

文章编号: 1000-5013(2011)03-0253-05

采用 AR 模型双谱估计的概率筛筛分效率

汤琴, 黄宜坚

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 建立概率筛振动信号的自回归模型, 进行双谱估计. 从双谱及其对角切片中获得谱特征和筛分效率之间的关系, 并找出最佳筛分效率的谱特征. 实验和研究结果表明: 不同的筛分效率有着不同的谱特征, 筛分效率的高低与谱高峰出现的频率范围, 高峰两侧陡度的对称性和零处的耦合性有很大关系.

关键词: 概率筛; 自回归模型; 双谱; 对角切片; 筛分效率

中图分类号: TD 452

文献标志码: A

概率筛是基于概率筛分理论研制而成的, 其应用虽然广泛, 但目前的研究主要停留在对工程实际的描述或总结, 以及采用独立因子法分析影响概率筛筛分效率的因素. 筛分效率是评价该系统动力学品质的一项综合指标, 受多种因素影响, 非线性作用特征明显. 高阶谱具有从非高斯信号、非最小相位及非线性系统中获得功率谱所不能获得的信息的优点, 在现代信号处理领域得到广泛应用. 目前的高阶谱研究主要限于双谱的应用研究^[1-2]. 本文利用基于自回归(AR)模型估计的双谱及其对角切片, 找出谱特征与筛分效率之间的相关性.

1 高阶累积量及 AR 模型

三阶累积量 $C_{3,x}$ 及其双谱 $E_{xxx}(f_1, f_2)$ ^[3-4] 分别定义为

$$\begin{aligned} C_{xxx}(\tau_1, \tau_2) &= E\{x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2)\}, \\ E_{xxx}(f_1, f_2) &= X(f_1)X(f_2)X^*(f_1+f_2). \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中: $E[\cdot]$ 是期望算子; τ 为滞后时间; $*$ 为共轭复数; $X(f)$ 由 x_t 进行 Fourier 变换得到.

由振动概率筛实验获得的时序 $\{x_t\}$, 可建立 AR(n) 模型^[5-6], 即

$$x_t - \varphi_1 x_{t-1} - \varphi_2 x_{t-2} - \cdots - \varphi_n x_{t-n} = a_t. \quad (2)$$

式(2)中: $a(t)$ 是独立同分布的. 引入后移算子 B , 则式(2)可表示为

$$(1 - \sum_{i=1}^n \varphi_i B^i) x_t = a_t. \quad (3)$$

从信息论的角度理解, 系统的所有动力学信息都蕴藏在参数 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 中. 因此, 基于 AR 模型参数的双谱估计所获得的双谱及对角切片, 可以反映系统的动力学品质.

2 双谱

双谱是三阶累积量 $C_{3,x}$ 的二次 Fourier 的变换, 可看成是三阶矩在频域内的分解, 对分析非对称的非线性系统很有意义. 由于高斯分布的高阶累积量恒为零, 即 $C_{k,U} = 0 (k > 3)$, 则其双谱也为零^[7-8]. 如果信号的概率密度函数是对称的, 即峰度等于零, 则其双谱也为零^[9]. 双谱还可保留相位信息, 识别非线性特征.

收稿日期: 2010-10-05

通信作者: 黄宜坚(1945-), 男, 教授, 主要从事机械电子的研究. E-mail: yjhuang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975098)

将振动概率筛系统抽象为如图 1 所示的模型. 假设输入信号 $a(t)$ 和输出信号 $y(t)$ 均为零均值的平稳随机序列, $x(t)$ 受到加性噪声 $u(t)$ 的干扰, 系统的传递函数为 $h(t)$, 则有

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{\tau=-\infty}^{\tau=\infty} h(\tau)a(t-\tau), \\ y(t) = \sum_{\tau=-\infty}^{\tau=\infty} h(\tau)a(t-\tau) + u(t). \end{cases}$$

其中: τ 为滞后量; $u(t)$ 假设为高斯噪声. 若白噪声 $a(t)$ 是独立同分布且非高斯, 则三阶累积量 $\gamma_{a,3} = \text{cum}[a(t)a(t+\tau_1)a(t+\tau_2)] = \beta\delta(\tau_1, \tau_2)$, 又加性噪声 $u(t)$ 被完全抑制, 则输出信号 $y(t)$ 的双谱^[10]可定义为

$$B(\omega_1, \omega_2) = \gamma_{a,3} H(\omega_1) H(\omega_2) H(\omega_1, \omega_2). \tag{4}$$

式(4)中: $H(\omega)$ 为系统频响函数. 由式(3)可得到

$$H(\omega) = 1/(1 - \sum_{i=1}^n \varphi_i B^i) = 1/(1 - \sum_{i=1}^n \varphi_i \exp(-j i \omega)), \quad |\omega| \leq \pi. \tag{5}$$

当 $\omega_1 = \omega_2$ 时, 可得双谱的一维对角切片谱, 其定义^[3]为

$$BD_{3,y}(\omega) = B_{3,y}(\omega_1, \omega_2) | \omega_1 = \omega_2 = \gamma_{a,3} H(\omega)^2 H^*(2\omega). \tag{6}$$

由于双谱估计量的方差大小与功率谱的三重积分成比例, 导致信号的二阶特性凸显^[11], 高阶统计量的特性减弱, 因此, 常采用双谱的归一化减弱其二阶特性. 双谱归一化后的幅值^[12]为

$$|B(\omega_1, \omega_2)| = \frac{|S|}{\left|1 - \sum_{i=1}^n \varphi_i \exp[-j i (\omega_1, \omega_2)]\right| \prod_{k=1}^2 \left|1 - \sum_{i=1}^n \varphi_i \exp[-j i \omega_k]\right|^2}, \tag{7}$$

式(7)中: $|S| = |\gamma_{a,3}|$; S 为非高斯白噪声的峰值.

3 实验与数据分析

3.1 实验原理与测试装置

概率筛由 1 个箱形框架和 3 层筛网组成, 筛网与水平面有一定倾角, 大小自上而下递增, 如图 2 所示. 筛体作业时, 筛箱上的 2 个带偏心块的激振电机同步反向旋转产生的激振力, 使筛体高频直线振动.

考虑对概率筛筛分效率(η)影响较大的给料速度、概率筛振动圆频率、筛网倾角和振幅 4 个工艺参数. 其中: 给料速度为 $3.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$; 概率筛振动圆频率选择 700, 750, 800, 850, 960, 1 100 和 1 250 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 共 7 种参数; 筛网倾角选择 18° , 19° , 20° , 21° , 22° 和 26° 共 6 种参数; 振幅为 3, 4, 5, 6 和 7 mm 共 5 种参数. 在实验中, 采样频率设置为 1 024 Hz, 读取频率为 512 Hz. 利用 NI 软件 Labview 构建检测平台, 使用 PCI-6014 数据采集卡, 加速度传感器和位移传感器, 总共获得 69 种工况下的振动信号数据.

3.2 振动信号预处理

采用中数法对实验数据进行预处理, 滤去确定信号, 保留高频的有色噪声信号, 如图 3 所示. 图 3 中: n 为采样数据; a 为加速度.

3.3 试验分析

3.3.1 高筛分效率的对角切片谱分析 通过对实验数据分析处理, 可获得筛分效率较高的 4 种类型的对角切片谱特征, 如表 1, 图 4, 5 所示. 表 1 中: α 为筛面倾角; A 为振幅; f 为振动频率; η 为筛分效率. 当 η 高于 83% 时, 定义为高筛分效率; 反之, 则规定为低筛分效率.

由图 4 可知, 在频率 $0 \sim \pi$ 范围内, 当一高峰出现在频率 $\pi/4$ 和 $3\pi/8$ 之间, 且在 0 处不出现尖峰时,

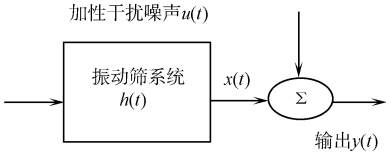


Fig. 1 Model for the vibrating probability screen

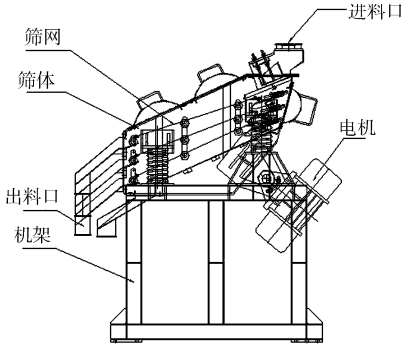


图 2 自同步概率筛结构

Fig. 2 Structure of self-synchronization probability screen

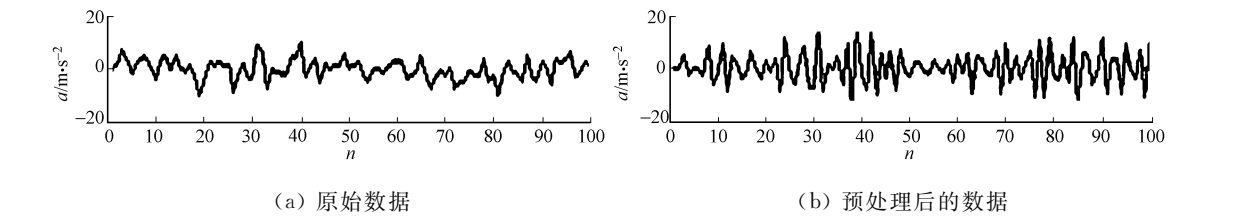


图 3 预处理前后的数据

Fig. 3 Data before and after processing

高峰两侧陡度相同的切片谱所对应的 η 一般相对较高; 若一对角切片谱与之越相似, 则其 η 越高, 反之则越来越低.

表 1 筛分效率最高的 4 种类型的对角切片谱特征

Tab. 1 Characteristics of the diagonal slices with highest screening efficiency for four kinds of spectrum

编号	$\alpha/(^{\circ})$	A/mm	f/Hz	$\eta/\%$	频率区域	对角切片谱特征
1	20	5	700	93.8	$[\pi/4, 3\pi/8]$	有一高峰, 及高峰所占频带较窄顶端较尖, 且高频侧有一小峰
2	21	4	700	92.6	$[\pi/4, 3\pi/8]$	有一高峰, 及高峰所占频带较宽顶端为钝形, 且低频侧有一小峰
3	20	4	750	92.5	$[\pi/4, 3\pi/8]$	有一高峰, 及高峰所占频带较窄顶端较尖, 且低频侧有一极小峰
4	20	4	700	88.9	$[\pi/4, 3\pi/8]$	有一高峰, 及高峰所占频带较宽顶端为钝形, 且高频侧有一小峰

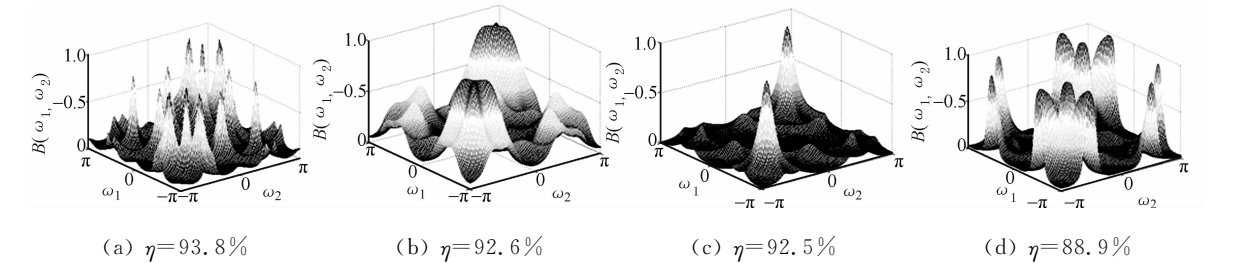


图 4 筛分效率最高的 4 种类型的归一化双谱图

Fig. 4 Normalized double-spectra bispectrum

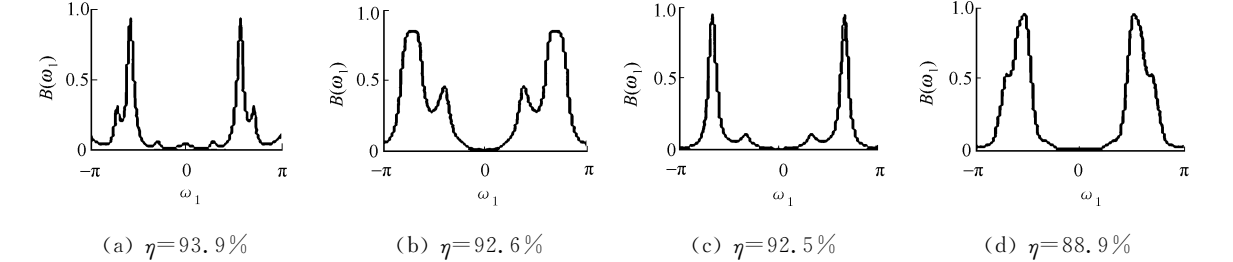


图 5 对应图 4 的对角切片

Fig. 5 Diagonal slices corresponding to the bispectrum in Fig. 4

谱特征与图 5 相似的部分对角切片, 如图 6~9 所示. 从图 6 可知, 图 6 的谱特征与图 5(a) 相似. 即在频率 $0 \sim \pi$ 范围内, 当其切片谱有一耦合高峰, 且高频出现一小峰时, η 一般相对较高, 在 84% 以上. 从图 7 可知, 图 7 的谱特征与图 5(b) 相似. 即在频率 $0 \sim \pi$ 范围内, 当其切片谱有一耦合高峰, 且低频出现一小峰时, 则其 η 一般相对较高, 在 84% 以上. 从图 8 可知, 图 8 的谱特征与图 5(c) 相似. 即在频率 $0 \sim \pi$ 范围内, 当切片谱有一耦合高峰, 且低频处有极小的波峰时, 其 η 一般相对较高, 在 85% 以上. 但它有特

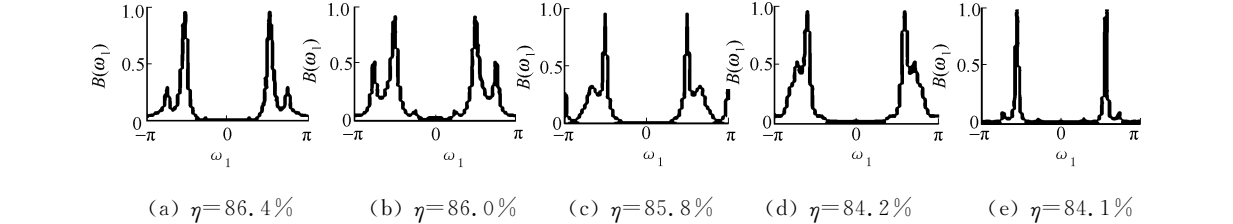


图 6 谱特征与图 5(a) 相似的部分对角切片

Fig. 6 Partial diagonal slices with characteristics similar to Fig. 5(a)

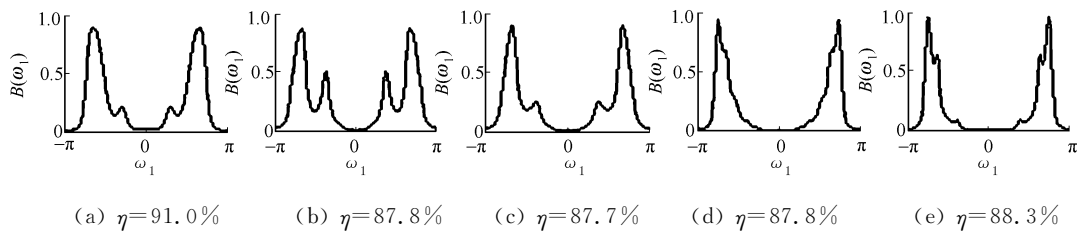


图 7 谱特征与图 5(b)相似的部分对角切片

Fig. 7 Partial diagonal slices with characteristics similar to Fig. 5(b)

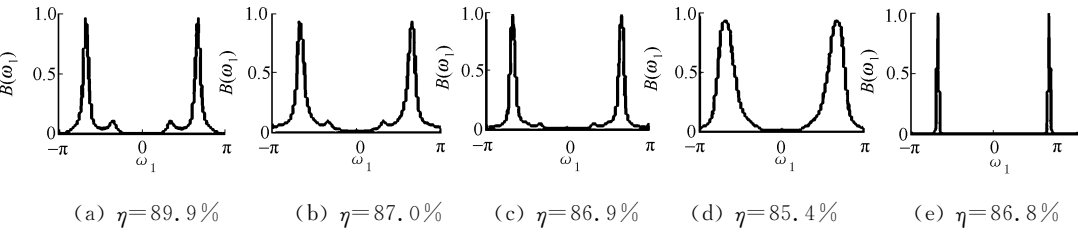


图 8 谱特征与图 5(c)相似的部分对角切片

Fig. 8 Partial diagonal slices with characteristics similar to Fig. 5(c)

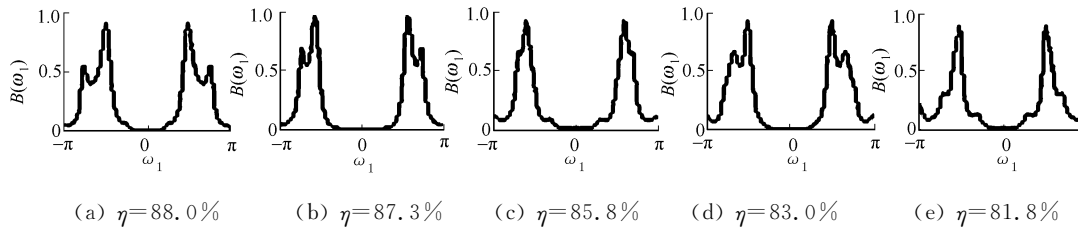


图 9 谱特征与图 5(d)相似的部分对角切片

Fig. 9 Partial diagonal slices with characteristics similar to Fig. 5(d)

例,即在低频处的极小峰退化,形成一光滑的高峰, η 在 83%~88% 之间.从图 9 可知,图 9 的谱特征与图 5(d)相似.即在频率 $0\sim\pi$ 范围内,当切片谱有一耦合高峰,且高频处有一小峰时,其 η 一般相对较高,在 83% 以上.

3.3.2 低筛分效率的对角切片谱分析 当振动频率 f 为高频时,即 f 为 1 100 Hz 或者 1 250 Hz 时,其 η 一般都很低,低于 78%, f 越高, η 越小.另外,当出现以下 4 种情况时, η 较低:(1) 若对角切片谱具有高频时的切片谱特征,则 η 一般较低,低于 80%,如中间耦合,耦合高峰顶端出现小凹口或有两不规则高峰,分别如图 10(a),(b)和(c)所示;(2) 在频率 $0\sim\pi$ 范围内,当有两高峰时,且高频峰较高,其 η 一般较低,80%左右,如图 10(d)所示;(3) 当对角切片谱在边界发生明显线性耦合时,其筛分效率一般很低;(4) 若对角切片谱的主高峰两侧陡度不等,则其筛分效率一般很低,如图 10(e)所示.

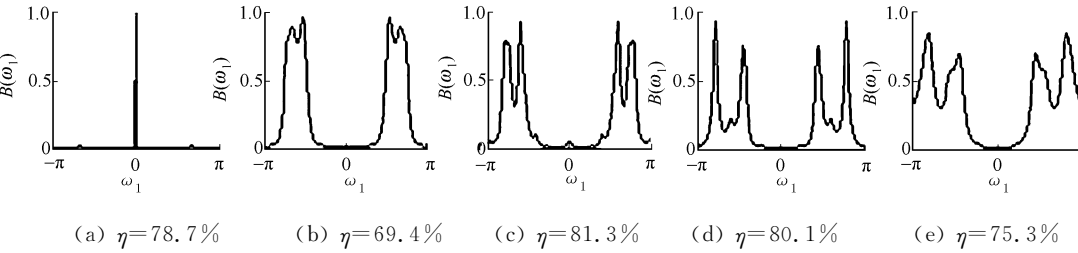


图 10 低筛分效率的对角切片

Fig. 10 Diagonal slices with low screening efficiency

4 结论

数据分析后,可以得到有以下 3 点结论.
(1) 高阶谱是处理非高斯、非线性的有力工具,可以从振动信号中提取出影响筛分效率 η 的谱特征信息.

(2) 筛分效率 η 与双谱对角切片的相关性在频率 $0 \sim \pi$ 范围内. 当一耦合高峰出现在 $\pi/4$ 和 $3\pi/8$ 之间,且在 0 处没有耦合,高峰两侧陡度相同的对角切片谱所对应的筛分效率 η 一般相对较高,数值在 84% 以上.

(3) 当供料速度为 $3.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,可获得 5 组最佳参数组合:(a) 当 $\alpha=20^\circ$, $A=5 \text{ mm}$, $f=700 \text{ Hz}$ 时,筛分效率 η 为 93.9%;(b) 当 $\alpha=21^\circ$, $A=4 \text{ mm}$, $f=700 \text{ Hz}$ 时,筛分效率 η 为 92.6%;(c) 当 $\alpha=20^\circ$, $A=4 \text{ mm}$, $f=750 \text{ Hz}$ 时,筛分效率 η 为 92.5%;(d) 当 $\alpha=20^\circ$, $A=4 \text{ mm}$, $f=800 \text{ Hz}$ 时,筛分效率 η 为 91.0%;(e) 当 $\alpha=22^\circ$, $A=4 \text{ mm}$, $f=700 \text{ Hz}$ 时,筛分效率 η 为 89.9%.

参考文献:

- [1] CHOW T W S, FEI Gou. Three phase induction machines asymmetrical faults identification using bispectrum[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1995, 10(4): 688-693.
- [2] GALLEGO A, URDOALES C, RUIZ D P. Quadratic phase coupling detection in harmonic vibrations via an order-recursive AR bispectrum estimation [J]. Nonlinear Dynamics, 1999, 19(3): 273-294.
- [3] 张贤达. 时间序列分析: 高阶统计量方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 6-13, 20-24, 52-55.
- [4] COLLIS W B, WHITE P R, HAMMOND J K. Higher-order spectra: The bispectrum and trispectrum[J]. Mechanical Systems and Signals Processing, 1998, 12(3): 375-394.
- [5] RAGHUVeer M, NIKIAS C. Bispectrum estimation: A parametric approach[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1985, 33(5): 1213-1230.
- [6] 杨叔子, 无雅, 轩建平. 时间序列分析的工程应用: 上册[M]. 2 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007: 41-46.
- [7] HANNESSCHLÄGER G, HOSA. Higher order spectra analysis[EB/OL]. [2004-11-24] http://www.emt.jku.at/education/Inhalte/se_moderne_methoden/WS0405/hannesschlaeger_hosa.pdf.
- [8] ANANTHRAM S, JERRY M M, CHRYSOSTOMOS L N. Higher-order spectral analysis toolbox[M]. 2nd ed. Natick: The Mathworks Inc, 1995.
- [9] RIVOLA A, WHITE P R. Bispectral analysis of the bilinear oscillator with application to the detection of fatigue cracks[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 216(5): 889-910.
- [10] NIKIAS C L, RAGHUVeer M R. Bispectrum estimation: A digital signal processing framework[J]. Proceedings of the IEEE, 1987, 75(7): 869-891.
- [11] KIM Y C, POWERS E J. Digital bispectral analysis and its applications to nonlinear wave interactions[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1979, 7(2): 120-131.
- [12] 蔡奇志, 黄宜坚. 自回归三谱切片研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2): 345-350.

Analysis of Probability Screen Efficiency Using Bispectrum Estimation Based on AR Model

TANG Qin, HUANG Yi-jian

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Auto-regressive model for vibration signals of probability screen was used to estimate bispectrum in this paper. From the features of the bispectrum and its diagonal slices, the relationship between the characteristics of the spectrums and screening efficiencies was found, and the spectrum characteristics of the highest screening efficiency were described. Results showed that different screening efficiencies were corresponding to different spectral features, and it also indicated that the high and low efficiency of the screen is of great relevance with the angle range of a coupling peak appearing, the symmetric properties of the gradient on two sides of the peak and the coupling at angle 0.

Keywords: probability screen; auto-regressive model; bispectrum; diagonal slice; screening efficiency

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 崔长彩)