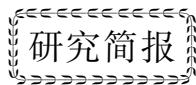


文章编号: 0253-3782(2004)06-0669-06



大地电磁信号统计特征分析^{*}

王书明 王家映

(中国武汉 730074 中国地质大学地球物理与空间信息学院)

关键词 大地电磁 双相干系数 三相干系数 零点分布 高阶统计量

中图分类号: P318.2 文献标识码: A

大地电磁测深法(MT)中,以往基于功率谱的各种处理方法,对MT信号的统计特性设定了许多前提条件,如信号应具有高斯性、线性和最小相位性等特征。如果实际信号并非如此,则处理结果存在以下几个问题:①对于非线性、非高斯信号,不能充分获取隐含在数据中的信息;②若信号不仅是非高斯的而且还是非最小相位的,所得到的处理结果反映不出原信号的非最小相位的特点(姚天任,孙洪,1999;李宏伟,程乾生,2002;Nikias, Petropulu, 1993;张贤达,1996)。因此,有必要对MT信号特征作系统深入地分析。否则,则无法判断基于传统功率谱方法处理结果的可信度,从而给MT的实际应用带来许多无法预知的后果。

本研究根据高斯信号的高阶统计量为零的特点,引入双相干系数和三相干系数基本概念,分析判断MT信号是否具有高斯性;根据线性信号的双相干系数和三相干系数对所有频率均为常数的特点,分析判断MT信号是否具有线性特征;根据信号在Z平面上的零点分布,分析判断MT信号是否具有最小相位特征。

1 MT 信号统计特征判据

1.1 高斯信号的高阶统计量特征

1) 单个随机变量。对于一个零均值的高斯随机变量 $\xi \sim N(\mu, \sigma^2)$, $|\mu| < \infty, \sigma^2 > 0$, 其特征函数(矩生成函数)由 $\Phi_\xi(\omega) = e^{-j(1/2)\omega^2\sigma^2}$ 给定。因此,其累积量生成函数为(张贤达, 1996)

$$\Psi_\xi(\omega) = -\frac{1}{2}\omega^2\sigma^2 \quad (1)$$

由累积量的定义,累积量 c_i 是 $\Psi_\xi(\omega)$ 的 Taylor 级数展开式中 ω^i 项的系数;又因 $\Psi_\xi(\omega)$ 只是自变量 ω 的二次函数,故显然有

$$c_1 = 0 = m_1 \quad (2)$$

$$c_2 = \sigma^2 = m_2 \quad (3)$$

$$c_k \equiv 0 \quad k \geq 3 \quad (4)$$

式中, m_1 和 m_2 分别为零均值高斯随机变量的二阶、三阶矩。显然,高斯随机变量的高阶(二阶以上)累积量均为零。

2) 随机过程 $\{x(n)\}$ 。令 $x_1 = x(n), x_2 = x(n+\tau_1), \dots, x_k = x(n+\tau_{k-1})$, 由随机过程高阶累积量定义式

* 国家自然科学基金项目(40274039)资助。

2003-10-13 收到初稿, 2004-06-22 收到修改稿并决定采用。

$$c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = \text{cum}\{x(n), x(n+\tau_1), \dots, x(n+\tau_{k-1})\} \quad (5)$$

注意, 由于 $\{x(n)\}$ 是 k 阶平稳的, 故其 k 阶累积量只有 $k-1$ 个独立的变元, 它们仅仅是滞后 $\tau_1, \dots, \tau_{k-1}$ 的函数, 而与时间 n 无关.

$\{x(n)\}$ 的各阶累积量为

$$c_{1x} = E\{x(n) = 0\} \quad (6)$$

$$c_{2x}(\tau) = E\{x(n)x(n+\tau)\} = r(\tau) \quad (7)$$

$$c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) \equiv 0 \quad k \geq 3 \quad (8)$$

因此, 任何高斯过程的高阶累积量均等于零(Hinich, 1982).

1.2 高斯性检验

考虑用功率谱对多谱进行规范化, 我们称规范化结果为相干系数. 随机过程 $\{x(n)\}$ 的双相干系数定义为

$$K_{2x}(\omega_1, \omega_2) = \frac{B_x(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{P_x(\omega_1)P_x(\omega_2)P_x(\omega_1 + \omega_2)}} \quad (9)$$

三相干系数定义为

$$K_{3x}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \frac{T_x(\omega_1, \omega_2, \omega_3)}{\sqrt{P_x(\omega_1)P_x(\omega_2)P_x(\omega_3)P_x(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)}} \quad (10)$$

式中, $B_x(\omega_1, \omega_2)$ 为随机过程 $\{x(n)\}$ 的双谱, $T_x(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ 表示三谱, $P_x(\omega)$ 为其功率谱.

由于高斯过程的高阶累积量恒等于零, 所以当双相干系数和三相干系数对所有 ω_i 恒等于零时, 我们就判断该过程是高斯过程; 否则, 它必是非高斯过程.

进一步, 由累积量的定义易知, 对称分布的非高斯过程的三阶累积量恒等于零, 而非对称分布的非高斯过程具有非零的三阶累积量. 因此, 当 $K_{2x}(\omega_1, \omega_2)$ 不恒为零时, 被检验的过程是非对称分布的非高斯过程; 当 $K_{2x}(\omega_1, \omega_2) \equiv 0$, 而 $K_{3x}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ 不恒为零时, 则判断该过程是对称分布的非高斯过程 (Mendel, 1991; 伯晓晨等, 2000).

1.3 非线性检验

可以证明, 一个线性过程的双相干系数和三相干系数有如下特征:

$$|K_{2x}(\omega_1, \omega_2)| = \frac{\gamma_{3e}}{\gamma_{2e}^{3/2}} \frac{|H(\omega_1) \parallel H(\omega_2) \parallel H(\omega_1 + \omega_2)|}{|H(\omega_1) \parallel H(\omega_2) \parallel H(\omega_1 + \omega_2)|} = \frac{\gamma_{3e}}{\gamma_{2e}^{3/2}} = \text{常数} \quad (11)$$

和

$$|K_{3x}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)| = \frac{\gamma_{4e}}{\gamma_{2e}^{3/2}} = \text{常数} \quad (12)$$

因此, 若信号的双相干系数和三相干系数的幅值对所有频率都恒等于某常数时, 我们就说所考察的信号是线性过程, 否则为非线性过程.

1.4 最小相位性分析

对于一般信号, 在有相同振幅谱的全部信号中, 具有最小相位的信号称为最小相位信号, 最小相位信号也称最小延迟信号. 前者是从频率域来看(相位最小), 后者是从时间域来看(能量延迟最小). 其特征就是在 Z 域中, 它的零点全部位于单位圆内(Oppenheim, Schafer, 1998).

可以证明, 在最小相位信号的频谱 $F(\omega)$ 中, 其幅度谱 $\ln |F(\omega)|$ 与相位谱 $\varphi(\omega)$ 互成希尔伯特变换. 这样, 最小相位信号的幅度谱一旦确定, 它的相位谱也就唯一地确定了. 于是就可以从最小相位信号的幅度谱唯一地确定该信号, 因此, 传统功率谱方法不会丢失最小相位信号的有用信息.

2 MT 实际资料分析

为了使 MT 信号特征性质的分析结果具有一般性和普遍性, 我们对安徽、江苏、江西、甘肃以及新疆等国内不同地区的 MT 实际资料作了具体分析. 本研究仅给出安徽和江苏测点 MT 信号的分析结果(图 1

~图 8).

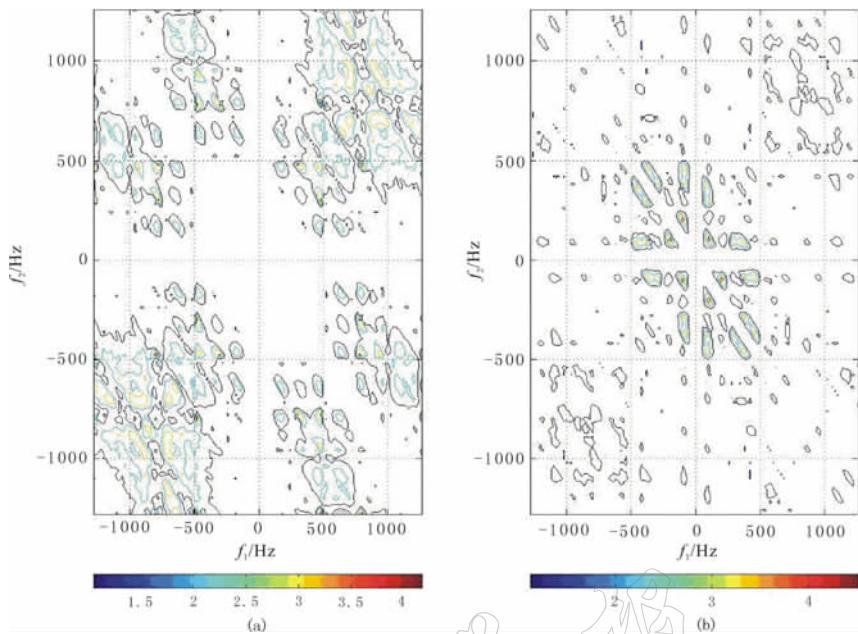


图 1 安徽测点 MT 电场信号的双相干系数. (a) 南北向电场; (b) 东西向电场

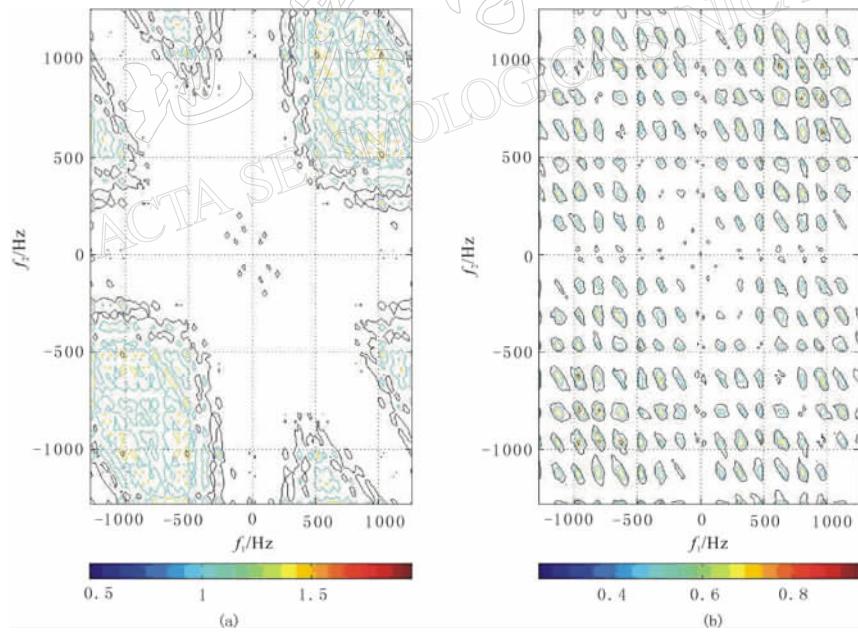


图 2 安徽测点 MT 磁场信号的双相干系数. (a) 南北向磁场; (b) 东西向磁场

结果显示: ① 不同测点 MT 信号的电磁场的双相干系数对所有频点, 既不为零, 也不为常数; ② MT 信号的电磁场的三相干系数难于图示, 但其结果亦显示对所有频点, 也具有既不为零, 也不为常数的特征; ③ 本研究在分析 MT 信号的零点分布时, 发现 MT 信号一般并不是在所有时间段上都服从高斯分布, 而是在整个时间段中某一时间段内表现为非高斯性, 而在另一时间段服从高斯分布, 也属于非高斯分布. 因为非高斯性分两大类: 一类是在所有时间内均为同一种非高斯概率密度分布; 另一类是多数时

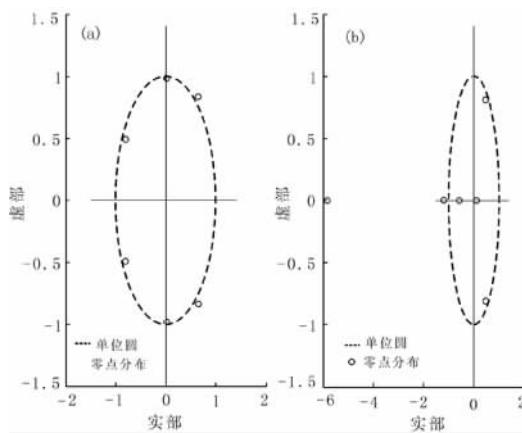


图 3 安徽测点 MT 电场信号的零点分布
(a) 南北向电场; (b) 东西向电场

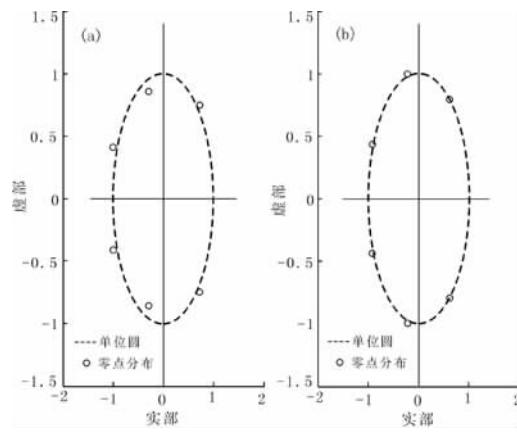


图 4 安徽测点 MT 磁场信号的零点分布
(a) 南北向磁场; (b) 东西向磁场

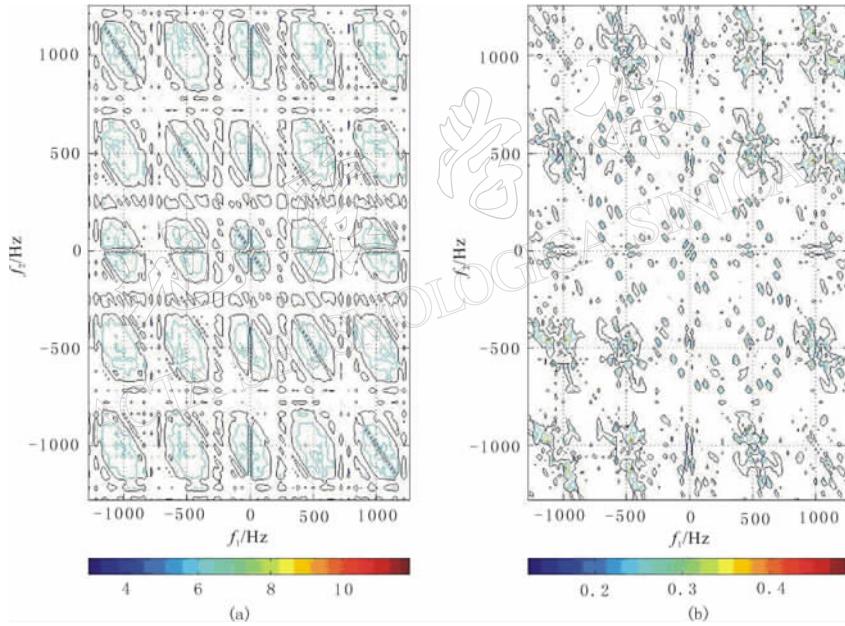


图 5 江苏测点 MT 电场信号的双相干系数. (a) 南北向电场; (b) 东西向电场

间为一种高斯分布, 少数时间为另一种高斯分布或非高斯分布. 根据以上结果, MT 信号一般具有非高斯、非线性和非最小相位的特征. MT 信号的这种特征并不满足传统功率谱方法的基本假设前提.

因此, 一般情况下利用功率谱方法处理 MT 资料, 必将丢失信号中的许多有用信息, 最终导致 MT 的解释结果不能够准确反映勘探地区真实的地质构造.

3 讨论和结论

本研究根据 MT 信号的双相干系数、三相干系数以及在 Z 平面上的零点分布, 分析研究了不同地区实测 MT 信号的性质特征. 结果表明, MT 信号一般具有非高斯、非线性和非最小相位性. 这与传统功率谱方法所假定的基本前提相矛盾, 这种矛盾将会导致传统功率谱方法处理结果存在着不合理性.

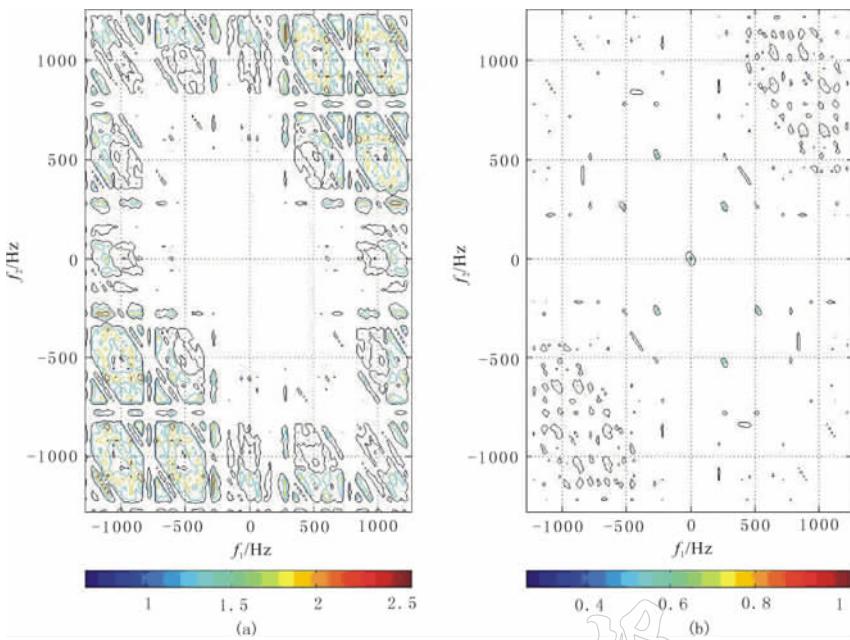
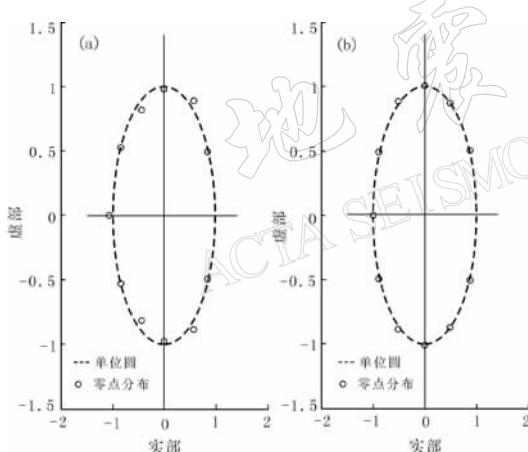
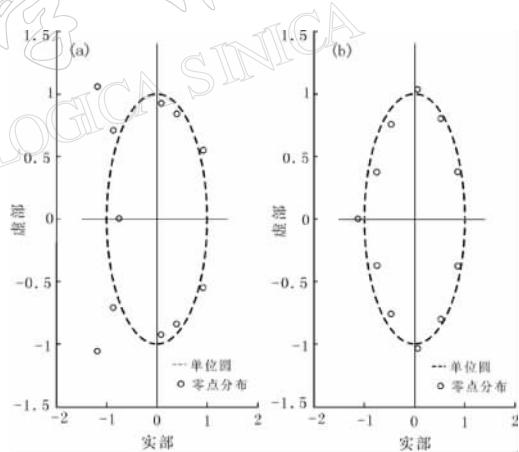


图 6 江苏测点 MT 磁场信号的双相干系数. (a) 南北向磁场; (b) 东西向磁场

图 7 江苏测点 MT 电场信号的零点分布
(a) 南北向电场; (b) 东西向电场图 8 江苏测点 MT 磁场信号的零点分布
(a) 南北向磁场; (b) 东西向磁场

在实际工作中, 我们常常面临大量非高斯、非线性、非最小相位等问题, 近几年在国内得到迅速发展和广泛应用的高阶统计量方法是解决这些问题的主要手段(李宏伟, 程乾生, 2002; Nikias, Petropulu, 1993; 张贤达, 1996; Mendel, 1991). 信号的高阶统计量包含了十分丰富的信息, 高阶统计量方法能够辨识非最小相位、非线性系统; 可以抽取不同于高斯信号的多种信号特征; 可以抑制高斯或非高斯的有色噪声等.

浙江石油勘探处镇国钧、黄哲高级工程师, 以及兰州地震研究所赵和云研究员, 提供了本研究所用的 MT 实际资料, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- 伯晓晨, 李涛, 刘路, 等. 2000. Matlab 工具箱应用指南——信息工程篇[M]. 北京: 电子工业出版社, 399~419
- 李宏伟, 程乾生. 2002. 高阶统计量与随机信号分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~27
- 姚天任, 孙洪. 1999. 现代信号处理[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 184~187
- 张贤达. 1996. 时间序列分析—高阶统计量方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1~96
- Oppenheim A V, Schafer R W 著. 1999; 黄建国, 刘树棠译. 2002. 离散时间信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 168~207
- Hinich M J. 1982. Testing for Gaussianity and linearity of a stationary time series[J]. *J Time Series Analysis*, 3: 169~176
- Mendel J M. 1991. Tutorial on higher-order statistics (spectra) in signal processing and system theory: theoretical results and some applications[J]. *Proc IEEE*, 79: 278~305
- Nikias C L, Petropulu A P. 1993. *Higher-Order Spectral Analysis: A Nonlinear Signal Processing Framework*[M]. N J: Prentice-Hall, 1~52

ANALYSIS ON STATISTIC CHARACTERISTICS OF MAGNETOTELLURIC SIGNAL

Wang Shuming Wang Jiaying

(Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Key words: magnetotelluric; bicoherency coefficients; tricoherency coefficients; zero-point distribution; higher-order statistics