, LI Hong, WANG Mei, SHI Yu-yan, ZHANG Kun

(Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: The test results for emulative signal indicate that the time delay estimation method of bispectrum has the capacity to suppress Gauss noise and can accurately estimate the time delay of signals. Compared with Fourier transform method, the spectrum power reconstruction method of bispectrum has higher accuracy and capability. The research results show that the characteristic parameter distribution of bispectrum has a good consistent characteristics to the normal earthquake precursory monitoring data, but has a obvious dispersion characteristics to the abnormal data, which indicates that bispectrum has the discrimination capability to earthquake precursory anomalies in monitoring data.

Key words: Bispectrum theory; Time delay estimation; Power spectrum reconstruction; Bispectrum characteristic parameter; Earthquake precursory anomaly discrimination

0 引言

在数字化信号分析中信号的统计量起着极其重要的作用。最常用的统计量为均值(一阶统计量)、相关函数与功率谱密度(二阶统计量)。一、二阶统计量可以完全确定零均值平稳高斯过程的统计特性。但在实际问题中信号常具有非线性、非高斯性和非平稳特性, 而有时信号的非线性和高斯型偏差所产生的信息正是我们关注的。一、二阶统计量已不能刻画信号的非线性、非高斯性和非平稳特性, 高

阶统计量是解决这些问题的主要手段。

20 世纪 80 年代后期以来, 随着高阶统计理论进一步发展和完善, 高阶统计信号处理已经渗透到信号处理的各个应用领域, 并涌现出大量理论和应用研究成果^[1-11]。高阶统计量包括高阶累积量、高阶矩和高阶谱, 是信号处理学科的前沿性研究方向, 是研究非高斯过程, 非最小相位信号和非线性系统的有力工具。基于高阶统计量, 我们可以辨识非因果、非最小相位、非线性系统; 可以抑制高斯或非高

收稿日期: 2006-12-23

基金项目: 国家“十五”地震科技攻关项目(2004BA601B01-03-02); 山东省自然科学基金(Y2000E08)

作者简介: 刘希强(1964-), 男(汉族), 山东武城人, 研究员, 主要从事数字化地震波信号处理与应用研究。

斯的有色噪声;可以提取不同于高斯信号的多种信号特征;可以分析与处理循环平稳信号等。在信号处理方面,高阶统计量在去噪处理、时延估计和特征提取方面将具有发展前景^[2,12-17]。

我国前兆数字化台网运行以来,由于采样率水平的提高导致了观测数据更易受到非震因素的干扰。为客观认识前兆观测数据自身的变化规律,正确把握中强震前兆异常特征,需改进现有的分析方法。目前地震系统还未有见到更多地将高阶统计量方法应用于前兆数字化处理中的理论和应用研究成果,为此本文根据最新的理论和处理方法探讨了双谱估计方法在时延、功率谱估计和提取前兆异常信息方面的应用,以期在地震信号处理领域得到推广应用。

1 高阶谱估计的基本理论

1.1 高阶累积量

任何随机变量的概率特性可用随机变量的分布函数 $F(x)$ 、概率密度函数 $p(x)$ 、矩生成函数 $\varphi(\omega)$ 、累积量生成函数 $\psi(\omega)$ 、 n 阶原点矩 m_n 、 n 阶中心矩 μ_n 、 n 阶累积量 c_n 中的任何一个完整地进行描述。概率密度函数与分布函数、矩生成函数与概率密度函数、 n 阶原点矩与概率密度函数和矩生成函数、 n 阶中心矩与概率密度函数、 n 阶累积量与累积量生成函数之间的关系详见陆根源等^[9]书中的有关章节。

高斯随机变量的概率密度函数可表示为

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-a)^2} \quad (1)$$

由此可以计算出矩生成函数 $\varphi(\omega)$ 、累积量生成函数 $\psi(\omega)$ 、 n 阶原点矩 m_n 、 n 阶中心矩 μ_n 和 n 阶累积量 c_n ,具体表达式如下:

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) &= e^{ja\omega - \frac{1}{2}\sigma^2\omega^2} \\ \psi(\omega) &= ja\omega - \frac{1}{2}\sigma^2\omega^2 \\ m_1 &= a, \quad \mu_1 = 0, \quad c_1 = a \\ m_2 &= \sigma^2 + a^2, \quad \mu_2 = \sigma^2, \quad c_2 = \sigma^2 \\ m_3 &= 3a\sigma^2 + a^3, \quad \mu_3 = 0, \quad c_3 = 0 \\ m_4 &= a^4 + 6a\sigma^2 + 3\sigma^4, \mu_4 = 3\sigma^4, c_4 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

可见,高斯随机变量三阶以上累积量为 0,用累积量描述高斯分布比矩更简洁有效。因此用三阶以上累积量是否为 0 可判断随机变量是不是高斯的,用三阶以上累积量是否接近于 0 可判断随机变量是否接近高斯分布。

如果在 n 个时刻 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 研究随机过程,就

得到 n 维随机变量 $x_1 = x(t_1), x_2 = x(t_2), \dots, x_n = x(t_n)$ 。可以证明,一至三阶原点矩与累积量之间的关系是^[9]

$$\begin{aligned} m(x_i; t_i) &= cum(x_i; t_i) \\ m(x_i \cdot x_j; t_i, t_j) &= cum(x_i, x_j; t_i, t_j) \\ &\quad + cum(x_i; t_i) \cdot cum(x_j; t_j) \\ m(x_i \cdot x_j \cdot x_k; t_i, t_j, t_k) &= cum(x_i, x_j, x_k; t_i, t_j, t_k) \\ &\quad + cum(x_i; t_i) \cdot cum(x_j, x_k; t_j, t_k) \\ &\quad + cum(x_j; t_j) \cdot cum(x_i, x_k; t_i, t_k) \\ &\quad + cum(x_k; t_k) \cdot cum(x_i, x_j; t_i, t_j) \\ &\quad + cum(x_i; t_i) \cdot cum(x_j; t_j) \cdot cum(x_k; t_k) \end{aligned} \quad (3)$$

对于零均值平稳随机信号,即 $m(x_i; t_i) = cum(x_i, t_i)x(t) = 0$ 时,可得到二、三阶累积量的具体表达式如下:

$$\begin{aligned} cum(x_i, x_j; t_i, t_j) &= m(x_i \cdot x_j; t_i, t_j) \\ cum(x_i, x_j, x_k; t_i, t_j, t_k) &= m(x_i \cdot x_j \cdot x_k; t_i, t_j, t_k) \end{aligned} \quad (4)$$

可以看出,累积量是高阶互相关函数;二阶累积量就是随机信号 $x(t)$ 的自相关;三阶累积量就是 $x(t)$ 的三阶中心矩。二阶矩为信号概率分布的离散程度提供了一种度量,三阶中心矩揭示了信号过程的概率分布在均值附近的非对称特征。

1.2 高阶谱

功率谱定义为自相关函数的离散傅立叶变换。定义 k 阶谱为 k 阶累积量的 $k-1$ 维傅立叶变换,即

$$S_{kx}(\omega_1, \dots, \omega_{k-1}) = \int_{\tau=-\infty}^{+\infty} \dots \int_{\tau_{k-1}=-\infty}^{+\infty} cum(x_1, x_2, \dots, x_k; t, t+\tau_1, \dots, t+\tau_{k-1}) e^{-j\sum_{i=1}^{k-1} \omega_i \tau_i} d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_{k-1} \quad (5)$$

其中,三阶谱也称为双谱,是三阶累积量的二维傅立叶变换,写成数值积分形式为

$$B_{3x}(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} c_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j\omega_1 \tau_1} e^{-j\omega_2 \tau_2} \quad (\omega_1 \leq \pi, \omega_2 \leq \pi) \quad (6)$$

四阶谱(三谱)的数值积分形式为

$$T_x(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = S_{4x}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_3=-\infty}^{\infty} c_{4x}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) e^{-j\omega_1 \tau_1} e^{-j\omega_2 \tau_2} e^{-j\omega_3 \tau_3} \quad (7)$$

ω_1 和 ω_2 为分别与 τ_1 和 τ_2 对应的频点。

1.3 双谱估计方法

在实际中利用有限的观测数据对双谱进行估计

主要有二种方法:一种是常规的非参数方法,另一种是基于模型(AR, MA, ARMA)的参数方法。非参数方法是把可用来估计的有限观测数据分段,利用快速傅立叶变换(FFT)算法计算各段的离散傅立叶变换(DFT),进而估计所需各阶频域矩,利用累积量谱函数与矩谱函数之间的关系最后求得所需的高阶矩谱。这种方法的优点是估值量渐近无偏,计算量小,但估计的方差和分辨率不如参数模型法理想。而参数模型方法由于受背景噪声的影响,定阶准则很难应用^[18]。在本文工作中,采用非参数方法中的直接估计法。具体计算过程如下:

(1) 将数据 $\{x(1), \dots, x(N)\}$ 分成 K 段,每段 M 个样本,即 $N = KM$,并减去每段的样本均值。根据数据长度每段补零以适应 FFT 的长度 M 。

(2) 计算每段的 DFT 系数

$$Y^{(i)}(\lambda) = \frac{1}{M} \sum_{t=0}^{M-1} x^{(i)}(t) \exp(-j2\pi\lambda t/N),$$

$$\lambda = 0, 1, \dots, M/2; i = 1, \dots, K \quad (8)$$

其中, $x^{(i)}(t) t = 0, 1, \dots, M-1$ 为第 i 段的数据。

(3) 计算每段的谱,即

$$\hat{b}_i(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{1}{\Delta_0^2} \sum_{k_1=-L_1}^{L_1} \sum_{k_2=-L_1}^{L_1} Y^{(i)}(\lambda_1 + k_1) Y^{(i)}(\lambda_2 + k_2) Y^{(i)}(-\lambda_1 - \lambda_2 - k_1 - k_2) \quad (9)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, K; 0 \leq \lambda_2 \leq \lambda_1, \lambda_1 + \lambda_2 \leq f_s/2; f_s$ 为采样频率; $\Delta_0 = f_s/N$ 为频率样本间隔所要求的间隔。 N 和 L_1 满足 $M = (2L_1 + 1)N$ 。

(4) 双谱估计值为 k 段数据平均,即

$$\hat{B}_D(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \hat{b}_i(\omega_1, \omega_2) \quad (10)$$

其中 $\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{N} \lambda_1, \omega_2 = \frac{2\pi f_2}{N} \lambda_2$ 。

(5) 为了减小估计方差要对数据进行加窗平滑。所用窗函数为 Rao-Gabr 窗,具体表达式如下:

$$W(m, n) = \frac{\sqrt{3}}{\pi^3} (1 - \frac{m^2 + n^2 + mn}{L^2}) \quad (11)$$

其中 L 为傅立叶变换长度的一半。

双谱具有以下性质:

(1) 对于一个平稳的高斯随机过程,它高于二阶的高阶累积量和高阶谱为 0,这意味着双谱和高阶谱对高斯过程不敏感。

(2) 非高斯白噪声通过一线性系统后的高阶谱含有系统的相位信息。功率谱不包含相位信息,而双谱的相位谱确包含了系统的相位信息。因此只要

计算出系统输出过程的双谱,便可提取出系统的相位信息^[13]。

(3) 双谱丢失信号的线性相移信息,因此功率谱和双谱都会丢失线性相移信息。但两者的区别在于功率谱是不包含线性相位信息的,而双谱却包含相位信息,但可能与真实相差一个线性相移^[19]。

2 双谱估计在前兆数字化资料分析中的应用

2.1 时延估计

设 $\{x(t), y(t)\}$ 是两个观测记录,如果满足下列关系:

$$\begin{aligned} x(t) &= s(t) + w_1(t) \\ y(t) &= As(t-D) + w_2(t) \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $s(t)$ 是一未知信号; $s(t-D)$ 为时延信号; D 为延迟时间; A 为一比例常数; $w_1(t)$ 和 $w_2(t)$ 是零均值平稳噪声,与信号 $s(t)$ 独立。则称观测量 $x(t)$ 和 $y(t)$ 存在延迟相关性, D 即是欲求的时延估计量。

时延迟函数可用下式表示:

$$\begin{aligned} h(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_{xyz}(\omega_1, \omega_2)}{B_{3x}(\omega_1, \omega_2)} e^{j\omega_2 \tau} d\omega_1 d\omega_2 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A \cdot e^{j\omega_2 (\tau-D)} d\omega_1 d\omega_2 \\ &= A \cdot \delta(\tau-D) \end{aligned} \quad (13)$$

可见 $|h(\tau)|$ 在 $\tau = D$ 处存在一脉冲峰值。因此只要先求出信号 $x(t)$ 的自双谱和信号 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的互双谱,就可求出时间延迟。

按照式(12)构造一仿真信号,包括信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 。 $x(t)$ 是一个独立分布、零均值、单位方差的指数分布序列,其中掺杂了高斯白噪声; $y(t)$ 是 $x(t)$ 的时延信号,延迟为 16 个采样点,其中掺杂了高斯有色白噪声。有色白噪声是由高斯白噪声通过一个 MA 滤波器得到的,滤波器参数为 $[1, 2, 3, 4, 5, 6, 5, 4, 3, 2, 1]$ 。 $x(t)$ 和 $y(t)$ 信号曲线分别见图 1(a) 和图 1(b)(信号长度为 4 096 个采样点,为清楚起见,图 1 中只显示 256 个采样点)。图 1(c) 和图 1(d) 分别为基于互相关方法和双谱估计方法得到的对 $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间延迟相关的分析结果,两条曲线中的最大值都对第 16 个采样点处,这与实际仿真信号间的延迟是吻合的。双谱估计方法与互相关分析方法相比,由双谱估计得到的延迟对应最大值明显,该最大值的能量占总能量的 82.5%,而互相关分析方法确定的延迟对应最大值的能量仅占总能量的 32.1%,这说明用互相关分析方法分析相关信号时

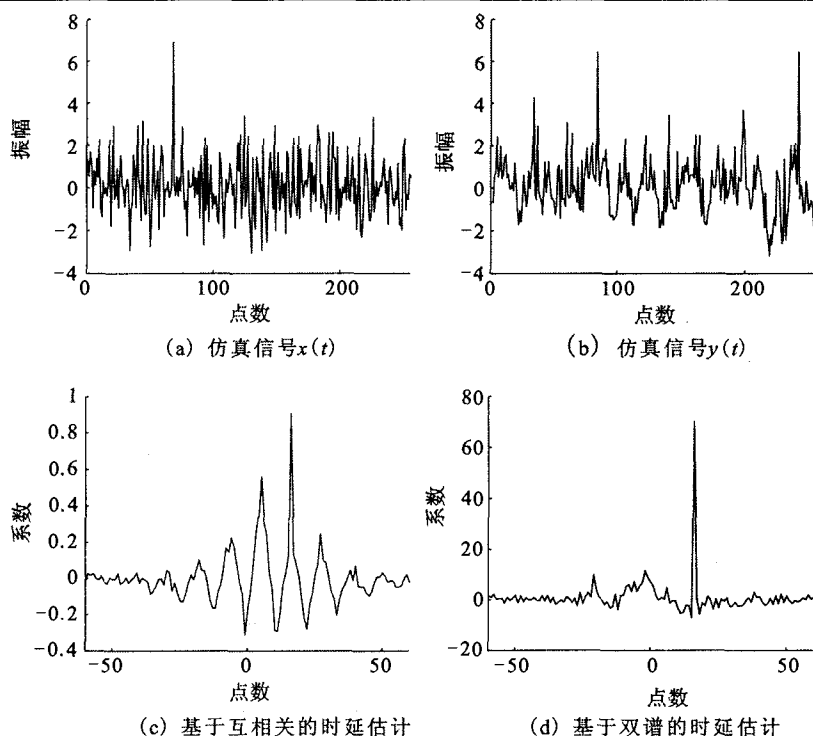


图 1 仿真信号的时延估计

Fig. 1 Time-delay estimation of emulative signals.

会受到高斯噪声的严重干扰,而基于双谱的时延估计方法对高斯噪声具有屏蔽能力,能更好地压制噪声,并准确估计信号的时间延迟。这与有关研究结果是一致的^[20-21]。

2.2 基于双谱的功率谱重构

双谱对高斯有色噪声有抑制作用,而功率谱对任何有色噪声都是敏感的^[22]。图 2(a)是最大振幅为 3,采样率为 100 点/s,周期为 1 s 的余弦波与服从正态分布的随机变量叠加而成的。对其进行双谱估计得到图 2(b),其中一频率轴等于 0 时对应的双谱值随另一频率轴频率的变化即是功率谱,其结果与真实的功率谱只相差一常数。归一化的双谱重构功率谱与由 FFT 变换得到的归一化功率谱见图 2(c)。

由此认为,当噪声为高斯有色噪声时,利用基于双谱功率谱重构要比直接估计功率谱具有更好的性能。

2.3 双谱特征参数

数字化观测数据中主要存在如下几种成分:(1)观测量自身的韵律变化;(2)日月引力作用引起的观测量变化;(3)由于地震孕育引起的观测量异常变化;(4)仪器电子部件的零漂影响;(5)气象、环境、人为及仪器故障的干扰等。在数据处理分析中我们要排除的是(2)、(4)和(5)项,需识别的是(1)和(3)项。

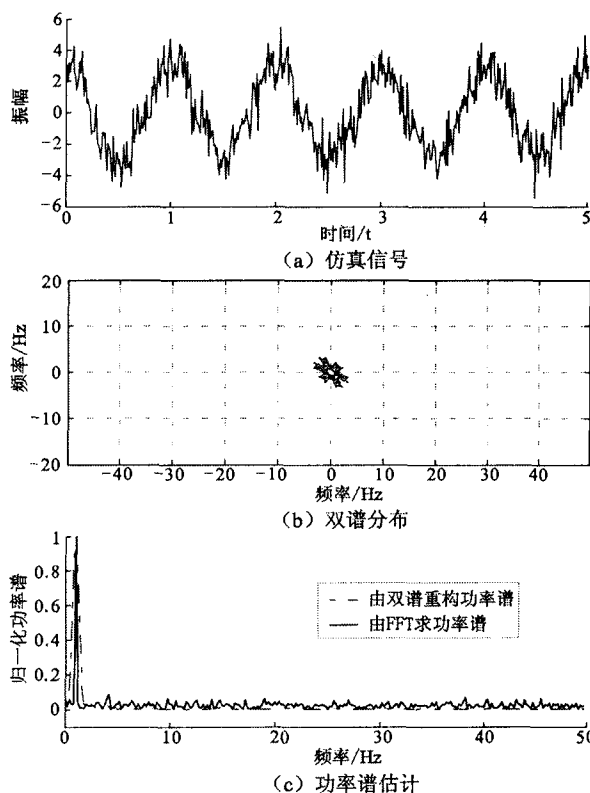


图 2 基于双谱估计重构功率谱与基于 FFT 估计功率谱的比较

Fig. 2 Comparison of power spectrum between the one of estimating reconstruction of bispectrum and one with Fourier transform method.

因此对观测量自身正常变化规律的认识是识别地震异常的前提和基础。

根据双谱的对称性^[9,13],一个实序列的双谱可以通过它在 $0 \leq f_1 \leq f_2 \leq f_1 + f_2 \leq S$ (S 为序列的采样率) 区域上的值唯一的确定。在双频率空间中,沿着一条斜率为 ρ (以下称双谱积分斜率因子) 的过原点直线对信号的双谱进行积分,得特征参数 $P(\rho)$ 和 $\varphi(\rho)$,即

$$\int_{0+}^{1/(1+\rho)} B_{3x}(f_1, f_2) df_1 = P(\rho) e^{j\varphi(\rho)} \quad 0 < \rho \leq 1 \quad (14)$$

经过仿真信号实验,发现通过沿一切片积分双

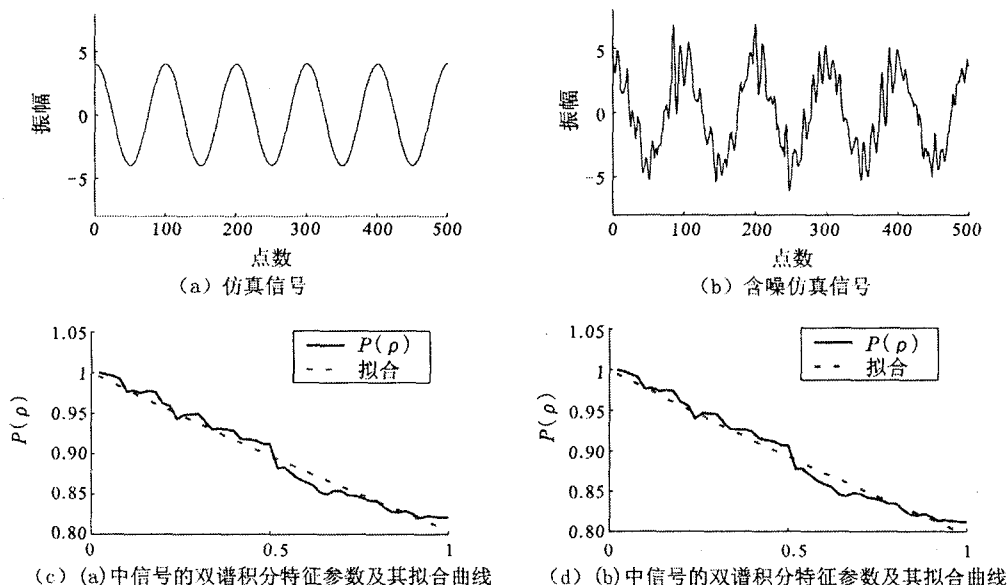


图3 仿真信号及其受噪声干扰信号的双谱积分特征参数及其拟合曲线比较

Fig. 3 Comparison of bispectrum integral parameters and fitting curves between the emulating signal and the emulating signal plused noise.

为了从图 3(c) 和图 3(d) 中提取出观测系统的固有特征信息,本文用下列理论公式来拟合 $P(\rho)$ 曲线:

$$P(\rho) = \exp(-A \cdot \rho) + \text{error} \quad (15)$$

式中系数 A 称为双谱积分衰减因子, error 为拟合残差。应用高斯-牛顿非线性最小二乘方法进行数据拟合,得到系数 A 。图 3(c) 和图 3(d) 虚线是拟合曲线,对应的双谱积分衰减因子分别为 0.216 98 和 0.227 1, 95% 的置信区间分别为 $[0.211\ 9, 0.222\ 1]$ 和 $[0.222\ 3, 0.232\ 5]$ 。可见双谱积分衰减因子能够定量刻画观测系统的固有特征信息。

2.4 实例

1995 年 9 月 20 日 11 时 14 分,山东省苍山县发生 $M_s 5.2$ 地震,是山东境内自 1983 年 11 月 7 日

谱所得到的 $P(\rho)$ 函数一方面对高斯噪声不敏感,另一方面具有时移不变性,信号放大不变性。这些不变性对于减少诸因素对特征稳定性的影响,保证可靠地从信号中提取固有的信息是十分有益的。图 3(a) 为一稳态的正弦波时间序列;图 3(b) 在图 3(a) 信号基础上加入了高斯噪声的 AR(2) 时间序列, AR 模型参数为 $[1, -1.5, 0.8]$; 图 3(c) 和图 3(d) (实线部分) 分别是经过式 (14) 计算得到的 $P(\rho)$ 时间序列,其中双谱积分斜率因子间隔为 0.02。可以看出,尽管图 3(b) 信号受到了噪声的严重干扰,但图 3(c) 和图 3(d) 中两条 $P(\rho)$ 曲线是非常相似的。

菏泽 5.9 级地震后所发生的最大地震。苍山地震震中距枣庄市约 40 km,全市震感强烈。地震前山东十里泉电厂地震水化观测站记录到明显的汞含量异常,在时间上主要表现在 1995 年 7 月 8 日至 8 月 19 日前后长达 40 天的高值异常,震前最后一次突跳发生在 9 月 7 日,距发震时间为 13 天,均属中短期异常,临震异常不明显^[23]。图 4 给出了该观测站记录的汞含量变化曲线(图 4(a))及应用本文方法分析的双谱积分衰减因子变化曲线(图 4(b))。由图 4(b) 可见,双谱积分衰减因子在震前 1995 年 6 月至 9 月出现了明显的高值异常,1995 年 6 月之前和苍山地震之后变化非常稳定。因此对于正常背景下的观测台项记录,基于双谱的特征参数分布具有较好的一致性,对中强震孕育过程中的观测台项记录其

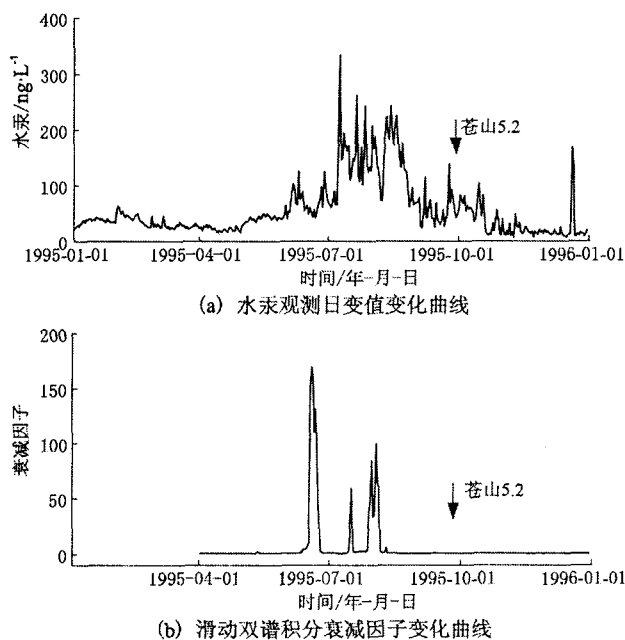


图4 山东十里泉电厂水汞观测日变值变化曲线
Fig. 4 Water Hg day change curve and slipped bispectrum attenuation factor change curve from Shiliquan electricity factor in Shangdong province.

分布具有明显的离散性,因而具有良好的异常识别能力。

3 讨论与结论

(1)着重发展由线性到非线性、由稳态到非稳态、由高斯到非高斯的信号处理的方法是客观认识前兆数字化观测正常动态背景场和正确识别异常变化的有效技术途径。在时域分析中应用高阶累积量或高阶矩分析方法来研究信号的非线性和非高斯特征;在频域分析中应用高阶谱分析、Cohen类高阶谱分析方法^[24]来研究信号的非线性、非高斯、非稳态特征;在时频两域分析中应用小波变换、Cohen类时频分析来研究信号的非稳态变化特征将是未来信号处理发展的方向。

(2)对含高斯噪声的仿真信号研究结果表明,双谱具有屏蔽高斯噪声的优点,与相关方法相比能准确估计具有延迟相关信号间的时间延迟;基于双谱功率谱重构要比直接估计功率谱具有更好的精度和性能;初步研究结果表明,对于正常背景下的观测台项记录基于双谱的特征参数分布具有较好的一致性,在异常背景下的双谱特征参数分布表现出明显的离散性,反映出双谱能够揭示出信号过程的概率分布在均值附近的非对称特征,显现出双谱估计对异常的良好识别能力。

(3)限于篇幅,本文仅着重介绍了方法原理、算法实现的技术过程,系统的震例研究另文进行讨论。

[参考文献]

- [1] Pan R, Nikias L C. Phase reconstruction in the trispectrum domain[J]. IEEE Trans. ASSP, 1987, 35: 895-897.
- [2] Mendel M. Tutorial on higher-order Statistics (spectra) in Signal Processing and System Theory: Theory Results and Some Applications[J]. Proc. IEEE, 1991, 79: 278-305.
- [3] Hatzinakos D, Nikias L C. Blind equalization using a trispectrum based algorithm[J]. IEEE Trans. Comm., 1992, 39: 669-682.
- [4] Lazear G D. Mixed-phase wavelet estimation using fourth-order cumulants[J]. Geophysics, 1993, 58: 1042-1051.
- [5] Velis D R, Ulrych T J. Simulated annealing wavelet estimation via fourth-order cumulate matching[J]. Geophysics, 1996, 61: 1939-1948.
- [6] Parker J B, Ware H A, Wipf D P, et al. Fault diagnostics using statistical change detection in the bispectral domain[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(4): 561-570.
- [7] Dusan K, Radoslav S. Order bispectrum: a new tool for reciprocated machine condition monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(6): 871-890.
- [8] 贾继德, 刘志刚, 张平, 等. 基于阶比双谱分析的发动机故障特征提取[J]. 内燃机学报, 2004, 22(5): 462-469.
- [9] 陆根源, 陈孝桢. 信号检测与参数估计[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-78.
- [10] 吴益明, 卢京潮, 连玮, 等. 基于双谱相位算法的无人机图像定位研究[J]. 飞行器测控学报, 2006, 25(3): 20-24.
- [11] 王凯, 张永详, 李军. 齿轮裂纹故障的双谱分析[J]. 机械强度, 2006, 28(3): 346-348.
- [12] Gannakis G, Cumulants B. A helpful tool in signal processing[J]. Proc. IEEE, 1987, 75: 1333-1334.
- [13] Nikias L C, Raghuveer M R. Bispectrum estimation: A digital signal processing framework[J]. Proc. IEEE, 1987, 75(7): 869-891.
- [14] 尹成, 伍志明, 邓怀群. 高阶统计量方法在地震勘探中的应用[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 546-550.
- [15] 王书明, 王家映. 高阶统计量在大地电磁测深数据处理中的应用研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 928-934.
- [16] 熊晓军, 尹成, 张白林, 等. 高阶统计量油气检测方法研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 920-927.
- [17] 杨新峰, 杨迎春, 苑秉成. 强噪声背景下微弱信号检测方法研究[J]. 船舶电子工程, 2005, 25(6): 123-125.
- [18] Giannakis G B, Mendel J M. Cumulate-based Order determination of non-Gaussian ARMA Model[J]. IEEE Trans A coast Speech Signal Processing, 1990, 38: 1411-1423.

(下转 212 页)

构的位移变形能力,而且使不同破坏极限状态之间形成了“梯度”,对防止强烈地震作用下结构的突然倒塌提供了预示。

(2) 建立在增量非线性动力时程分析基础上的结构易损性分析方法是有效评估 RC 框架结构强柱系数抗震可靠性能的方法,为量化强柱系数与结构损伤破坏之间的概率关系提供了参考。本文关于强柱系数的抗震性能评估结论可为结构抗震设计提供有益的参考。

【参考文献】

- [1] Tetsuro Ono, Zhao Y G, Ito Takuya. Probabilistic evaluation of column overdesign factors for frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(5):605-611.
- [2] Dooley K L, Joseph M Bracci. Seismic Evaluation of column-to-beam strength ratios in reinforced concrete frames[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(6):843-851.
- [3] 袁贤讯, 易伟建. 钢筋混凝土框架“强柱弱梁”及轴压比限值的概率分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(3):64-68.
- [4] 杨红, 韦锋, 白绍良, 等. 柱增强系数取值对钢筋混凝土抗震框架塑性铰机构的控制效果[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 155-161.
- [5] 马宏旺, 陈晓宝. 钢筋混凝土框架结构强柱弱梁设计的概率分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5):723-726.
- [6] Wen Y K, Ellingwood B R, Bracci J. Vulnerability function framework for consequence-based engineering[R]. Mid-America Earthquake Center(MAE), Project DS-4 Report, 2004: 23-27, 49-77.
- [7] 蔡健, 周靖, 方小丹. 钢筋混凝土框架中震可修标准及简化抗震设计方法[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(2):13-19.
- [8] 李应斌, 刘伯权, 史庆轩. 结构的性能水准与评价指标[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2):132-137.
- [9] SEAOC, Version 2000. Performance based seismic engineering of buildings: conceptual framework [Z]. Sacramento: Structural Engineers Association of California, 1995
- [10] IDARC2D, Version 6.0. A program for the inelastic damage analysis of buildings-users guide[CP]. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 2004.
- [11] Park R, Priestley M N J, Gill W D. Ductility of square-confined concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1982, 108(4):929-950.
- [12] HAZUS99. user's manual [M]. Washington D. C. : Federal Emergency Management Agency, 1999.
- [19] 余厚全. 利用双谱谱提取固井模式特征信息[J]. 测井技术, 2001, 24(6):410-414.
- [20] 蒋忠进, 林君, 陈祖斌. 双谱在可控震源地震信号预处理中对时延估计的应用[J]. 探测与控制学报, 2003, 25(2):58-61.
- [21] 蒋忠进, 林君, 陈祖斌. 三阶累积量在可控震源地震时间剖面中压制旁瓣的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(1):151-154.
- [22] 张浩, 赵正予, 谢树果, 等. 地磁脉动信号的双谱分析[J]. 武汉大学学报(理学版), 2001, 47(3):351-354.
- [23] 马志峰, 李金波. 山东苍山 5.2 级地震前十里泉电厂水汞异常特征[J]. 山西地震, 1999, (1):44-45.
- [24] Choi H I, Williams W J. Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels[J]. IEEE Trans on Acoust. Speech Signal Processing, 1989, 37: 862-871.

(上接 206 页)