

文章编号: 1671-8585(2009)03-0182-04

基于小波变换的微地震信号检测方法研究

王正蕾

(中国石油化工集团公司国际石油勘探开发有限公司缅甸石油公司, 云南昆明 650051)

摘要:针对地震微弱信息检测中传统微弱信号检测算法或原理的局限性, 在分析小波变换信噪分离原理的基础上, 提出了将小波分析与自适应滤波相结合的算法。通过小波分析对被检测的微弱信号进行分解, 并单独设计每一子带的阈值, 从而实现了从强噪声信号中提取微弱信号的目的, 最终通过仿真的结果验证了本算法的可行性和可靠性, 为微弱信号的检测提供了新的理论算法。

关键词: 微弱信号; 小波分析; 自适应滤波

中图分类号: TE121

文献标识码: A

1 研究背景

地震是地球内部介质局部发生急剧破裂产生的震波在一定范围内引起地面振动的现象。地震的预报不像天气预报那样准确、及时, 目前世界上成功预报地震的次数不多, 并且都只是在震前几秒内, 人们很难及时采取有效的防御措施, 因此, 地震信息的监测及预报一直是地震监测领域的学者和专家们的研究热点。

要实现成功预报地震信息, 对震前能够表征地震灾害的信息的采集及监测是关键。通常一些有效的地震信息被淹没在大自然的强噪声中, 有的信号持续时间甚至还不到 1 s, 信号强度极其微弱; 另一方面, 由于目前传感技术、监测技术, 以及硬件电路技术的限制, 加上在信号处理算法方面一直缺少有效的弱信号提取算法^[1], 因此, 对微地震信息的采集和监测方面的研究一直很难开展。

在自然界中监测微弱的地震表征信息, 通过对微弱信号的提取获得地震灾害的第一手资料是研究地震信息预报惯用的思路, 这必然牵涉到地震信息的微弱信号检测问题。目前已经得到应用的微弱信号检测方法有窄带滤波法、双路消噪法、同步累积法、锁定接收法(频域分析法)、自相关及互相关检测法、取样积分法(时域分析法)^[2]等几种, 但是当被检测的信号非常微弱时, 如微地震信号, 经上述方法分析处理后, 被测信号功率有可能仍然小于噪声功率, 被测信号有可能仍然相当微弱, 比噪声小几个数量级甚至被噪声淹没, 或者在某些特定场合下噪声不理想, 不能被看成白噪声时^[3], 则上述检测方法就存在一定的局限性。因此, 本文将小波变换分析应用到强噪声背景下微弱信号的提取,

这是对于微弱地震信号检测系统研制的一次有益尝试。

2 小波分析应用于微弱信号检测的原理分析

2.1 小波变换的基本原理

小波分析是一种信号的时间尺度(时间-频率)分析方法, 它具有多分辨率分析(Multiresolution Analysis)的特点, 而且在时频两域都具有表征信号局部特征的能力, 是一种窗口大小固定但形状可改变, 时间窗和频率窗都可以改变的时频局部变化分析方法^[4]。

小波变换就是将信号 $f(t)$ 进行多尺度数学逼近, 它可以等效为使用多采样率滤波器组对信号 $f(t)$ 进行滤波, 由与尺度函数 $\varphi(t)$ 及小波函数 $\Psi(t)$ 相联系的低通滤波器 $H(\omega)$ 和带通及高通滤波器 $G(\omega)$ 组成。在小波分解的情况下, 这些滤波器没有重叠通带部分, 而是共同覆盖了输入信号的整个频带, 这样, 每个子带滤波器比全频带滤波器具有更短的冲激响应, 在各个子带的权值自适应更新的过程中, 可以采用不同的步长, 这将得到比全频带自适应滤波器更快的收敛速度。

假若待分析信号 $f(x)$ 为能量有限的一维函数, $f(x) \in L^2(R)$, 则其连续小波变换(Continuous Wavelet Transform) 定义为^[5]:

$$W[f(a, b)] = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(x) \cdot \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (1)$$

收稿日期: 2009-02-22; 改回日期: 2009-04-09。

作者简介: 王正蕾(1975—), 男, 工程师, 现主要从事野外地震资料采集和地震资料综合解释方面的研究工作。

式中： a 为尺度因子； b 为平移因子； $\Psi(x)$ 称为母小波； $\frac{1}{\sqrt{a}}$ 为归一化因子。

因为任何一种变换只有存在逆变换才有实际意义，所以 $\Psi(x)$ 必须满足可允许性条件：设 $\Psi(x)$ 的傅里叶变换为 $\Psi(\omega)$ ，即^[5]

$$\int_{\mathbb{R}} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (2)$$

这时称 $\Psi(x)$ 为小波函数。从式(1)可以看出， $\Psi(x)$ 具有不唯一性，它由经过尺度因子和平移因子的变换而形成的一系列小波函数组成。

2.2 小波变换的信噪分离分析

2.2.1 信噪分离原理

小波变换具有一种“集中”的能力，它能将信号的能量集中到少数小波系数上，而白噪声在任何正交基上的变换仍然是白噪声，并且有着相同的幅度。相对来说，信号的小波系数值必然大于那些能量分散且幅值较小的噪声小波系数值^[6]。选择一个合适的阈值，对小波系数进行阈值处理，在小波变换域中去除低于阈值的小波系数值，然后进行小波逆变换就可以达到去除噪声保留有用信号的目的。

利用小波进行信号的消噪可以很好地保存有用信号中的尖峰部分和突变部分，而用傅里叶分析进行滤波时，由于信号集中在低频部分，噪声分布在高频部分，所以，虽然可用低通滤波器进行滤波，但是它不能将有用信号的高频部分和由噪声引起的高频干扰加以有效地区分，若低通滤波器太宽，则滤波后信号中仍存在大量的噪声；若低通滤波器太窄，则将一部分有用信号当作噪声滤掉了^[7]。因此，小波分析对非平稳信号消噪有着傅里叶分析不可比拟的优点。

2.2.2 信噪分离过程

假设一个叠加了加性噪声的有限长信号可用下式表示： $y = x + \epsilon n$ 。信号处理的基本就是从被污染的信号 y 中，尽最大可能地恢复原始信号 x ，最大限度地抑制或消除噪声 ϵn 。令 \hat{x} 表示去噪处理后的信号， t 为设定阈值， X 、 Y 分别表示 x 和 y 的小波变换，令 X' 表示从 Y 中对 X 的估计，则一般说来，一维信号的消噪过程可以分为 3 个步骤进行。

1) 一维信号的小波分解。

选择一个小波并确定一个小波分解的层次 N ，然后对信号 y 进行 N 层小波分解；

2) 对小波分解的高频系数进行阈值处理。

对第 1 层到第 N 层的每一层高频系数，选择一个阈值进行阈值处理，处理方法有以下两种^[8]：

① 软阈值(Soft-Threshold)方法，即

$$X' = T_s(Y, t) = \begin{cases} \text{sgn}(y)(|y| - t) & |y| \geq t \\ 0 & |y| < t \end{cases} \quad (3)$$

② 硬阈值(Hard-Threshold)方法，即

$$X' = T_h(Y, t) = \begin{cases} Y & |y| \geq t \\ 0 & |y| < t \end{cases} \quad (4)$$

3) 一维小波的重构。

根据小波分解第 N 层的低频系数和经过阈值处理后的第 1 层到第 N 层的高频系数，进行一维信号的小波重构。

由此可知，在各尺度中设置不同的阈值，把小波变换系数与阈值相比，如果小于此阈值，就认为是由噪声产生的，并置为零；如果大于此阈值，其值保留，从而实现了去噪的目的。显然最关键之处就是如何在保留信号细节和去噪的能力之间选取阈值，从某种程度上说，它直接关系到信号消噪的质量。一般将所选取的阈值作为信号的长度 N 及噪声方差 ϵ 的函数 $t(N, \epsilon)$ ，阈值的估计算法有许多种，主要有半阈值算法、软阈值算法、影阈值算法和平移阈值估算法等^[2]。

3 基于小波分析的微地震信息自适应滤波算法

简单地说，地震就是地球表面的快速振动。相关研究证明，在地震爆发前，除了动物会有敏感异常反应外，在自然环境中还有很多其他的信息可以表征地震的发生，只是通常这些信息被淹没在大自然的强噪声中，并且大多数信号都极其微弱，其持续时间不足 1 s，因此，为了有效地对这些能够预报地震信息的微弱信号进行采集和监测，如何有效提取这些微弱信号的特征，成为微地震信息采集和监测的关键技术之一。

为此我们将小波分析和自适应滤波技术结合起来，设计了分段阈值提取微弱信号的算法，通过使分段提取的能量误差最小，从而实现了微弱信号的有效滤波和提取。

3.1 算法描述

小波包分解信噪分离的途径是在有用信号的频率成分下,通过小波包分解,只保留所需要的有用频带小波变换的结果,将其他通道的变换结果置为零,然后重新合成信号。

由于白噪声在小波变换后各个子带中分布规律相同,而各个子带中相应位置的小波系数之间没有相似性,但从多分辨分析的角度考虑小波信号的各个频带,小波系数的幅值随着尺度的减小而衰减。在地震信息测量的微弱信号中,既包含平稳信号,也包含随时间变换的非平稳信号,因此,采用自适应小波算法根据信号局部特征自适应地选择小波分析函数进行信号去噪。

输入信号 $x(k)$ 和期望信号 $d(k)$ 都被尺度函数分解为多个(假设为 M 个)子带。然后,输入信号的各个子带信号通过自适应滤波矩阵进行权值(小波系数)的处理,以便得到在子带中与期望信号相应频带进行比较的输出信号。本算法中,我们的目标是使子带误差能量最小。本模型中,目标函数可以是局部误差幅度平方的线性组合,即

$$\xi = \sum_{i=0}^{M-1} E[|e_i(m)|^2] \quad (5)$$

式中: $e_i(m)$ 为第 i 个子带误差信号。

在去噪阈值的选择中,对同一个信号在不同段采用不同的小波函数,得到的系数不能采用统一的标准来衡量,应当将小波分析与自适应滤波结合起来,根据微弱信号的局部特征,选择相应的最佳小波。在每一小波分析段,采用相应的阈值算法,即在不同小波函数段,选择不同的阈值,并且在不同的分解层,采用与尺度相关的阈值。具体阈值设计步骤为:①在每个信号段,分别计算初始阈值 $t_0(i) = \sigma \sqrt{2 \ln N}$;②第 j 级阈值 $t_j(i) = a^{j-1} t_0(i)$, 式中: $a < 1$ 为整因子, $a = 1/2$ 具有较好的稳健性, j 为小波分解的级数。

本文采用的小波函数为 DB3 函数,因为它能够捕捉到最大的能量信号,进行 3 层小波包分解,

即 $N=3$ 。序号为 N 的小波包分解对应的频带为

$$f = (n\omega_{\max}/2^N, (n+1)\omega_{\max}/2^N) \quad (6)$$

式中: N 为分解层数; ω_{\max} 为最大分辨率。

3.2 算法误差分析

1) 采样间隔的大小在离散积分中起很大的作用,也影响了分解的效果。

2) 小波分解是广义积分,实际计算中用有限积分代替了无限积分,这必然影响分解的效果。

3) 重构信号时要求无限次分解,但在实际中只能作有限次的分解,故重构时也会出现误差。

3.3 算法仿真

为了模拟在强噪声背景中提取微弱的微信息,我们采用了提取混叠在大量强噪声背景中的微弱心电信号的方法。根据信号的局部特征分段自适应选择小波函数,并分段计算相应的去噪值,从而实现微弱信号的提取及处理,以此证明本文所提出的微弱信号检测方法的有效性。

心电信号是心脏电活动在人体体表的表现,信号一般比较微弱,幅度在 5~10 mV,频率为 100~105 Hz。在心电信号的检测过程中,即使是各项屏蔽措施完善的情况下,也主要存在 4 个噪声来源:①电源线噪声;②电极—组织交界面噪声;③放大器噪声;④肌电位。这些干扰使系统的信噪比下降,甚至会淹没微弱的心电信号。

在待处理的心电信号中含有 50 Hz 干扰及 25~250 Hz 之间的肌电位等大量复杂的干扰信号。在仿真测试中,采样频率为 1 000 Hz,在获得原始的含有大量背景强噪声的心电信号之后,分别采用单一的小波整体滤波分析和分段小波滤波分析,以比较、验证本文所提出的微弱信号检测算法的可行性及可靠性。

图 1 是上述的原始心电信号(含大量噪声)的波形显示,图 2 为采用同一小波函数 DB3 对加噪信号进行整体滤波去噪后,提取的分析信号的波形,图 3 为采用 DB1~DB4 小波函数分段对加噪信号进行滤波去噪后,提取的分析信号的波形。

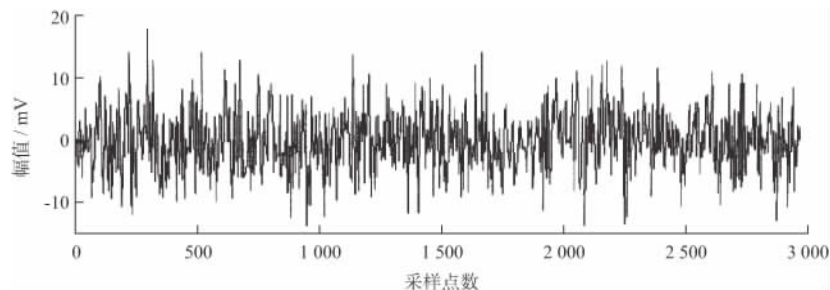


图 1 初始混合信号

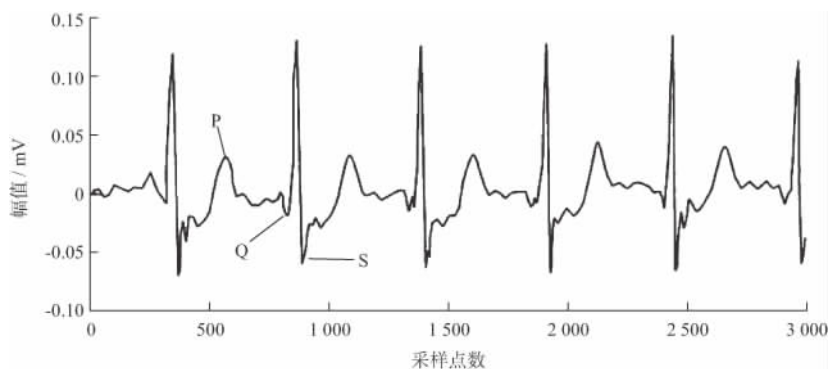


图2 整体滤波后的信号

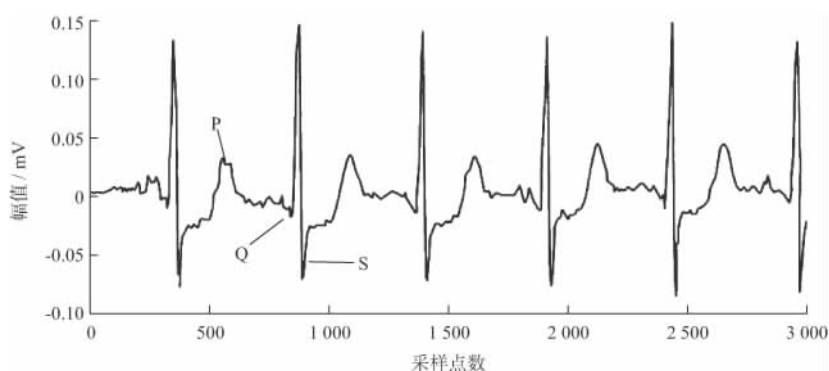


图3 分段滤波后的信号

从图2和图3的去噪波形对比中发现,在P段、Q段和S段,采用本文提出的分段阈值提取微弱信号的算法,能够更加有效地提取淹没在强大噪声背景下的微弱有用信号,并且对有效信号的提取更加精细、准确。从信号处理效果可以看出,相对传统小波分析而言,采用分段自适应小波分析及分段阈值去噪可以显著提高信号分析的信噪比,最大限度地保留了信号的微弱特征。

4 结束语

本文结合小波分析理论和自适应滤波的特点,针对从强噪声信号中对微弱信号进行提取的应用要求,提出了一种基于小波变换的自适应滤波算法。该算法能够进行自适应滤波,可以大大提高微弱信号提取的精度和速度,自适应效果好,稳定性强,且具有良好的鲁棒性,是强噪声背景下信号检测的一种有效方法。

随着技术的发展,应用范围的拓宽,微弱信号检测的理论在不断更新,方法在不断改进和增多。在实际应用中,往往是把多种方法揉合在一起使用,而且我们还可根据实际应用情况采用它们的不同组合设计出适合需要的微弱信号检测设备,下一

步的研究工作是在本文提出的基于小波分析变换提取微弱信号的算法的基础上,设计研制检测装置,使之能够实现对地震微弱信息的检测,为地震预报工作的研究打下基础。

参 考 文 献

- 1 汪懋华.“精细农业”研究与工程科技创新[J]. 农业工程学报,1999,15(1):69~71
- 2 杨福生.小波变换的工程分析与应用[M].北京:科学出版社,1999.156~173
- 3 曾庆勇.微弱信号检测[M].浙江:浙江大学出版社,1998.14~17
- 4 王冠宇.混沌振子微弱信号检测的理论研究及实践[D].浙江:浙江大学,1998
- 5 Sherlock B G, Kakad Y P. Windowed discrete cosine and sine transforms for shifting data[J]. Signal Processing,2001,81(7):1 465~1 478
- 6 Mallat S 著.信号处理的小波导引[M].杨力华,戴道清,黄文良,等译.第2版.北京:机械工业出版社,2003.50~51
- 7 温晓君,宗成阁.混沌背景下基于神经网络的微弱谐波信号检测[J].传感技术学报,2007,20(1):168~171
- 8 Xu Pengcheng, Jing Zhujun. Silnikov's Orbit in Coupled Duffing's Systems[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2000,11 :853~858

(编辑:任 鹏)