技术·方法

小波变换在天然电磁场信号时间序列处理中的应用

严家斌^{1,2},刘贵忠²,柳建新¹

(1. 中南大学信息物理工程学院,长沙 410083; 2. 西安交通大学电子与信息工程学院,西安 710049)

[摘 要]在电磁法探测方法中脉冲类噪声严重地影响了阻抗响应参数的稳定估计,消除这类噪声的干扰是数据处理的首要任务。由于噪声的脉冲性质使得传统的频率域方法无能为力,文章利用小波 变换的能量聚焦特性,据小波变换的模极大值特性,在时频域中搜索奇异点的位置并采用线性预测技术 来消除脉冲类噪声的影响,取得很好的效果,实测数据处理结果也显示本文的方法是有效可靠的。

[关键词]小波分析 时间序列 天然电磁场 去噪

[中图分类号] P631. 3 [文献标识码] A [文章编号] 0495 - 5331 (2008) 03 - 0075 - 04

0 前言

在电磁场观测中包含有许多场源的贡献如太阳 风产生的电磁场、雷电活动、高压电缆与大地偶合产 生的电磁场、工业设备产生的电磁场以及其它一些 人文活动产生的电磁场等,有的可以作为大地电磁 场的观测场源而有些则是干扰信号。这类干扰常常 具有高能量和瞬时特征(或在频域具有脉冲性),消 除这类干扰的影响是目前电磁场观测中的主要研究 内容之一。基于平稳信号的 Fourier分析由于 e¹ 的 Fourier变换不具紧支性,在频谱分析中必须知道过 去和将来的信息,因此即使某个时刻存在一个很小 的变化都将影响到整个频谱的计算,更不用说高能 量脉冲噪声的影响。这些缺陷表明,非平稳信号的 分析与处理需要比 Fourier分析具有更多、更严格的 要求。

法国地球物理学家 Morlet 80年代初^[1]提出的 小波分析方法为有效地分析这一问题提供了可能。 它与 Fourier分析描述问题的本质区别在于: Fourier 分析只考虑时域和频域间的一一映射,它以单个变 量(时间或频率)的函数表示信号;而小波分析则利 用时间 - 尺度函数来表示信号。由于小波变换具有 良好时频分析和多分辨率(多尺度)分析能力^[1],近 年来在信号处理、生物医学和地球物理等众多领域 得到广泛应用^[2-5]。本文从脉冲类噪声在小波域的 特点出发,利用小波变换的模极大值特性及线性预 测技术消除脉冲类噪声取得了比较好的效果。

1 小波变换

设在 $L^2(R)$ 的平方可积函数空间中,若 (x) $L^2(R)满足条件 <math>(\mid \land () \mid / \mid) d \prec , 则$ 称 (x)为母小波,信号 f(t)的积分小波变换有如下 定义.

$$Wf(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} f(t) \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$$
$$= f(t), \quad a, b \in t$$

式中 a > 0是尺度因子, b是位移 $b \in R$,函数_{a,b}(<math>t) = $\frac{1}{a} \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 。若把正频率轴按"二进划分 分割为邻 接的频带,并把尺度因子 a和位移因子 b二进制离 散化,即令 $a_j = \frac{1}{2^j}$ 并取 $a_0 = 2$,则母小波 (x)和信 号小波变换的离散形式分别为:</sub>

$$_{jb}(t) = 2^{-y/2} \quad (2^{j}t - k)$$

$$Wf(2^{j}, b) = \frac{1}{\sqrt{2^{j}}} \quad f(t) \quad \left(\frac{t - b}{2^{j}}\right) dt$$

为便于计算,文章选用高斯函数的三阶导数作 为小波函数,它具有三阶消失矩,存在有 4个极值 点,即两个主极值点,两个次极值点,下式分别是高 斯函数及小波母函数的表达式。

$$Guas(t) = \Phi(t) = \exp\left(-\frac{2}{2}\right)$$

[收稿日期]2007 - 01 - 22; [修订日期]2007 - 10 - 08。

[基金项目]国家自然科学基金(编号:60272072)资助。

[第一作者简介]严家斌(1968年—),男,2003年毕业于中南大学,获博士学位,现主要从事地球物理信号处理工作。

$$(t) = \frac{d^3}{dt^3} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$$

小波变换相对于傅氏变换的优点在于小波方法提供 了一个通过调整尺度因子 *a*的值来改变时间窗和频 率窗大小的方法,即小波变换具有为自动聚焦特性, 可在不同的尺度上分析信号。其次小波变换与信号 奇异性指数 ——Lipschitz指数 之间具有密切的关 系,可以通过小波变换来确定待分析信号奇异点的 位置⁷⁶⁻⁸⁷。在电磁信号的观测中往往会受到一些类 似于脉冲噪声的干扰,通常在频率域很难消除其影 响,但它的奇异性指数与信号有较大的差异,有利于 在小波域中进行处理。

2 脉冲类噪声的小波变换特征

若考虑观测的电磁信号在时域具有如下的合成 形式:

 $f(t) = A(t - t_0)^a + s(t) + c(t) + n(t)$

s(t)为电磁信号, c(t)为正弦噪声, n(t)为随机 噪声, $A(t - t_0)^a$ 为突变噪声。当 a = 0表现为阶跃 噪声, a = -1表现为脉冲噪声, a = 1表现为斜阶跃 噪声, a = 2表现为 *jerk*噪声。把观测信号 f(x)变换 到小波域则有:

$$Wf(t, a) = AW[(t - t_b)^a](t, a)$$

+ Ws(t, a) + Wc(t, a) + Wn(t, a)
第一项的小波变换有:

$$AW[(t - t_0)^a](t, a) = (a + 1) \phi^{n - a - 1}\left(\frac{t - t_0}{a}\right)$$

对于脉冲噪声 (t),它的奇异性指数即 Lipschitz指数都为 - 1,因此小波变换的模在每个尺度 上将会出现四个极大值,并随着尺度的增加模的幅 值逐渐变小,即在时频图上每个奇异点存在着 4条 随尺度的增加而宽度逐渐增宽、强度变小的极大值 线。对于矩形噪声和阶跃噪声它们的 Lipschitz指数 都为 0,它的小波变换在时频图上表现为 3条随尺 度变化的极大值线。三角噪声与脉冲噪声类似在时 频图上具有 4条极大值线,所不同的是脉冲噪声随 着尺度减小收敛于一点,三角噪声则收敛于一定宽 度上(等于噪声宽度)。

周期正弦噪声 c(t)的小波变换具有如下形式: $W[\sin t](t, a) = (2)^{1/2} (-a)^3 \exp(t)$

$$(-2a^2)\cos t$$

在小波域极大值的位置仅与单一信号的频率有 关,因而在时间尺度图上,极大值线表现为与时间无 关的一条线(带)。正弦噪声的振幅谱表现为线谱 特征,若对振幅谱进行小波变换,那么在时频图上特征,若对振幅谱进行小波变换,那么在时频图上特征与脉冲噪声相同,因此可据不同尺度上的极大值确定噪声的频率值。

脉冲噪声、阶跃噪声 (或矩形噪声)、三角噪声 及周期噪声在小波域中具有类似的特征,极大值线 明显,数量多,3~4条,对于具有这种特征的噪声统 称为脉冲类噪声,本文主要针对这类噪声进行处理。

3 噪声的改正及应用事例

3.1 噪声改正方法

本文的噪声改正方法如下: 对观测电磁信号 时间序列进行小波变换并计算小波系数模; 比较 小波系数模在不同变换尺度上的变化特征 (幅度变 化、极值线的多少、奇异值的大小等); 确定噪声 的类型 (脉冲噪声、阶跃噪声、三角噪声及周期噪 声); 搜索奇异点的位置; 采用线性预测技 术^[9,10]改正奇异点处的值。

$$\overline{x[n]} = - a(k) x(n - k)$$

 $\bar{x}[n]$ 表示奇异点处的预测值, a(k) (k = 1, 2, ..., m) 表示预测器的预测系数, p为预测器的阶数, 在文章 中 a(k)采用 Yule - Walker方法计算; 对改正后 的小波系数进行反变换得到改正的信号。

3.2 应用实例

1) 测点位置及地球物理特征

测点数据来自源于肃北某盆地的大地电磁观测数据,研究工作目的是查明盆地基底的埋藏深度、起 伏形态和主要断层的位置、性质及延伸情况,并划分 电性层序及厚度分布等。盆地中部主要由第三系和 第四系的砂岩、砂质泥岩等覆盖,电阻率在 10 ~ 150 ·m之间;在盆地的边缘有志留系等古生界地 层出露,电阻率在 100~250 ·m;震旦系的浅变质 海相碎屑岩和火山岩电阻率 350~2700 ·m。数 据点位于盆地边缘部位距城填 1~2km,不远处还有 一条主要公路穿过。

2) 干扰因素分析

图 1和图 2所示的电场信号时间序列表明在观 测过程中信号受到了严重干扰。干扰因素主要来自 于两个方面: 附近工厂设备和公路车辆穿过产生 的脉冲类干扰 (图 1),干扰强度大、异常明显: Ex方 向电场时间序列的均值为 - 571.1,而极小值为 - 5977,极大值达到 10666,极值是均值的 10 ~ 20 倍; Ey方向的均值 - 991.8,极小值为 - 7962,极大 值为 7595,极值也是均值的 8 ~ 9倍。从测量的时 间序列上看这类干扰对磁场信号的影响并不明显, 在磁场的时间序列上很少看到对应的干扰; 周期 性正弦波干扰(图 2),主要是高压线缆产生的电磁 场与高阻的大地偶合形成的干扰,由于高压线载有 几万伏甚至上千万伏的高压电,产生的周期性正弦 波干扰能完全淹没电磁信号,严重影响到高频阻抗 张量的估计。



3) 改正效果

7

图 3上图是利用实测数据通过多次叠加后所估 算的视电阻率曲线,在低频段(<0.03Hz)曲线明显 的不连续,误差棒大,如 xy曲线在频点 0.083、 0.0879、0.1201、0.1465、0.1719Hz的误差棒分别达 到了 18.308、24.42、35.48、19.05、24.72,这样大的 误差棒表明估计视电阻率值的可靠性不高,也表明 阻抗张量的估算是很不稳定的。在高频段曲线误差 棒虽然很小但明显的下掉,如上枝曲线从频点 244.141Hz的 407.905 · m 变为 344.727Hz 的 3.14071 ·m,其变化达到了 100倍,下枝曲线从 频点 244.141Hz的 314.573 · m 变为 344.727Hz 的 33.4571 ·m,虽然阻抗张量的估算较稳定但这 不是正常电磁场信号估计的结果,视电阻率值是地 下介质不同深度上电阻率值的一种综合加权反映, 它应是渐变的不是突变的。

在图 4的相位曲线上同样能看到类似的特征, 在低频段 0.1Hz左右误差棒大,曲线不连续,一方 面是由于天然场在这一频率范围上信号的强度很 弱,更主要的是上面提到的脉冲噪声干扰的影响使 信噪比降低的结果,在高频段相位几乎接近为零或-180,表明可能受到了近场信号的干扰。如两条曲 线的相位值从 83Hz 到 344.727Hz 分别为 -171.195 、-173.626 、-173.561 、-170.568 、 -165.007 、13.188 、7.549 、5.821 、5.003 、 1.175 、4.58 、因此利用这样的曲线进行反演往往 会产生错误的结果,特别是对低频的反演可能还会 出现不收敛的情况。





利用小波处理后阻抗估算质量发生了明显地改善(图 3、4),如 xy在低频段频点误差棒大为减小, 最大误差也只有 7.84而最小仅为 0.37。同时曲线 也更加圆滑、连续,没有突变现象出现,即阻抗张量 的估算变得较为稳定。在高频段即曲线的首枝变得 连续,没有出现掉点的现象。相位曲线 (图 4)的改 善也很明显,低频段误差棒变得很小,曲线的连续性 也得到改善,消除了脉冲噪声的干扰。

4 结论

文章通过利用小波变换的聚焦特性及各种脉冲 类噪声(脉冲噪声、阶跃噪声、三角噪声、周期噪声) 在小波域中模极大值的变化等特点。首先利用时频 域中的极大值线搜索奇异点的位置,然后采用预测 技术改正奇异点处的观测值来消除脉冲类噪声。实 测数据测试结果显示改正后的曲线更加平滑合理, 误差棒也大为减小,噪声得到了有效的压制,表明了 方法的有效性和可靠性。

[参考文献]

- Stephane Mallat A Wavelet Tour of signal processing [M]. China Beijing: machine Press, 2002.
- [2] 潘 泉,张 磊,孟晋丽,等.小波滤波方法及其应用 [M].北 京:清华大学出版社,2005.
- [3] 覃 征,鲍复民,李爱国,等.数据图像融合[M].西安:西安交

通大学出版社,2004.

- [4] 胡玉平,鲍光淑.一种改善MT低频数据质量的方法及其应用.地质与勘探 [J],2002,V38(3),46-48.
- [5] D O Trad, J M Travassos W avelet filtering of magnetotelluric data
 [J]. Geophysics, V65 (2), 2000, 482 491.
- [6] Stephane GMallat A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. IEEE transaction on pattern analysis and machine intelligence, 1989, V11, 674 - 693.
- [7] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用 [M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [8] Mioara Alexandrescu Detection of Geomagnetic Jerks using Wavelet analysis [J]. Jourial of Geophysical Research, 1995, V100 (87), 12557 - 12572
- [9] G Stanartao, U Spagnolini Canceling directional EM noise in magnetotellurics [J]. Geophysics Prospecting, 1995, V43, 606 -621.
- [10] M Yu Smimov. Magnetotelluric Data Processing with a Robust Statistical Procedure Having a High Break Point [J]. Geophysic J Int, 2003, V152, 1 - 7.

APPLICATION OF WAVELET TRANSFORM IN PROCESSING NATURE ELECTROMAGNETIC FIELD TIME SERIES

YAN Jia - bin^{1,2}, LU Gui - zhong¹, LU Jian - xin¹

(1. School of Info - Physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083;

2 School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: Owing to progress and development of modern civilization, inpulse - like noise seriously affects steady estimation of impedance response parameter in the electromagnetic exploration. It is the first task of data processing to remove noise interference. Traditional frequency domain method has powerless because of impulse character of noise. Using features of energy focusing and maximum characteristic of module in the wavelet domain, method removing impulse - like noise with linearity prediction and searching locality of singularity point in the time - frequency domain has got great effects. Processing results of practice data also show that the method is reliable.

Key words: wavelet analysis, time serial, nature electromagnetic field, de - noise