



高阶统计量方法在地球物理学中的应用与展望

李希亮, 刘希强, 董晓娜, 许丹

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要:高阶统计量方法是研究非高斯过程, 非线性系统和非最小相位信号的有力工具。一些使用相关函数或功率谱进行分析与处理而得不到满意结果的问题都可以使用高阶统计量方法。本文介绍了高阶统计量在地球物理学中的应用现状。

关键词:高阶统计量; 信号处理; 地球物理学; 地震信号; 噪声; 展望

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2010)02-0201-05

Application and Expectation of Higher-order Statistics in Geophysics

LI Xi-liang, LIU Xi-qiang, DONG Xiao-na, XU Dan

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

Abstract: Higher-order statistics is a useful tool for studying non-Gaussian processes, nonlinear systems and non-minimum phase systems. Some problems, which cannot be solved satisfactorily using power spectrum or correlation functions, can be worthy of using higher-order statistics method. In this paper, the main theoretical results about applications of high-order statistics in geophysics are summarized.

Key words: Higher-order statistics; Signal processing; Geophysics; Seismic signals; Noises; Expectation

0 引言

20世纪60年代初,人们开始从数学上研究高阶统计量,并解决了一些工程上的特殊问题。近30年来高阶统计量迅速发展成为一种新的信号分析和处理理论。1965年Rosenblatt等人介绍了双谱估计理论^[1],Brillinger系统介绍了多谱理论^[2]。到20世纪80年代后期,高阶统计量才真正得到迅速发展与应用,出现了高阶谱应用研究的高潮。随着高阶统计理论进一步发展和完善,大量的研究成果不断涌现出来。

现代信号分析与处理的一个显著特征是对非高斯、非线性、非最小相位、非平稳以及有色噪声的研究,高阶统计量是解决这些问题的主要手段之一^[3]。目前高阶统计量的应用范围已涉及通信、声纳、雷达、语音处理、图象处理、时延估计、系统辨识、

自适应滤波、阵列处理、地震信号处理、生物医学工程、故障诊断等领域^[4-5]。研究表明,高阶统计量不但继承了相关分析与功率谱分析的优点,而且在对信号的分析中提供了更多的信息,如相位,高斯性等。

1 高阶统计量理论^[3]

高阶统计量主要包括高阶矩、高阶累积量、高阶矩谱、高阶累积量谱等四种。在实际应用中,常用的是随机过程的高阶累积量。设 $\{x(n)\}$ 为平稳随机过程, $x_1 = x(n), x_2 = x(n + \tau_1), \dots, x_k = x(n + \tau_{k-1})$,则其中 k 阶累积量和 k 阶矩为

$$c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = \text{cum}\{x(n), x(n + \tau_1), \dots, x(n + \tau_{k-1})\}$$
$$m_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = \text{mom}\{x(n), x(n + \tau_1), \dots, x(n + \tau_{k-1})\}$$

收稿日期:2009-02-04

作者简介:李希亮(1980-),男(汉族),山东泰安人,助理工程师,硕士研究生,主要从事地震前兆研究工作。

在 $k \geq 3$ 时, k 阶累积量和 k 阶矩统称为高阶统计量。

k 阶矩谱定义为 k 阶矩的 $k-1$ 维 Fourier 变换, 即

$$M_{kx}(\omega_1, \dots, \omega_{k-1}) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{\infty} m_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \dots + \omega_{k-1}\tau_{k-1})}$$

k 阶累积谱定义为 k 阶累积量的 $k-1$ 维 Fourier 变换, 即

$$S_{kx}(\omega_1, \dots, \omega_{k-1}) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{\infty} c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \dots + \omega_{k-1}\tau_{k-1})}$$

高阶统计量在理论上可以完全抑制高斯噪声的影响。如果在彼此独立的加性高斯有色噪声中观测非高斯信号, 那么观测过程的高阶累积量就只有非高斯信号的高阶累积量, 因此在非高斯信号处理中理论上高阶累积量可以抑制高斯有色噪声, 是非高斯信号处理和非高斯过程辨识的重要工具。与功率谱相比, 高阶谱可以检验随机信号的高斯性, 因为高斯信号的高阶谱为零, 否则是非高斯信号。如果观测数据是一个具有高斯噪声的非高斯信号, 则通过求其高阶谱就可以把噪声滤除, 提高信噪比, 进而对未知频谱特性的观测信号进行检验、参数估计和分类。高阶谱可以恢复信号或系统的相位特性和幅值特性, 因为可以保持信号的相位信息。而功率谱虽然描述了随机信号的功率在各个频率上的分布, 但它仅与幅值频谱有关, 没有相位信息, 所以利用已知功率谱不能完整地恢复原来的信号。

2 在地震勘探中的应用

在地震勘探中, 子波的提取始终是一个重要而又困难的问题, 主要原因是影响地震子波的因素太多太复杂。传统的提取子波的各种方法主要是利用地震道的自相关信息, 即二阶统计量。实际的地震子波一般是混合相位的, 反射系数序列也不是高斯分布的。高阶统计量方法具有分析非高斯过程的能力, 还可以提取相位信息, 抑制高斯噪声。另外在随机信号分析领域人们已经认识到, 从更高阶的概率结构上表征随机信号的高阶相关函数(累积量)和高阶谱(多谱), 高阶统计量是对相位敏感的。使用高阶统计量与多谱来识别地震子波可以弥补二阶统计信息在相位信息方面的缺陷。目前高阶统计量方法已用于地震勘探中的地震子波相位估计^[6,14]和时延估计^[15-17]。尹成等^[6,11]就高阶统计量方法在地震

勘探中的应用做了简要综述, 指出高阶谱在子波估计中将地震信号的处理从二阶推向了三阶, 甚至更高阶, 不仅摆脱了地震子波的最小相位假设, 而且恢复了其真实的子波, 提高了地震波信号的分辨率。更可喜的是在子波信号处理的过程中可以尽可能的排除噪声干扰, 使我们想要得到的有效波变的更加明显。Matsuoka 和 Urych(1984年), Pan 和 Nikias(1987年)分别发表了用三谱估计混合相位子波的实例^[12-13]。1990年 Sundaramoorthy 等^[14]采用最小二乘算法, 应用双谱进行子波幅值提取。利用高阶统计量进行时间延迟估计, 检测小断层^[16-17], 能有效提高成像的分辨率, 具有较好的抗干扰能力。高阶统计量方法作为一种新的适用于非线性信号分析和处理的工具, 可在地震勘探中发挥更大的作用。

3 在油气地球物理勘探中的应用

地震反射波的振幅类属性是地震动力学的主要特征之一, 在油气预测中占有着极其重要的地位。熊晓军等^[18]将高阶统计量引入到油气检测中, 克服了常规的振幅类属性处理方法不仅受噪声的影响较大, 而且有时还丢失了很多信息的困难。高阶统计量方法能有效地提取地震信号的异常反射, 且显示直观, 给碳氢检测提供可靠性信息。在分层均匀的介质中, 地震信号可以看作是一种零均值的接近于对称的广义高斯分布信号。但是当地下介质的性质发生突变时, 地震信号就不再满足对称的广义高斯分布, 检测出这些非对称和非高斯性的变化, 就能够识别出地下介质性质的突变区。检测这些非高斯性和非对称的地震信号, 需要应用高阶累积量方法^[19-20]。地震反射信号的统计性质偏离广义高斯分布时, 含饱和气的地层或孔洞就会在频率域表现出异常的谱分布, 因此在频率域进行检测能区分出地震信号的异常。杜宁平等^[21]采用高阶谱时频分析方法研究信号的 Wigner 双谱性质, 提取了地层含气而产生的地球物理异常。

在地质构造中, 断层与油气的形成、分布、运移、富集有着十分密切的关系, 而在地震剖面上的反映则主要为异常波的出现和反射波同相轴的变化。传统的断层检测与解释方法以相干技术为主, 但是在识别小断层和定量解释小断层方面有很大的局限性。采用 Tugnait^[22]提出的四阶累积量函数估计相邻地震道之间的时间延迟来确定反射波时差, 就可以进行小断层的定量解释和自动识别。

4 在大地电磁中的应用

如果把 MT 信号时间序列视为一个纯 MA 模型, Giannakis 和 Mendel^[23] 最早由 MT 信号的高阶统计量来确定模型参数, 得到以下方程:

$$\sum_{i=0}^q b^2(i) r_x(m-i) = (\sigma_e^2/\gamma_{3e}) \sum_{i=0}^q b(i) c_{3x}(m-i, m-i), \\ -q \leq m \leq 2q$$

简称 GM 方程。求解 GM 方程便可得到相应的模型参数, 这也是最早的自相关累计量算法(简称 RC 算法)。在此基础上 1991 年 Tugnait^[24] 推出了 RC 算法, 简称 T 算法, 使得模型参数的确定更加快捷方便。T 算法的主要缺点是只能适用于加性白噪声。

电磁信号一般具有非高斯、非线性和非最小相位性^[25-26]。最小相位系统和非最小相位系统的输出具有相同的功率谱密度, 但两者的双谱显著不同。功率谱密度不含信号的相位信息, 不能分辨非最小相位信号; 而双谱保留了信号的相位信息。利用双谱分析方法处理非最小相位信号不会丢失信号中的有用信息, 因此高阶统计量方法可以有效处理具有非高斯、非线性和非最小相位特征的电磁信号。任何高斯过程, 其高阶统计量(高阶累积量、高阶谱)均为零的性质, 通过信号的高阶谱恢复功率谱, 再由功率谱估算 MT 响应函数, 以抑制高斯有色噪声的影响, 这种方法在抑制高斯有色噪声方面优于传统功率谱方法^[27]。

5 在地震监测中的应用

5.1 地震信号分析

在处理实际的地震资料时, 我们得到的地震信号掺杂着一些可知的和不可知的噪声, 给信号处理带来极大的困难。利用 Tugnait^[28] 的时间延迟估计子函数代替互相关函数计算时间延迟量, 采用地震信号的高阶(四阶)累积量估计子函数代替互相关函数来进行时间延迟估计, 克服了传统的静校正中使用互相关方法计算时间延迟的缺点。这样做既可以抑制地震资料剩余静校正处理中的相关高斯噪声的影响, 而且还可以处理复杂近地表资料中相对较大的剩余静校正量。邢贞贞等^[29] 认为高阶谱时频分析方法与常规时频分析方法相比, 前者能够更清楚地反映实际地震道的时频特性, 其高阶谱显示具有更高的时频分辨能力。对于具有广义高斯分布的地震信号, 当记录中混有非高斯的, 或非线性的低频信号时, 能够利用时频双谱分析的方法检测出低频信号。而且高阶谱含有信号的振幅和相位信息, 因此高阶谱技术在地震处理中有较大的潜力。

Yung 和 Ikellez^[30] 用双谱相关技术拾取了初至时间, 精度比传统的互相关方法更高。

5.2 地震事件检测

实际记录到的地震信号的噪音大多具有高斯性或者似高斯性, 而高斯信号的高阶统计量为 0, 所以高阶统计量可以有效地检测出地震信号的非高斯和非线性特征。刘希强和周彦文等^[31-32] 在对地震信号做非高斯、非线性检验中应用了高阶统计量方法, 提出了一种新的地震事件自动检测方法(简称 EFGLP), 可有效抑制高斯噪声。经过实际的地震事件检测发现, 地震检测器具有有效检测地震事件和抑制高斯噪声的能力, 和传统的 STA/LTA 检测方法相比, 地震事件的错误报警率得到了进一步降低。

5.3 地震前兆观测数据分析

地震前兆信号处理方法大多数是在一、二阶统计量的基础上形成的, 虽然在一定程度上对信号的处理也非常有效, 但不能刻画信号的非线性、非高斯性和非平稳特性。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。

刘希强等^[33] 指出高阶统计量方法能去除噪声, 得到更多有用的信息。他们总结了双谱的主要特性, 主要有: (1) 对于一个平稳的高斯随机过程, 它的高于二阶的高阶累积量和高阶谱为 0, 这就决定了双谱乃至高阶谱对高斯随机过程不敏感; (2) 非高斯白噪声通过线性系统后的高阶谱含有系统的相位信息, 而功率谱不包含相位信息。因此只要计算出系统输出过程的双谱, 就能得到系统的相位信息; (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。

刘希强等^[33] 研究认为互相关分析方法处理地震前兆信号时会受到高斯噪声的严重干扰, 而基于双谱的时延估计方法能屏蔽高斯噪声, 能更好地压制噪声, 并能准确的估计信号的时间延迟。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。同时他们基于双谱理论提出了提取前兆异常信息的新方法, 即双谱积分衰减因子方法: 在正常背景下前兆仪器记录到的信号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则明显的离散性, 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。

杨涛等^[34]以陕西关中地区泾阳、乾陵、周至3个地磁台站的地磁场垂直分量(Z)日均值及3个台站地磁场垂直分量变化与泾阳 $M_s 4.8$ 地震之间的关系为基础,探讨了利用高阶统计量分析方法提取地震前兆异常信息,结果表明地震前四阶矩异常变化幅度比三阶矩明显,四阶累积量的异常变化幅度比三阶累积量明显,指出地震一般发生在高阶统计量恢复到初始水平阶段内,而且高阶统计量的异常变化幅度在一定程度上受到震中距的影响。高阶统计量方法与加卸载响应比法对比发现,在突出震前中长期地磁异常方面具有一定的优越性,提出在震磁效应统计分析研究中引入高阶统计量方法的必要性及其在地震预报中的潜力和良好前景。

6 在其它方面的应用

6.1 弱信号识别

高阶统计量提供了前所未有的丰富信息。利用高阶统计量进行信号处理可以抑制加性高斯(或非高斯)有色噪声的影响,检测和识别弱信号,以及辨识非因果、非最小相位系统或重构非最小相位信号^[35]。杨宇山等^[36]结合烃运移形成的弱磁异常的统计特征,提出了一种基于高阶统计量方法的“磁亮点”识别和提取方法,并利用该方法对巴彦浩特盆地航磁资料“磁亮点”进行了提取,获得了一些有意义的结果。

高阶统计量方法能抽取随时间而变化的非高斯性信息,能够有效地识别出在高斯强干扰下的非高斯微弱信号,在对信号处理过程中不但能反映出信号的整体与局部差异,而且使信号有更高的分辨率。高阶统计量为强噪声背景下地质孔洞识别提供了一种新方法。杨宇山等^[37]探讨了基于高阶统计量的地球物理弱信号识别方法,并将该方法用于三峡某岩溶地区雷达资料的溶洞识别解释。

地磁微脉动是地磁场的一种短周期快速起伏变化,其周期从几秒到十几分钟。根据地磁脉动信号在更多情况下表现为非高斯的随机过程,张浩等^[38]提出采用高阶统计量方法对地磁脉动信号进行分析处理,导出基于三阶累积量的双谱间接估计,并由此重构得到随机信号的功率谱和其信号本身,结合实例说明了双谱分析方法与传统的功率谱分析方法相比较具有不可比拟的优越性。更重要的是证明了高阶统计量方法也适合处理低频的地磁信号。

6.2 雷达探测中的应用

探地雷达方法是地基勘查、质量检查的重要方法之一,在浅层的工程勘探和质量检测中效果相当显著。必要的后期数据处理和解释性处理可以提取出工程勘探和质量检测中的异常,直观地进行工程地质解释和显示。探地雷达信号也是广义高斯分布的时间序列,由于其数据频率比较高、衰减较快、易受干扰等因素,对实测资料解释,特别是对一些小的异常解释比较困难。孙骏等^[39]利用 Wigner 高阶矩谱的时频特性解决了传统雷达数据信号分析方法要求信号分布是高斯的、平稳的、最小相位的问题。该方法对于探测浅层地面状况,如公路、大坝、河堤的检测具有较大的实用价值。事实证明,高阶统计量分析方法在声波和探地雷达的应用中有相当好的效果,其处理结果对工程质量检测的直观解释很有帮助。

7 结论与展望

高阶统计量方法是现代数字信号处理领域中十分活跃的一个研究方向。该方法与以前基于二阶统计量的相关分析方法相比更具有优越性,可以抑制高斯或非高斯的有色噪声;可以辨识非最小相位、非线性系统、非因果;可以提取非高斯信号的多种信号特征信息等。在实际资料中的噪声成分比较复杂,不主要服从或不再服从高斯分布时,高阶统计量方法就会受到很大的限制,需要对该方法进一步发展,利用高阶循环统计量方法压制噪声。然而没有一种单一的方法可以保证地球物理信号的可靠识别。当信号和噪声的差别较小时,高阶统计量方法往往也会出现偏差,这就需要结合另外一些更有效的信号处理技术,使之更有效。

随着提取信息的数学、物理理论方法的发展,高阶统计量作为一种新的适用于非线性信号分析和处理的工具,能够在地球物理资料处理和属性参数提取等方面发挥更大的作用,其在地震信号处理方面的应用将是未来研究的主要方向。

[参考文献]

- [1] Rosenblatt M, Van Ness J W. Estimation of the bispectrum[J]. Ann. Math. Statist., 1965, 36(1): 1120-1136.
- [2] Brillinger D R. An introduction to polyspectra[J]. Ann. Math. Statist., 1965, 36(1): 1351-1374.
- [3] 王书明,等. 地球物理学中的高阶统计量方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [4] 李宏伟,程乾生. 高阶统计量与随机信号分析[M]. 武汉: 中国

- 地质大学出版社,2002.
- [5] 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] 尹成,伍志明,邓怀群,等. 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.
- [7] Mendel J M. Optimal Seismic Deconvolution. An Estimation Based Approach[M]. New York: Academic Press,1983.
- [8] Lazear G L. Mixed-phase wavelet estimation using fourth order cumulants[J]. Geophysics,1993,7:1042-1051.
- [9] Velis D R, Ulrych T j. Simulated annealing wavelet estimation via fourth-order cumulant matching[J]. Geophysics,1996,61(6):1939-1948.
- [10] Liang G H, Cai X P, Li Q Y. Using high-order cumulants to extrapolate spatially variant seismic wavelets[J]. Geophysics,2002,67(6):1869-1876.
- [11] 尹成,唐兵,谢桂生. 地震子波估计——高阶累积量矩阵方程法[J]. 信号处理,2000,16(增刊):83-87.
- [12] Matsuoka T, Ulrych T J. Phase estimation using the bispectrum[J]. Proc. IEEE,1984,72:1403-1411.
- [13] Pan R, Nikias C L. Phase reconstruction in the trispectrum domain[J]. IEEE Trans. Acoustics Speech, Signal Processing,1987,35:895-897.
- [14] Sundaramoorthy G, Raghuvver M R, Dianat S A. Bispectral reconstruction of signals in noise; Amplitude reconstruction issues[J]. IEEE Trans. Acoustics Speech, Signal Processing,1990,38:1297-1306.
- [15] 石玉梅,刘天放,谢桂生. 一种断层解释的新方法. 双相干相关法[J]. 煤炭学报,2000,25(2):117-121.
- [16] 石玉梅,刘天放,谢桂生. 三阶累积量法在断层检测和落差估算中的应用[J]. 地质与勘探,2001,37(4):73-75.
- [17] 谢桂生,石玉梅. 双相干相关法在断层解释及落差估算中的应用[J]. 石油地球物理勘探,2000,35(6):719-722.
- [18] 熊晓军,贺振华,尹成,等. 高阶统计量在油气地球物理勘探中的新应用[J]. 地质科技情报,2005,24(2):78-84.
- [19] Nikias C L, Raghuvver M R. Bispectrum estimation; a digital signal processing framework[J]. IEEE,1987,75(5):869-891.
- [20] Mendel J M, Tutorial on higher-order statistics in signal and system theory: theoretical results and some applications, process[J]. IEEE,1991,79(3):278-305.
- [21] 杜宁平,史军,朱红涛,等. 高阶统计量分析在油气预测中的应用[J]. 海洋地质动态,2004,20(8):27-29.
- [22] Tugnait J K. Time delay estimation with unknown spatially correlated gaussian noise[J]. IEEE Trans. Acoustics apeech, Signal Processing,1993,41:549-558.
- [23] Giannakis G B, Mendel J M. Identification of nonminimum phase systems using higher-order statistics[J]. IEEE Trans. Acoustics Speech, Signal Processing,1989,37:360-377.
- [24] Tugnait J K. New results on FIR system identification using gigher order statistics[J]. IEEE Trans. Acoustics apeech, Signal Processing,1994,42(10):2854-2858.
- [25] 王书明,王家映. 大地电磁信号统计特征分析[J]. 地震学报,2004,26(6):669-674.
- [26] 王书明,王家映. 高阶统计量对大地电磁测深资料处理方法的改进[J]. 石油地球物理勘探,2004,39(增刊):1-3.
- [27] 王书明,王家映. 利用高阶谱重构功率谱抑制高斯有色噪声[J]. 科学技术与工程,2004,4(2):69-73.
- [28] Tugnait J K. Time delay estimation with unknown spatially correlated Gaussian noise[J]. IEEE Trans. Acoustics apeech, Signal Processing,1993,41:549-558.
- [29] 邢贞贞,韩立国,王宇,等. 高阶统计量方法在地震信号分析中的应用[J]. 吉林大学学报,2007,37(增刊):139-142.
- [30] Yung S K, Ikellez L T. An example of seismic time picking by third-order bicoherence[J]. Geophysics,1997,62(6):1947-1951.
- [31] 周彦文,刘希强. 地震事件自动检测新方法[J]. 西北地震学报,2008年,30(2):102-106.
- [32] 刘希强,周彦文,曲均浩,等. 应用单台垂向记录进行区域地震事件实时检测和直达P波初动自动识别[J]. 地震学报,2009,31(3):260-271.
- [33] 刘希强,周彦文,李红,等. 双谱估计在地震前兆数字化资料分析中的应用[J]. 西北地震学报,2007,29(3):201-206.
- [34] 杨涛,刘庆生,付媛媛,等. 泾阳M_s4.8地震磁效应的高阶统计量方法研究[J]. 地震,2005,25(1):97-102.
- [35] 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.
- [36] 杨字山,李媛媛,刘天佑. 高阶统计量在地震弱信号及“磁亮点”识别中的应用[J]. 石油地球物理学报,2005,40(1):103-107.
- [37] 杨字山,等. 高阶统计量弱信号识别方法在识别地质孔洞中的应用[J]. 长江科学院院报,2005,22(4):30-33.
- [38] 张浩,赵正予,谢果树,等. 地脉动信号的双谱分析[J]. 武汉大学学报(理学版),2001,47(3):351-354.
- [39] 孙骏,陈淑珍,邹炼. Wigner 高阶矩谱在分析相控阵探地雷达数据中的应用[J]. 武汉大学学报(理学版),2004,50(5):637-640.