

脉冲性电磁法物探信号的频谱分析

曲亚军¹, 王文清¹, 沙成满²

(1. 辽宁省地质矿产调查院, 沈阳 110031; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 电磁法物探的勘测信号, 在不同频率段, 存在不同的信号脉冲现象。通过小波时频分析功能, 可以对脉冲现象进行分析。研究表明, 脉冲现象严重影响基于傅立叶变换方法的解译效果, 脉冲现象严重时, 傅立叶方法已不适用。

关键词: 脉冲性; 电磁法; 频谱分析

中图分类号: P631.325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2007)03-0224-04

0 引言

电磁法作为一种物探方法, 以其方便快捷、操作简单、精度较高等优点, 代表了目前国际上最为先进的一种勘探手段。在地下水调查、工程地质勘察、环境灾变和矿产资源勘查等方面发挥了重要作用。但对于观测信号的物理解释方面却仍然存在许多理论上和实际信号处理方法上的问题, 影响了其作用的发挥。首先, 观测到的时域上的数字信号, 理论上应该是平稳的, 然而由于大地电磁信号源本身的变化、外界和人类活动产生的电磁信号干扰、测量系统自身的噪声, 使得观测到的信号通常是不平稳的, 并在某些频率段出现不连续和脉冲现象。目前采用的傅立叶变换是一种完全的频率域的分析, 不具备时域信号的分析功能, 因此不具备分析和判断信号脉冲性的能力。为尽可能地消除不平稳信号的影响, 传统的做法是测量多个时段, 取傅立叶变换后的谱成分加权平均值。但是对于有不连续和脉冲性质的频率段, 这种加权平均的处理有很大问题, 因为没有对这种脉冲效应进行充分评估, 也不清楚这种处理方法对解译效果的影响, 没有理论依据。本文使用小波分析方法的时频分析功能对电磁法物探信号进行分析, 分析信号不同频率成分的脉冲性, 并对信号的脉冲特性对傅立叶变换的影响进行了研究。

1 小波分解下的脉冲性分析

数学研究者又提出一种新的时频分析方法, 即小波分析。如果小波函数满足:

$$C_{\Psi} = \int_{R^*} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

其中, $R^* = R - \{0\}$ 为非零实数全体。则对任意信号 $f(t)$ 的小波变换定义为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{R^*} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt$$

相应的逆变换定义为:

$$f(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{R^+} \int_{R^*} \frac{1}{a} W_f(a, b) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db$$

从小波变换的定义可以看出, 尽管窗口傅立叶变换与小波变换都具有时频分析的特点, 在性质上差别还是很大, 窗口傅立叶变换对不同的频率成分在时域的取样步长是相同的, 而小波变换对不同的频率成分在时域的取样步长是高频者小, 低频者大, 所以它能将信号分解成交织在一起的多种尺度成分, 并对于大小不同的尺度成分采用相应粗细的时域或频域取样步长。从而能够不断地聚焦到对象的任意微小细节, 在不同的频率段分析信号。

对于工程实际问题多采用离散小波变换, 特别是在数字信号领域方面, 目前电磁法勘探设备的信

收稿日期: 2005-12-12; 改回日期: 2006-02-06

资助项目: 中国地质调查局“严重缺水地区地下水勘查”项目(1212010535414)资助。

作者简介: 曲亚军(1960), 男, 吉林四平人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事综合信息矿产预测、勘查方法、电法勘查资料地质解译等方面研究。

号是数字信号, 离散小波变换才具有实际意义。将离散小波离散化, 作为一种方便的形式, 则是对变换进行二进制离散化, 因此一般将离散化的小波变换为二进小波变换, 一般取 $a_0 > 1$, $b_0 > 1$ 。定义小波函数:

$$\Psi_{mn}(t) = a_0^{\frac{m}{2}} \Psi(a_0^m t - nb_0), (m, n \in Z)$$

其中, Z 表示全体整数集合, 对于 $f(t) \in L^2(-\infty, +\infty)$, 相应的离散小波变换为:

$$W_f(m, n) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\Psi_{m,n}(t)} dt \quad (m, n \in Z)$$

基于傅立叶变换的物探信号解释方法是基于连续平稳信号的。信号的非平稳性, 尤其是脉冲性, 对

解释精度影响很大, 因此, 对于信号在不同频率段脉冲特性的研究具有重要意义。小波方法是研究信号时频特性的重要手段, 可以将信号在不同频率段的时域特性充分展现出来。

图 1 是在辽宁某地测得的信号电场 (E_x) 小波分解, 取其 0.38 ms 一段, 共 4 560 个取样点, 8 个频率段 (1~1000 Hz)。从中可以看出, 信号的脉冲特性是很明显的。对于未分解的源信号, 其脉冲特性就很明显, 但是我们无法判定脉冲性是由哪些频率段贡献的。通过小波分解可以看出, 高频部分 (b 部分) 的脉冲性非常明显, 信号在寂静时段幅值几乎为 0, 在活跃时段的幅值又几乎相等, 信号质量很好; c 部分的脉冲性也很明显, 信号在寂静时段幅值几乎为 0, 在活跃时段的幅值有一定变化, 信号质量较好; 随着频率的降低, 信号的脉冲性降低, 寂静时段和活跃时段区分已不明显, 幅值差别也变得无规律, 信号逐渐演变成非平稳信号。当然, 这种规律只限于该信号, 不能说明其他信号也有这种规律。但信号在不同的频率段的脉冲性和平稳性的研究对于解译具有重要意义。

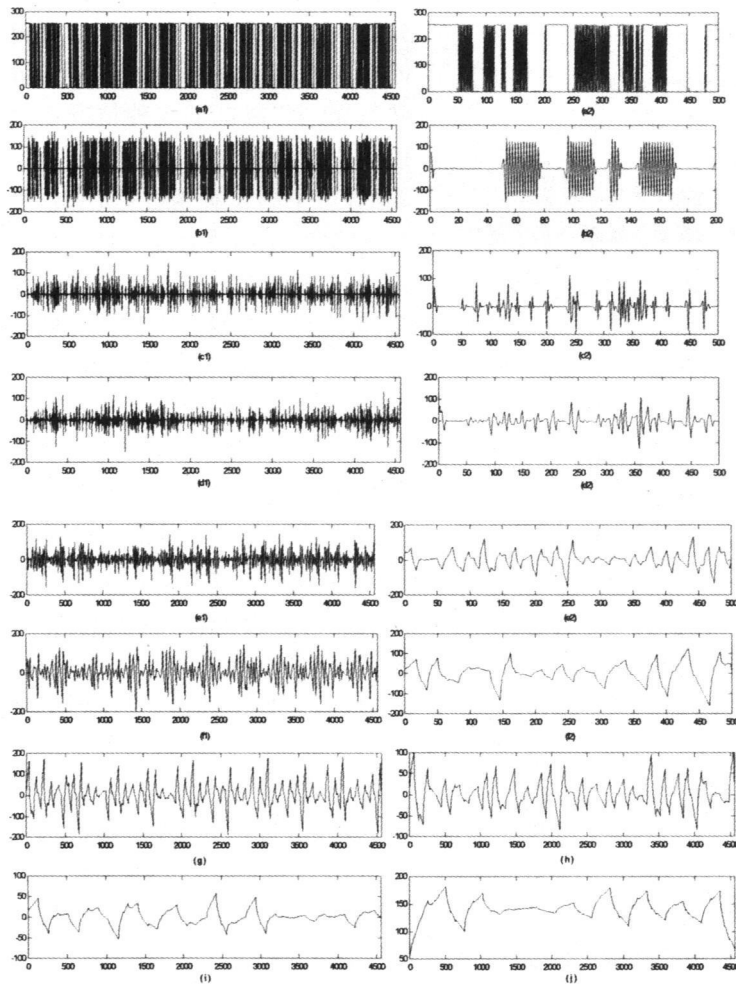


图 1 辽宁某地观测电场信号小波分解

Fig. 1 Wavelet resolution of signal at an observatory electric field in Liaoning province

a1. 原信号 a2. 原信号前 500 点 b1. 中心频率 (> 1000) b2. 前 200 c1. 中心频率 1000Hz c2. 中心频率 1000Hz 前 500 点 d1. 中心频率 830Hz d2. 中心频率 830Hz 前 500 点 e1. 中心频率 530Hz e2. 中心频率 530Hz 前 500 点 f1. 中心频率 225Hz f2. 中心频率 225Hz 前 500 点 g. 中心频率 110Hz h. 中心频率 50Hz i. 中心频率 20Hz j. 中心频率 < 5Hz

2 脉冲信号的频谱分析

为了研究信号的脉冲性对于基于傅立叶变换的解译方法的影响, 我们选取了 50 Hz 的理想谐波信号, 分别就 3 种情况进行了研究。第 1 种情况为连续信号 (理想情况); 第 2 种情况为等时脉冲信号, 即寂静时间与活跃时间相等, 分别为 5 个信号周期; 第 3 种情况为寂静时间是活跃时间的 2 倍, 分别为 10 个和 5 个信号周期。对如上 3 种情况的信号分别做不加窗 (矩形窗) 和加窗 (汉宁窗) 的傅立叶变换。从图 2 可以看出, 信号的脉冲性对于傅立叶变换结果的影响是巨大的。可以归纳为: ①由于有寂静时段, 脉冲信号幅值有较大下降, 与第 1 种情况的正常信号相比, 第 2 和第 3 种情况分别下降了 1/2 和 2/3; ②在邻近频率段产生严重的干扰信号: 第 1 种情况在邻近频率段分别产生 2 个干扰信号, 其

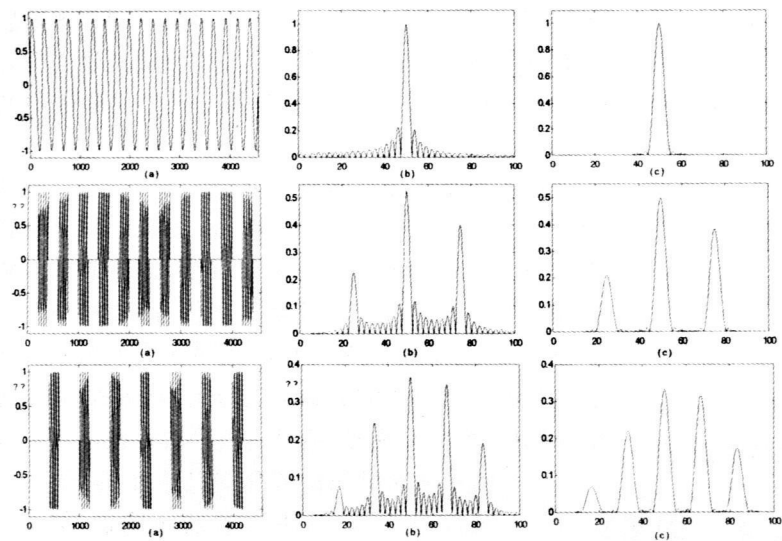


图 2 理想脉冲谐波信号时域曲线和傅立叶变换谱线

Fig. 2 The ideal impulse harmonic signal curve and Fourier transform spectral line

a. 时间域信号, 横坐标为采样点, 纵坐标为幅值(无量纲) b. 无窗傅立叶变换频率域信号, 横坐标为频率(Hz), 纵坐标为幅值(无量纲) c. 汉宁窗傅立叶变换频率域信号, 横坐标为频率(Hz), 纵坐标为幅值(无量纲)

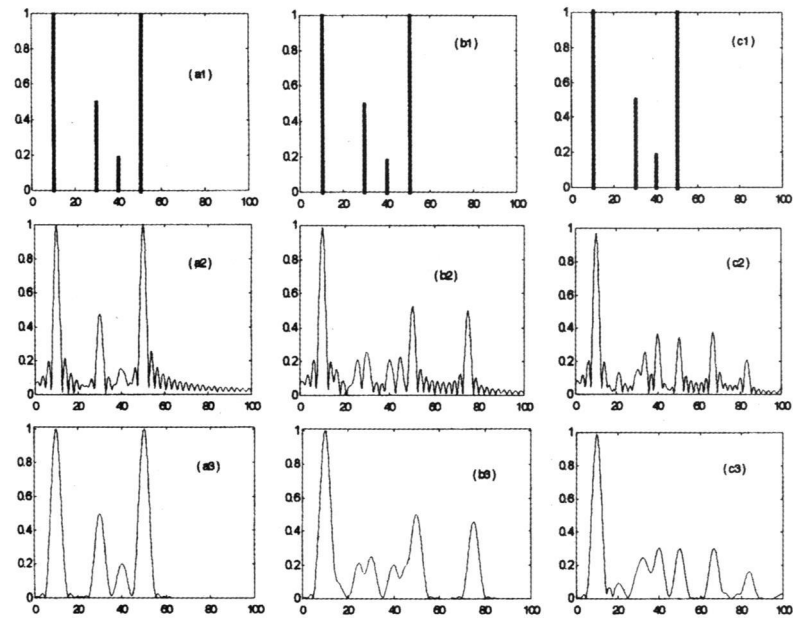


图 3 组合信号的理想脉冲信号傅立叶变换谱线

Fig. 3 The ideal impulse signal Fourier spectral line of the integrated signal

幅值相当于正常信号的 80% 和 40%; 第 2 种情况在邻近频率段分别产生 4 个干扰信号, 其幅值相当于正常信号的 90%, 66%, 50% 和 25%, 这足以使获得的傅立叶变换后的频域图形无法分清哪个波形是正

常的, 哪个波形是干扰, 所得频率域信号已经无法使用。图 3 是选取的一组谐波信号的组合, 频率分别是 10, 30, 40, 50 Hz, 对应幅值分别为 1, 0.5, 0.2 和 1, 仍按如上的 3 种情况进行研究, 其中 10 和 40 Hz 的信号始终都是连续的, 而 30 和 50 Hz 的信号, 第 1 种情况为连续信号, 第 2 种情况为等时脉冲, 第 3 种情况为寂静时间是活跃时间的 2 倍。图中 a1, b1, c1 为如上 3 种情况的理想谱线, a2, b2, c2 分别为 3 种情况组合信号的无窗傅立叶变换谱线图, a3, b3, c3 分别为“汉宁”窗口下 3 种情况组合信号的傅立叶变换谱线图。可以看出, 对于第 1 种情况, 所有信号为连续的, 无窗傅立叶变换产生一定的频谱泄露, 一些杂质信号产生, 但在“汉宁”窗口下的傅立叶变换, 滤掉杂质波, 与理想谱线相比, 谱线的质量是很好的; 对于第 2 种情况, 由于 30 和 50 Hz 的信号是等时脉冲, 导致有用脉冲信号的幅值降低 1/2, 并在 25 Hz, 45 Hz, 75 Hz 等频率处产生幅值较大的杂质波, 虽经过加窗(汉宁窗)傅立叶变换, 这些杂质波仍无法剔除, 难以识别; 第 3 种情况, 30 和 50 Hz 脉冲信号幅值降低到 1/3, 并且淹没在众多的杂质信号中, 与理想谱线相比, 已面目全非, 解译的价值不大。

3 结论

对于电磁法物探信号, 在使用傅立叶方法进行解译时, 应首先进行小波时频分析, 确定信号的连续性, 如果在一些频率段信号有脉冲现象, 则对傅立叶方法的精度影响很大, 如果寂静时段较长, 傅立叶方法已不适用。

参考文献:

- [1] 孙升林, 倪新辉, 龚惠民, 等. EH-4 电磁成像系统在中西部岩溶区地下水勘察中的应用[J]. 中国煤田地质, 2001, 13(3): 67-68.
- [2] Biswa Nath Datta. Preface for the special issue on numerical linear algebra techniques for control and signal processing[J]. Numerical Linear Algebra with Applications, 2001, 8(3-4): 355-356.
- [3] Fernand S Cohen, Athina Petropulu, Georgia Georgiou, et al. Multimedia digital signal processing laboratory[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2000, 8(3-4), 209-215.
- [4] Gordana JovanovicDolecek, Juan Manuel Madrigal, Ibarra Manzano Oscar. MuDSPDEMO-Demo package for multirate digital signal processing[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2000, 8(2): 132-138.
- [5] John Glossner, Jesse Thilo, Stamatis Vassiliadi. Java signal processing: FFTs with bytecodes, Concurrency [J]. Practice and Experience, 1998, 10(11-13): 1173-1178.
- [6] 楼顺天, 李博菡. 基于 MATLAB 的系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [7] 沙成满, 王恩德. 岩土工程勘测 EH-4 观测信号的频谱分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 193-197.

THE FREQUENCY SPECTRAL ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC SIGNAL ON GEOPHYSICAL PROSPECTING

QU Ya-jun¹, WANG Wen-qing¹, SHA Cheng-man²

(1. School of earth science, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Liaoning Institute of Geological and Mineral Survey, Shenyang 110032, China;

3. School of Resource & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: With respect to signals of geophysical exploration of electrical-magnetic method, there is different impulse phenomenon in different frequency. The time-frequency analysis function of wavelet can analyses impulse phenomenon. The research shows that the impulse phenomenon affects seriously the Fourier transform-based interpretation. When serious impulse phenomenon exists in signals, The Fourier transform Method can't be used.

Key Words: impulse properties; electrical-magnetic method; frequency spectral analysis