

提高探地雷达技术在岩土工程

勘察检测中应用效果的方法

韦宏鹤

(中国科学院力学研究所 北京 100086

北京华科软水电信息技术有限公司 北京 100761)

摘 要 探地雷达作为一种地基勘察检测手段,在岩土工程检测应用中已发挥了越来越大的作用。但要继续深化方法的应用深度及广度,在设备性能不易提高的前提下,提高理论解释水平及数据处理方法是提高雷达自身探测能力的根本所在。本文在关于探地雷达的数据处理方面,根据探地雷达数据的变化特征,引入小波分析方法,提出了一套基于小波变换的提高探地雷达数据处理效果的方法,分析方法的基本原理,并通过对实际资料的处理结果说明方法的有效性。

关键词 探地雷达 小波变换 多尺度 去噪
信号增强

1 前言

脉冲探地雷达采用超宽频带短脉冲发射高频信号。系统具有高纵向分辨率、野外操作方便、工作效率高的特点,已成为浅层探测最为有效的手段,是其他传统地球物理方法所无法比拟的。

一种方法技术的应用效果,不但取决于方法本身硬件设备的发展程度,同时还与其数据处理技术有关。从目前的发展来看,探地雷达的数字处理方面基本上以参考类似方法的处理技术为基础,还未形成自己独特而完整的方法,这是制约探地雷达技术进一步发展的主要因素之一。

压制噪声及提高有效信号是探地雷达数据处理的主要内容之一。在去噪方面,传统的方法不外乎几何加权平滑滤波、频域带通滤波、时域褶积运算等。这些方法最大的特点就是在压制噪声的同时也降低了有效信号的强度,不适合用于探地雷达的去噪处理。所以,探地雷达的信号处理的根本所在就是如何在去噪处理时而又能增强有效信号的强度。

本文将探讨如何利用多尺度小波变换的特点来提高探地雷达的数据处理效果。

2 提高探地雷达弱信号强度的方法

2.1 小波函数选择

在小波变换的表达式(秦前清,杨宗凯,1995)

$$WT_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

式中: $f(t)$ ——信号;

$\overline{\psi}$ ——基本小波 ψ 的复共轭;

a ——尺度系数;

b ——平移因子。

ψ 在时域上表现为正负振荡,在频域上则为有限能量的。 ψ 的这两个特征正是其被称为小波的根本原因。

当被分析信号为有界信号时,由于小波函数也是能量有限函数,故信号的小波变换存在如下关系(杨福生,1999)

$$|WT_a f(t)| \leq K a^\alpha \quad (2)$$

式中: a ——尺度因子;

α ——Lipschitz 指数;

K ——与所用小波有关的量。

式(2)说明,当 $\alpha > 0$ 时,小波变换的模极大随尺度的增大而增大。反之,当 $\alpha < 0$ 时,极大模则随尺度的增大而减小。由于连续变化信号的李氏指数 α 满足 $0 \leq \alpha < 1$,而随机噪声的李氏指数 $\alpha < 0$ (杨福生,1999),故逐渐增大尺度进行小波变换可以压制随机噪声干扰。

由于探地雷达信号属于高频信号,其周期很短,因此要求用于探地雷达数据处理的小波函数的支撑长度应尽可能小,并且还要求小波函数具有正交性质。

目前,理论研究及各种实际工程应用主要为以下几种小波(见表1所示)。

几种正交小波的主要性质

表 1

小波函数(缩写)	DB	COIF	SYM	MAYE	BIOR
正交性	是	是	是	是	双正交
紧支撑性	有	有	有	无	有
支撑长度	2N-1	6N-1	2N-1	有限长度	2N+1
滤波器长度	2N	6N	2N	[-8,8]	2N+2
对称性	近似对称	近似对称	近似对称	对称	不对称
小波消失矩阶数	N	2N	N	-----	N-1

根据小波理论可知,影响小波变换性质的主要指标是小波函数的支撑长度、消失矩阶数。支撑长度影响时域变换的分辨率,而消失矩参数则影响频域变换结果的分辨率。

从表 1 可见, DB 小波与 SYM 小波的支撑最小,故它们的时域分辨率最高, BIOR 小波次之,而 COIF 小波的时域分辨率最低。从消失矩来看,由于 DB 与 SYM 小波的消失矩小于 COIF 小波的消失矩阶数,故在频域内 COIF 小波的分辨率最高, DB 小波与 SYM 小波次之, BIOR 小波则最低。综合时频域分辨率大小来看, DB 小波及 SYM 小波具有相对较好的时频局部化性能。

从表 1 来看, DB 小波与 SYM 小波具有相同的支撑长度及消失矩阶数,它们的支撑长度及消失矩均等于其函数的阶数,因此,它们的时频分辨率基本相同。SYM 小波是在 DB 小波的基础上建立的(胡昌华等,1999),两者之间在小阶数(小于 4)滤波器长度几乎一致,只有在 N 大于 6 时出现较为明显的差别。据此可知,当 N 小于 5 时, DB 小波及 SYM 小波的细节曲线基本上重叠在一起。只有当 N 大于 6 时, SYM 小波与 DB 小波才出现较大的差别。

2.2 去噪处理

小波分解去噪是在频域内进行,它通过对信号进行各种处理来评价噪声、建立去噪的阈值,然后利用阈值对信号的小波分解系数进行去噪处理。其去噪的基本原理如下(胡昌华等,1999):

假设信号序列为 $x = \{x_i\}$, 首先选择小波函数对 x 进行 m 层小波分解得到对应各分解层的高频系数序列 $c_{i,j}$, 然后根据分解结果求取各级序列的最小均方差, 并取均方差序列的极值。利用该极值作为噪声阈值进行如下的去噪处理:

$$\eta_s(\omega_i, \lambda) = \begin{cases} 0 & |\omega_i| < \lambda \\ \text{sign}(\omega_i)(|\omega_i| - \lambda)_+ & |\omega_i| \geq \lambda \end{cases} \quad (3)$$

其中 ω_i 为小波变换的高频系数, λ 为最小均方差的极值。对于含噪信号来说, 一般噪声会延续到多层分解系数中, 由于每一层分解的高频系数的频率特征均不一样, 因此可根据各层的比例系数来调整去噪阈值, 取各层分解系数的中值作为调整阈值的比例因子。

图 1 为正演模拟 3 点滑动平均法、镶边带通滤波及小波分解去噪三种方法的去噪结果。可见, 滑动平均法只能滤去高频噪声, 对低频噪声则几乎没有起作用。镶边带通滤波法滤波效果比 3 点滑动平均法略好, 去噪后基本上能保留原始信号的基本特征。但它对较低频噪声的去噪效果仍然不理想, 滤波结果依然存在较大的低频噪声成分。而小波去噪处理结果则比上述两种方法的去噪效果好得多, 它基本上消除了噪声成分, 但仍然比较好地保留有效信号。

2.3 信号增强

信号在经过去噪处理后固然可以提高信号的信噪比, 但依然不能提高信号的强度, 尤其在信号比较弱的情况下依然不能根据去噪结果清楚地识别异常分布。为此, 必须对去噪后

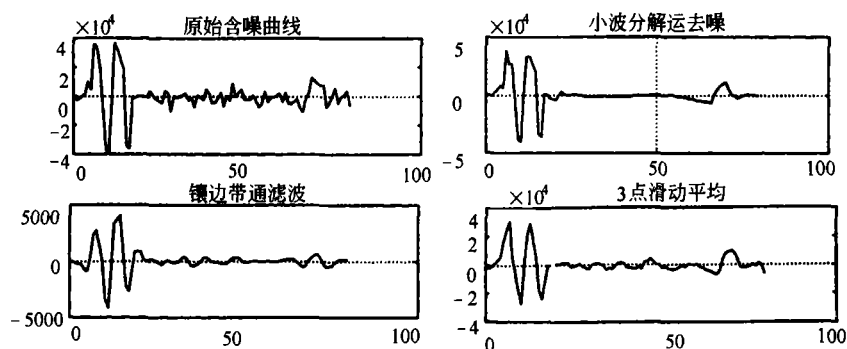


图1 小波去噪与传统去噪方法的比较

的信号进行增强处理。利用小波多尺度分解的性质可以达到提高有效信号强度的目的。

假设含噪信号 $f(t)$ 可写为

$$f(t) = s(t) + n(t) \quad (4)$$

其中 $s(t)$ 、 $n(t)$ 分别为有效信号及随机噪声干扰。对 $f(t)$ 进行多尺度小波分解, 将不同尺度的有效信号及噪声成分的小波变换系数相乘得

$$\prod_{j=1}^J WT_i(j, k) = \prod_{j=1}^J [WT_s(j, k) + WT_n(j, k)] \quad (5)$$

$j=1, 2, K, J, J$ 为分解总次数, k 为位移参数。令 $S_{j,k} = WT_s(j, k)$, $N_{j,k} = WT_n(j, k)$, 则上式展开后的结果为

$$\prod_{j=1}^J WT_i(j, k) = \prod_{j=1}^J S_{j,k} * \prod_{j=1}^J \left(1 + \frac{N_{j,k}}{S_{j,k}} \right) \quad (6)$$

等号右边括号内第二项是由于噪声存在时所带来的附加项。

假设有效信号及随机噪声的 Lipschitz 指数分别为 α_1 、 α_2 , 并且 $\alpha_1 \geq 0$, $\alpha_2 < 0$ 。则根据(2)式可将上式扩号内第二项写为

$$\frac{N_{j,k}}{S_{j,k}} = \left| \frac{K_{2j} 2^{j\alpha_2}}{K_{1j} 2^{j\alpha_1}} \right| = \left| \frac{K_{2j}}{K_{1j}} \right| 2^{j(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (7)$$

从最差的情况考虑, 假设噪声强度与有效信号强度近似相等, 即 $|K_{2j}| \approx |K_{1j}|$, 则根据式(7)可导出经过 J 层分解运算后, 有效信号系数占总信号系数的比例为

$$\prod_{j=1}^J \frac{S_{j,k}}{S_{j,k} + N_{j,k}} = \prod_{j=1}^J \left[1 - \frac{2^{j(\alpha_2 - \alpha_1)}}{1 + 2^{j(\alpha_2 - \alpha_1)}} \right] \quad (8)$$

由于 $\alpha_2 - \alpha_1 < 0$, 故括号中第二项随着尺度参数的增大而减小, 也即随着尺度的增大, 噪声的影响越来越小, 而有效信号的影响则越来越大。

当分解层数达到一定的大小时, 系数乘积中的噪声系数相对有效信号的系数可以忽略不计, 即系数中基本上是由有效信号组成的。因此, 将多尺度分解系数乘积可使有效信号的强度越来越大, 而噪声信号强度则越来越小, 从而达到了提高有效信号强度的目的。利用这种方法, 可以增强深部弱信号的可识别性。这就是采用多尺度分解系数乘法提高弱信号的基本原理。

表2为尺度1~8层小波分解系数乘积的计算结果, Lipschitz 指数 α_1 及 α_2 分别以一般情况取为0.5及-0.5。由计算结果可以看出, 假设原始信号的信噪比接近于1:1, 而当尺度等于

4时,有效信号系数比例已达97%,这说明,此时分解系数中基本上由有效信号系数组成,噪声干扰的系数可以忽略不计。

含噪信号多尺度小波分解有效信号系数乘积比例表

表2

尺度系数 J	1	2	3	4	5	6	7	8
比例 (%)	67	80	89	94	97	98	99.2	99.6

另一方面,大尺度分解相当于对信号进行概貌性观察,时间影响范围大,不利于局部性分析。此外,由于浅部信号强度大于深部信号,故随着尺度的增大,浅部信号增大速度比深部弱信号快。因此,若 J 过大,容易使得同一道信号的深浅反射波强度差异悬殊,使深部弱信号在视图上容易被压制,不利于识别。故 J 的选择既要能使有效信号与噪声信号的数值差别大到可以明显识别有效信号,同时又能适当保持信号道均衡的特征,保证深部有效信号能清楚地识别。根据表1的计算结果,在一般情况下, J 取3或4即可保证分解系数乘积中有效信号含量达到95%以上。

3 实际应用

图2是广东某开发区一个软地基强夯块石墩加固剖面的观测结果的去噪结果,由于淤泥厚度很大(施工设计墩长为17m左右),并且施工区位于海边,受海水入侵的影响,反射波强度较弱,这点从去噪结果图上可以看出。

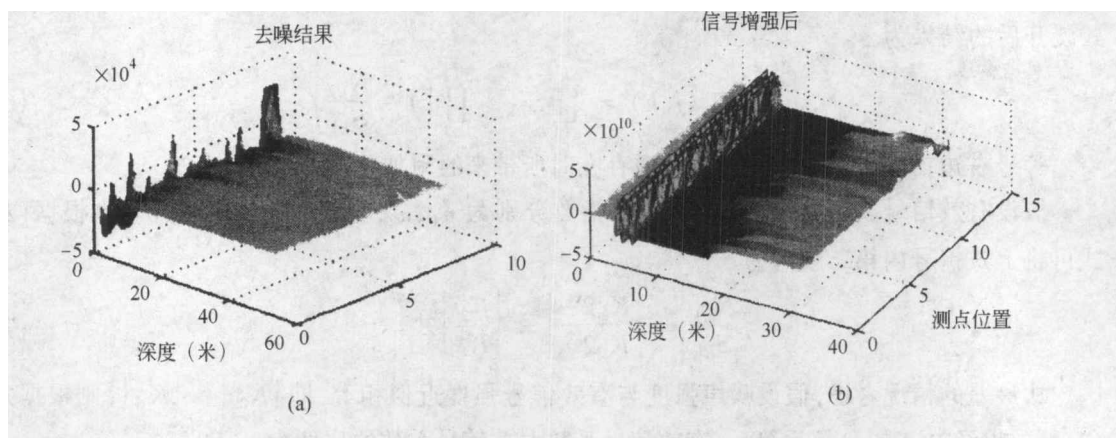


图2 强夯块石墩地基加固雷达检测信号增强处理结果

图2(a)是去噪处理后的结果,从图上可以清楚地识别浅部墩体位置,但随着深度增大,信号迅速衰减,无法分辨有效加固深度。图2(b)是信号增强处理后的结果,分解尺度系数 J 取为4。对数据的增强处理结果可见,信号强度得到明显增强。根据图2(b)可以清晰地对加固处理结果进行判断。比较图2(a)与图2(b)可以看出,经过信号增强处理后,深部弱反射波得到了明显增强,墩位及墩底均清晰可辨。

4 结语

虽然小波变换本身具有压缩随机噪声的功能,但由于实际探地雷达观测数据微弱性,使得去噪处理结果不能增强信号的可识别性。基于小波变换的提高探地雷达数据处理方法利用小波变换的时频局部化特性,通过多尺度变换的叠加处理来增强有效信号强度压制随机噪声。

根据对实际资料的处理结果可知,根据方法对实际探测剖面的处理结果可知,基于多尺度小波变换的信号处理方法可明显地增强探地雷达深部若信号、提高信号的信噪比,为拓宽探地雷达信号处理技术提供了新的方法手段。

参 考 文 献

- [1] 秦前清,杨宗凯.实用小波分析.西安:西安电子科技大学出版社,1995
- [2] 杨福生.小波变换的工程分析与应用.北京:科学出版社,1999
- [3] 胡昌华等.基于MATLAB的系统分析与设计——小波分析.西安:西安电子科技大学出版社,1999

Abstract: As one of detection methods of construction basement, ground penetrating radar (GPR) pays more and more important role in geotechnical engineering detection. But it is usually difficult to improve the characteristic of the equipment. In order to deepen and widen the application of GPR, it is essential to improve the theory and data processing. Basing on the characteristics of wavelet transform and GPR data, the paper puts forward one method for data processing. After analyzing the basic theory of the method, the paper illustrates the effectiveness of the method with some actual measurements.

Keywords: Ground penetrating radar, Wavelet transform, multiscale, De-noise, Signal enhance