

# 目标触底瞬态地震波信号的检测

余靖, 赵治平

(中国船舶重工集团公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

**摘要** 目标触底过程中通常会产生强烈的瞬态地震波信号, 通过对此类地震波信号的监测、处理和分析, 能够帮助判断该信号的产生是否是由异常活动产生的, 并且能够根据信号分析相关信息, 实现早期预警, 从而做出快速响应。由于双谱检测具有很好的抗高斯干扰能力, 对高斯平稳随机过程和试验模拟目标触底瞬态地震波信号的双谱特性进行了分析, 并在高斯背景中对试验采集的瞬态信号进行了检测仿真, 仿真试验结果表明: 在高斯背景的干扰下, 双谱检测能够有效实现对瞬态信号的检测<sup>[1]</sup>。

**关键词** 触底信号; 瞬态信号; 信号检测; 双谱检测

**中图分类号** TJ430 **文献标识码** A

## Detection of Instantaneous Seismic Wave Signals of Target Hitting Bottom

YU Jing, ZHAO Zhiping

(No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

**Abstract** In the process of the target hitting the bottom, strong instantaneous signals are generated. Monitoring, processing and analyzing these signals can help to determine whether the signal is from abnormal activities or not, and analyzes relevant information according to signal to realize early warning and quick response. Since bispectrum detection has a good capability in depressing Gaussian interference, stationary Gaussian random processes and bispectrum characteristics of simulating instantaneous seismic wave signals produced by bottoming experiments are analyzed in this paper. Instantaneous signals acquired by test are detected and simulated in the Gaussian background, and results show that bispectrum detection can effectively detect the instantaneous signals under background with Gaussian interference<sup>[1]</sup>.

**Key words** bottoming signal; instantaneous signal; signal detection; bispectrum detection

## 0 引言

目标触底是一个较为复杂的过程, 目标触底时, 与地面发生冲击, 目标的动能转换为目标的弹性势能和海床底土的弹性势能, 且发生回弹, 通过多次冲击, 目标的动能转换为海床底土的弹性势能和小部分的摩擦热能, 绝大部分的能量以地震波的形式向远处传播, 地震波的幅度和频率与目标的密度、尺度、目标的弹性系数以及海床地质等因素有关。通过研究目标触底地震波信号的传播特性, 对

地震波信号进行监测、处理和分析, 能够帮助判断异常信号的产生是否是由敏感活动引起的, 并判断出敏感活动的位置, 从而提升监测效率<sup>[2]</sup>。

基于高阶累积量的信号分析可便于研究和分析信号更进一步的统计特性。利用高阶统计量可以在信号检测、参数估计、信号重构问题中抑制未知谱特征的高斯噪声, 而且高阶谱可以用来检测时间序列的非线性结构, 是辨识一个系统的非线性特征的有力工具。本文采用的双谱检测方法就是一种利用高阶累积量进行检测的方法, 其理论基础在

于:平稳高斯噪声的 3 阶以上的高阶谱能量为 0,而非高斯信号其高阶谱不为 0。据此可以完成在高斯背景噪声环境中检测低信噪比非高斯信号的工作<sup>[3]</sup>。

### 1 双谱检测理论

#### 1.1 双谱的定义

$k$  阶谱定义为随机过程  $\{x(t)\}$  的  $k$  阶累积量的  $k - 1$  维离散时间傅立叶变换,即:

$$S_{kx}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{k-1}) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{+\infty} c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) \exp[-j \sum_{i=1}^{k-1} \omega_i \tau_i] \quad (1)$$

高阶谱又被称为多谱或累积量谱。特别地,我们称三阶谱  $S_{3\omega}(\omega_1, \omega_2)$  叫做双谱,习惯上记为  $B_x(\omega_1, \omega_2)$ ;称四阶谱  $S_{4\omega}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  为三谱,习惯上记为  $T_x(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ 。在高阶谱分析中双谱分析应用最为广泛。根据高阶累积量的性质,我们可得:当加性噪声是高斯有色噪声时,高阶累积量在理论上可完全抑制噪声的影响<sup>[4-5]</sup>。

#### 1.2 基于双谱的有色高斯噪声信号检测

假定有如下二元随机信号检测问题:

$$H_0: x(t) = n(t) \quad (2)$$

$$H_1: x(t) = s(t) + n(t) \quad (3)$$

式中:  $t = 1, 2, \dots, N, s(t)$  为实际信号,且为非高斯的平稳信号;  $n(t)$  为高斯噪声,且信号  $s(t)$  与噪声  $n(t)$  是相互独立的。

若采用传统的功率谱估计方法,则有:

$$H_0: P_x(\omega) = P_n(\omega) \quad (4)$$

$$H_1: P_x(\omega) = P_s(\omega) + P_n(\omega) \quad (5)$$

则可得,当信噪比下降时,信号的检测能力将明显下降,虚警概率将明显增大。

若采用双谱估计方法,则有:

$$H_0: B_x(\omega_1, \omega_2) = 0 \quad (6)$$

$$H_1: B_x(\omega_1, \omega_2) = B_s(\omega_1, \omega_2) \quad (7)$$

从上式可以看出,只要信号的双谱信息足够丰富,即使在信噪比很小的情况下,随机信号经过双谱处理后,其信噪比也将大大提高,因此有利于信号的检测<sup>[6]</sup>。

### 2 双谱估计信号检测

已知非高斯信号在某些频率对  $(\omega_m, \omega_n)$  上的双谱不为 0,因此,当  $B_x(\omega_m, \omega_n) \equiv 0$  时判决为  $H_0$ ,即无信号;当  $B_x(\omega_m, \omega_n) \neq 0$  时判决为  $H_1$ ,即检测到有信号,于是上述检测须排除  $H_0$  的判决。在纽曼 - 皮尔森准则下,与判决相关的门限常数由虚警概率决定,检测性能由判据选择决定。相应的试验统计量与阈值和设定的虚警概率  $\alpha$  的关系,可在 Hinich-Wilson 检测准则<sup>[7]</sup> 及其相关前提条件来判断。

设判决门限常数为  $T_0^2$ ,在 Hinich-Wilson 准则下的判决因子为  $T_c^2$ ,则排除  $H_0$  假设时有  $T_c^2 > T_0^2$ ,在判决  $H_1$  假设时,判决因子  $T_c^2$  服从一定参数下的非中心 Fisher 分布,从而可得:

$$T_c^2 = 2 \sum_{(\omega_m, \omega_n)} |B_x(\omega_m, \omega_n)|^2 \quad (8)$$

其中  $(\omega_m, \omega_n)$  位于主域内,故:

$$T_c^2 \sim \chi_{2p}^2[\lambda] \quad (9)$$

其中,

$$\lambda = \sum_{(\omega_m, \omega_n)} \lambda(\omega_m, \omega_n) \quad (10)$$

门限由虚警概率决定

$$\alpha = \text{Prob}\{T_c^2 > T_0^2 | H_0\} \quad (11)$$

从而:

$$\alpha = \text{Prob}\{\chi_{2p}^2[0] > T_0^2 | H_0\} \quad (12)$$

相应的令:

$$\alpha_0 = \text{Prob}\{\chi_{2p}^2[0] > T_0^2 | H_1\} \\ 1 - \text{erf}\left(\frac{T_0^2 - 2p - \lambda}{2\sqrt{p + \lambda}}\right) \quad (13)$$

$P$  为频率对点上的双谱平均估计值,当  $P$  较大且门限值固定不变时,检测概率为下面的递增函数:

$$\beta = \frac{2p + \lambda}{2\sqrt{p + \lambda}} \quad (14)$$

### 3 双谱估计信号特征

#### 3.1 高斯带限噪声双谱估计

利用 MATLAB 产生白噪声序列,将产生的噪声通过低通滤波器得到带限高斯噪声如图 1,对带

限高斯信号进行直接双谱估计,得到其双谱平面图 2 和三维图 3。

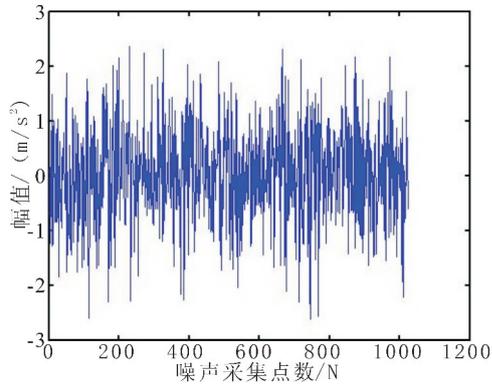


图 1 带限高斯噪声波形图

Fig. 1 Band-limited Gaussian noise waveform

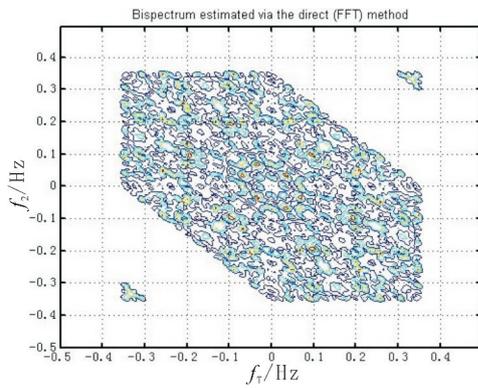


图 2 噪声双谱估计平面图

Fig. 2 Noise bispectral estimation plan

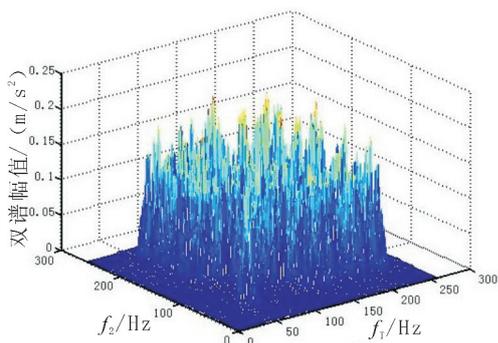


图 3 噪声双谱估计三维图

Fig. 3 Noise bispectral estimation 3D diagram

### 3.2 目标下落高度为 0.67 m 时瞬态信号双谱估计

以试验采集到的模拟目标触底信号为数据样本,将以上数据样本简记为  $t_{067}$ ,截取其 9.15 ~

9.4 s 的数据样本进行双谱估计;图 3-4 为采集到的信号波形,得到其双谱平面图 3-5 和三维图 3-6。

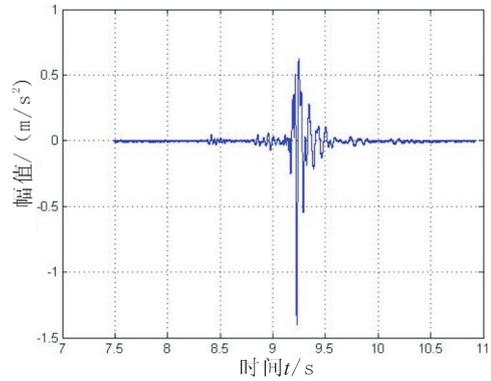


图 4 瞬态信号波形图

Fig. 4 Instantaneous signal waveform

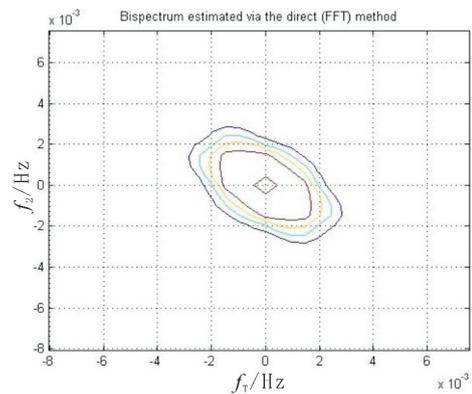


图 5 瞬态信号双谱估计平面图

Fig. 5 Instantaneous signal bispectral estimation plan

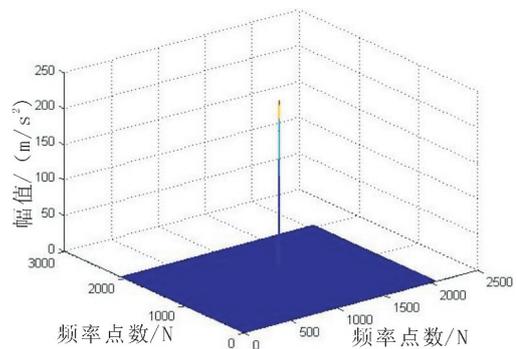


图 6 瞬态信号双谱估计三维图

Fig. 6 Instantaneous signal bispectral estimation 3D diagram

目标触底产生的瞬态信号混合高斯带限噪声的波形如图 7 所示,其双谱估计平面图和三维图分别如图 8-9 所示。

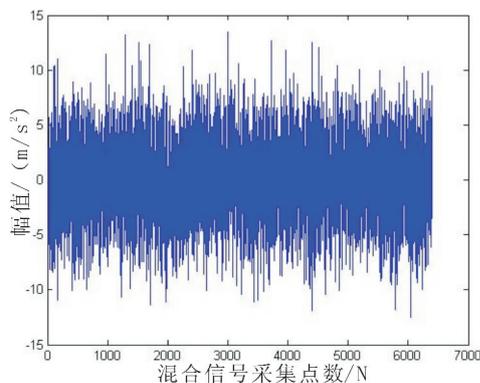


图 7 混合信号波形图  
Fig. 7 Mixed signal waveform

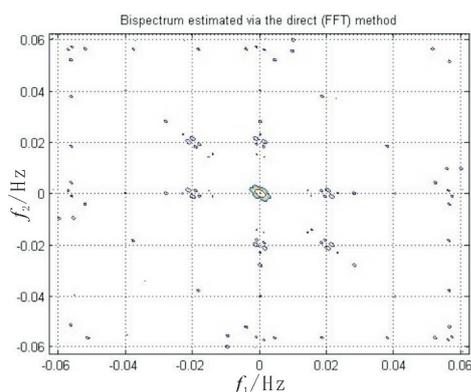


图 8 混合信号双谱平面图  
Fig. 8 Mixed signal bispectral plan

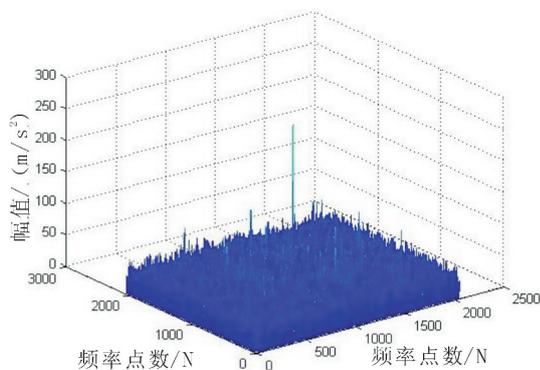


图 9 混合信号双谱三维图  
Fig. 9 Mixed signal bispectral 3D diagram

同时,对目标下落高度为 1.50 m 时的波形(对此段数据记为  $t_{150}$ )也进行了上述分析,所得的双谱分析图与上述图类似。从信号双谱估计结果可以看出,瞬态脉冲噪声与连续平稳带限高斯噪声相比,在双谱估计值上具有明显的特征区别:首先,带限高斯噪声的双谱估计值并不完全等于理论值 0,而是具有相对均匀分布的双谱量,与理论分析有差别,但是其双谱值在量级上比较小。而在信噪比够大的情况下,瞬态信号的双谱估计值在双谱域坐标零点附近具有峰值,而在其他地方的双谱值非常小,即输出具有非常高的信噪比。这一特征与带限高斯噪声信号的特征差别非常明显,可以作为信号检测的一个判别标志,从而利用双谱估计从高斯噪声中检测出瞬态脉冲信号的存在<sup>[8]</sup>。

### 4 双谱估计检测仿真

基于高斯噪声和瞬态脉冲信号的特征差别,完全可以利用信号序列的双谱估计来实现高斯噪声背景中检测非高斯非平稳性瞬态脉冲信号的目的。高斯噪声理论上双谱为 0,瞬态信号的双谱为非零。从估计结果来看,带限高斯噪声的实际双谱估计并不是完全等于 0,从而导致信号检测性能受瞬态信号信噪比的影响。与瞬态信号双谱估计结果相比较,在频率接近坐标原点的位置上,目标触底瞬态地震波信号双谱估计值具有非常明显的谱线,可以很好地利用这一特点对目标触底瞬态地震波信号进行有效的检测。

#### 4.1 $t_{067}$ 瞬态信号双谱估计检测仿真

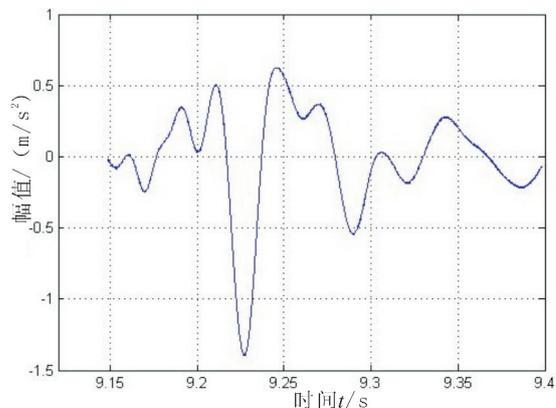


图 10 截取数据段波形图  
Fig. 10 Data section waveform

将输入信噪比设为 0,噪声背景以上文所述带限高斯噪声为背景噪声,设置的噪声幅值为 8.5 倍的信号幅值,以达到对信号数据的完全覆盖,对数据  $t_{067}$  进行双谱检测,其全时段波形如图 4。从触底产生的一系列信号中提取有用数据段,如图 10。目标触底瞬态地震波信号双谱结果假定条件: $\omega_1 = \omega_2 > 0$ ,则得到如图 11 所示结果。

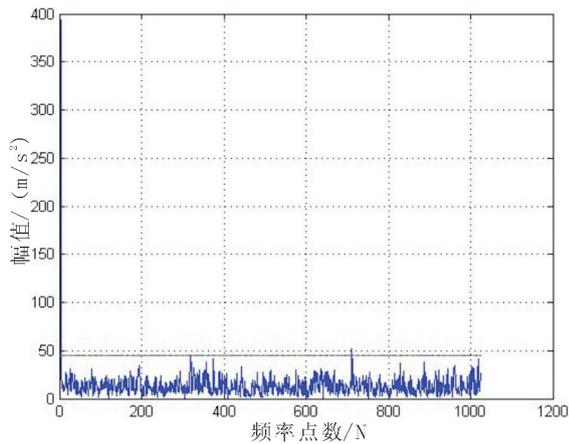


图 11  $\omega_1 = \omega_2$  时截取数据段双谱值

Fig. 11 Data section's bispectral values ( $\omega_1 = \omega_2$ )

#### 4.2 瞬态信号双谱估计检测仿真

将输入信噪比设为 0,噪声背景以上文所述带限高斯噪声为背景噪声,设置的噪声幅值为 9.4 倍的信号幅值,以达到对信号数据的完全覆盖,对数据  $t_{150}$  进行双谱检测,其全时段波形如图 12。

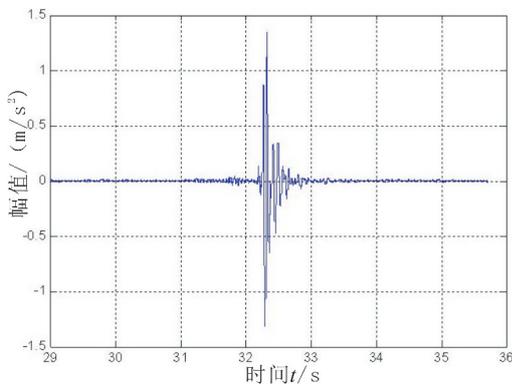


图 12 瞬态信号波形图

Fig. 12 Instantaneous signal waveform

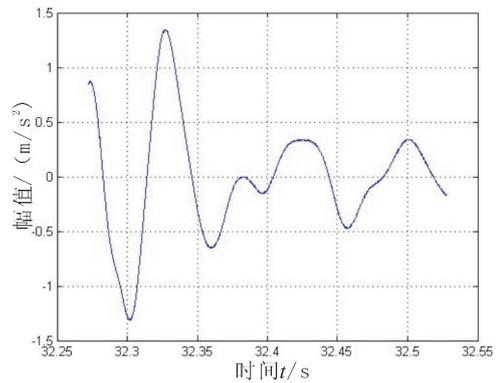


图 13 截取数据段波形图

Fig. 13 Data section waveform

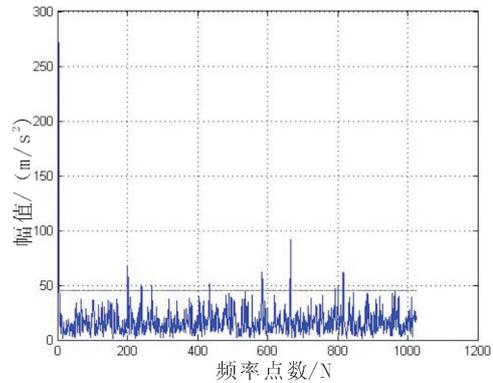


图 14  $\omega_1 = \omega_2$  时截取数据段双谱值

Fig. 14 Data section's bispectral values ( $\omega_1 = \omega_2$ )

从触底产生的一系列信号中提取有用数据段,如图 13。目标触底瞬态地震波信号双谱结果假定条件: $\omega_1 = \omega_2 > 0$ ,则得到如图 14 所示结果。

经过对 2 组数据的分析,可得频率靠近零点附近,双谱值出现峰值,设定判决区域为试验全频率采样范围,来进行目标触底瞬态地震波信号脉冲信号的检测。

进一步地以不同的信噪比对两组数据进行仿真试验,每种不同的信噪比进行仿真试验不低于 50 次。

通过具体数据分析,在虚警概率小于 3% 的条件下,双谱估计值必须满足

$$|B_0| > 45$$

即双谱估计达到上式可判定为有信号。

据此可以判定出在数据时间段内存在模拟目

标触底瞬态地震波信号。

## 5 结束语

通过仿真试验与结果分析,我们得出了与理论分析较一致的结论:双谱检测作为一种检测瞬态信号的手段,具有很好的抗高斯噪声干扰的能力,在不同的信噪比下,能够有效地检测出高斯背景下瞬态信号的存在。后续的学习与探索中可以尝试将双谱检测与其他的检测方法进一步地相结合,以达到更有效的检测瞬态信号的目的。

## 参考文献

- [1] 卢中新. 基于矢量水听器的水下瞬态信号检测及特征提取[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [2] 刘新爱. 基于地震波传感器阵列的弹丸落点定位技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.
- [3] 孙斐. 基于两相电流互高阶累积量的电机故障特征检测方法研究[D]. 大连:大连海事大学,2011:17-32.
- [4] 张晓云. 高阶统计量在水雷目标特征提取中的应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
- [5] 周安. 时频分析在地震资料处理中的应用[D]. 长沙:中南大学,2010:25-31.
- [6] 李玉韩. 高阶谱估计在中医脉象信号分析中的应用[D]. 重庆:重庆大学,2005:12-47.
- [7] 徐继勇. 高阶谱估计在脉象信号分析中的应用[D]. 重庆:重庆大学,2007:38-43.
- [8] 蒋国军. 高斯背景干扰下瞬态信号检测[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005:30-38.
- [2] XIU Z H, REN G. Stability analysis and systematic design of T-S fuzzy control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30 (5): 731-741.
- [3] 陈隆昌. 控制电机[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2003.
- [4] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [5] HIGASHIYAMA T. Auto-tuning of motor drive system by simple adaptive control approach[C]// Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications Anchorage. US: IEEE, 2000.
- [6] 杨益兴,崔大连,周爱军. 模糊自适应 PID 控制器及 Simulink 仿真实现[J]. 舰船电子工程, 2010, 30 (4):127-130.
- [7] 徐敬成,凌云,侯文浩,等. 一种带微分负反馈的无刷直流电机模糊优化 PI 控制方法[J]. 新型工业化, 2018,8(6):1-6.
- [8] 张丹,张政权,王邦继,等. 永磁同步电机控制系统建模及微分负反馈优化[J]. 微电机,2017(10):45-48.

(上接第 61 页)