

基于MATLAB 小波分析的软地基加固 探地雷达检测处理方法

韦宏鹄^{1,2}, 杨顺安³, 章根德²

(1. 中国水利水电工程总公司信息中心, 北京 100029; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100086;

3. 中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 从小波分解出发, 利用多尺度分解对探地雷达波进行分析, 并基于MATLAB 的小波分析对深圳市公安局某工地强夯土石墩地基的检测结果进行处理, 提出了具体的处理方法。

关键词: 探地雷达; 小波变换; 去噪; 多尺度分解; 强夯土石墩

中图分类号: TU411.2

文献标识码: B

文章编号: 1000-7849(2002)02-0109-04

强夯土石墩复合地基是软地基常用的加固方法, 探地雷达是目前常用的加固质量检测手段之一。探地雷达进行工程质量检测的关键是对其探测图像进行符合实际的处理与解释, 一般的处理手段对复杂地基与复杂环境条件下探测的雷达图像, 难于获得理想的结果, 而小波去噪的开发利用则为其处理开辟了一条新的途径。

1 小波分解去噪原理

设函数 $\psi \in L^1 \cap L^2$, 且 $\int \psi(t) dt = 0$, 则按如下生成函数族

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad b \in \mathbb{R}, a \in \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}$$

为分析小波, 其中 a, b 分别为尺度参数及位移参数。对于信号 $f \in L^2$, 称

$$W_f(a, b) = \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt$$

为信号 f 的小波变换, 其中 $\overline{\psi}$ 是 ψ 的复共轭^[1]。

由于 $\psi \in L^1 \cap L^2$, 故存在关系式^[2]

$$W_f(a, b) = k a^{-\alpha}$$

即

$$\lg W_f(a, b) = \lg k + \alpha \lg a$$

其中: k 是一个与所用小波函数有关的常数; α 是 Lipschitz (李氏) 指数。由于噪声的李氏指数 $\alpha < 0$,

故随着尺度参数的增大, 小波变换的模值则逐渐减小, 这就是小波分解去噪的基本原理。

小波分解去噪的效果主要取决于对含噪信号的噪声估计方法以及所采用的小波函数。目前对噪声的估计方法主要有以下 4 种。^[3]

(1) 基于 Stein 的无偏风险估计原理的噪声估计 (Rigorsure), 这是一种自适应阈值估计。对一个给定的阈值 λ , 得到它的似然估计, 再将非似然 λ 最小化, 就得到了噪声估计量。

(2) 采用信号分解系数 $c_{i,j}$ 的长度来设定固定的阈值 (Sqtwo log)

$$\lambda = \sqrt{2 \times \lg[\text{length}(c_{i,j})]}$$

(3) 第一选项的试探偏差估计 (Heursure), 这是前两种阈值的综合, 是最优预测变量阈值选择, 称为 SURE 阈值估计选择法。

(4) 极大极小值阈值法 (Minimaxi), 这也是一种固定阈值法, 它产生一个最小均方差的极值。这种极值估计可以在一个给定的函数集中实现最大均方误差最小化。

从小波分解滤波法原理看, 除了第二种方法外, 其它噪声估计方法的基础均为最小偏差估计, 即若观测信号 $\{y_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 可以写成

$$y_i = x_i + n_i, i = 1, 2, \dots, N$$

其中: x_i 为有效信号; n_i 为噪声, 那么 x_i 的最小偏差估计为

$$R(\hat{x}, x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E(\hat{x}_i - x_i)^2$$

其中 \hat{x} 是要寻找的 x 的估计值。要找到 x 的估计值 \hat{x} 使得 R 最小, 并且根据不同尺度的分解系数进行估计。从这个意义上说, 小波分解去噪比镶边带通滤波法及加权滑动平均滤波法更理想。

图 1 所示为小波分解去噪与常规去噪方法(镶边带通滤波法及加权平均滤波法)模拟去噪效果的比较。可见, 小波分解去噪的效果比常规方法的效果好得多。最大的差别就是, 常规去噪方法的滤波结果是低频噪声残余很多, 而小波去噪则可将高、低频成分的噪声同时滤掉。

图 2 为 4 种噪声估计方法对探地雷达模拟信号的去噪结果。可见, 4 种方法基本上都能较好地压制噪声干扰, 但 Sqtwo log 法滤波结果所反射的波形与原始波形相比波形畸变大、波幅衰减快。Rigrsure 法相对于 Sqtwo log 法效果较好, 变换结果与原始波形相比较为一致, 但在曲线尾部出现了附加波, 其原因可能是计算方法所带来的边界效应。Heursure 及 Minimaxi 两种方法的效果基本一致, 处理结果波形与原始波形几乎一样, 波幅未受压制, 无边界效应,

尤其是 Minimaxi 法, 波形畸变最小。

根据前面分析的 4 种噪声估计的方法原理不难理解这 4 种方法的滤波效果。Sqtwo log 法是根据信号小波分解的系数长度来评价信号中的噪声, 很显然这种噪声估计方法没有可靠的数学依据。噪声干扰只与信号采样的周围环境以及采样仪器设备的稳定性有关, 而与采样长度无关。因此, 这种方法不适用于探地雷达数据的滤波处理。而 Minimaxi 法是根据信号本身的方差来估计噪声成分, 它可实现在一个给定的函数集中实现最大均方误差最小化。由此看, Minimaxi 法是最合理的阈值设置方法。

2 强夯土石墩探地雷达检测信号小波处理参数的选择

在探地雷达所接收的信号中除了几何反射波外, 还有散射波(包括相邻墩的散射波等)以及其它干扰波等。从能量大小看, 在相同时段内, 几何反射波应占主导地位, 而散射波及其它干扰波则相对较弱, 可将其视为噪声来处理。因此在小波去噪处理的噪声估计、阈值设置及滤波过程中, 这部分波得到较

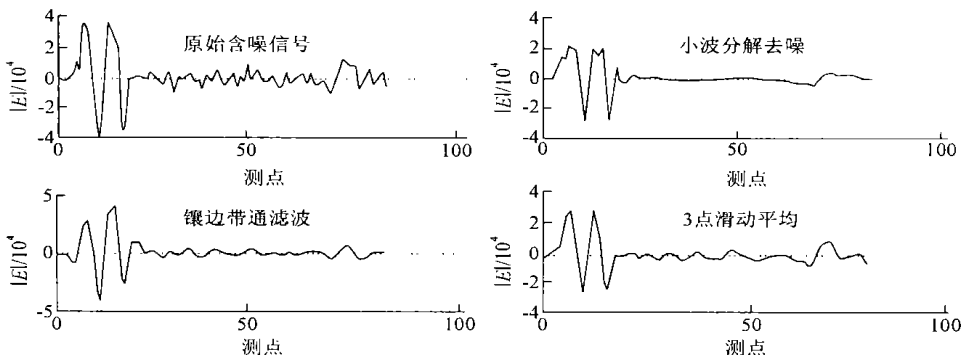


图 1 小波分解去噪与传统去噪方法的比较

Fig. 1 Comparison between wavelet denoising and traditional method

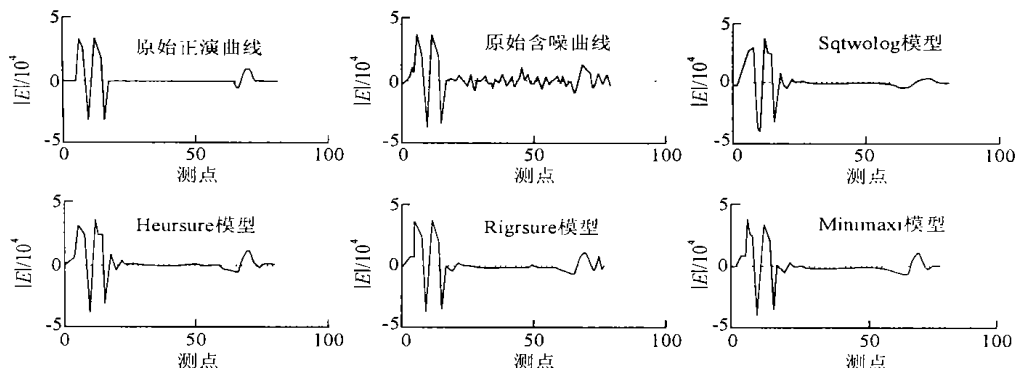


图 2 各种噪声估计方法的滤波效果比较

Fig. 2 Comparison of denoising by different methods of noise evaluation

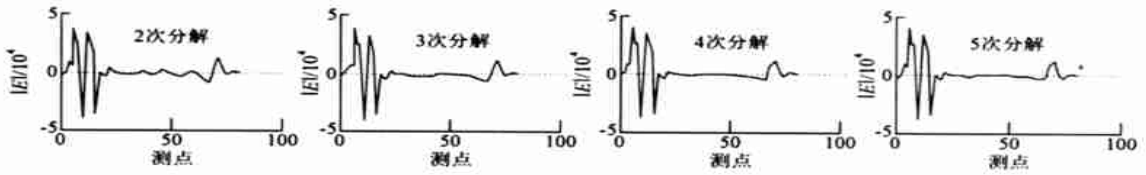


图 3 分解次数对滤波的影响

Fig. 3 Results of denoising at different scales

大的压制而突出集合反射波成分(见前面分析结果), 这就是采用小波去噪方法来处理强夯土石墩复合地基探地雷达检测结果的基础。在具体处理时还要考虑两个因素。

(1) 小波函数的选择 获取理想去噪效果的前提取决于选择合适的小波函数。由于探地雷达接收的信号为高频电磁波信号, 因此要求分析小波函数具有良好的时频局部化特性。根据 MATLAB 系统所提供的 4 种离散化正交小波(DB 小波, SYM 小波, COIF 小波及 BDR 小波)看, 在低阶情况下, DB

小波与 SYM 小波具有相同阶数的消失矩及支撑长度, 并且其支撑长度均小于其它两种小波的支撑长度。这说明, DB 小波与 SYM 小波比较适合用于探地雷达的去噪处理, 而二阶 DB 小波是 DB 小波族中支撑长度最小的小波, 故在实际处理时常采用二阶 DB 小波进行处理。

(2) 尺度参数的确定 因噪声具有一定的频带宽度, 故噪声应存在于对应一定范围的尺度参数的分解结果中, 故选择合适的尺度参数既是保证噪声得到完全去除的前提, 同时又使得处理的工作量尽

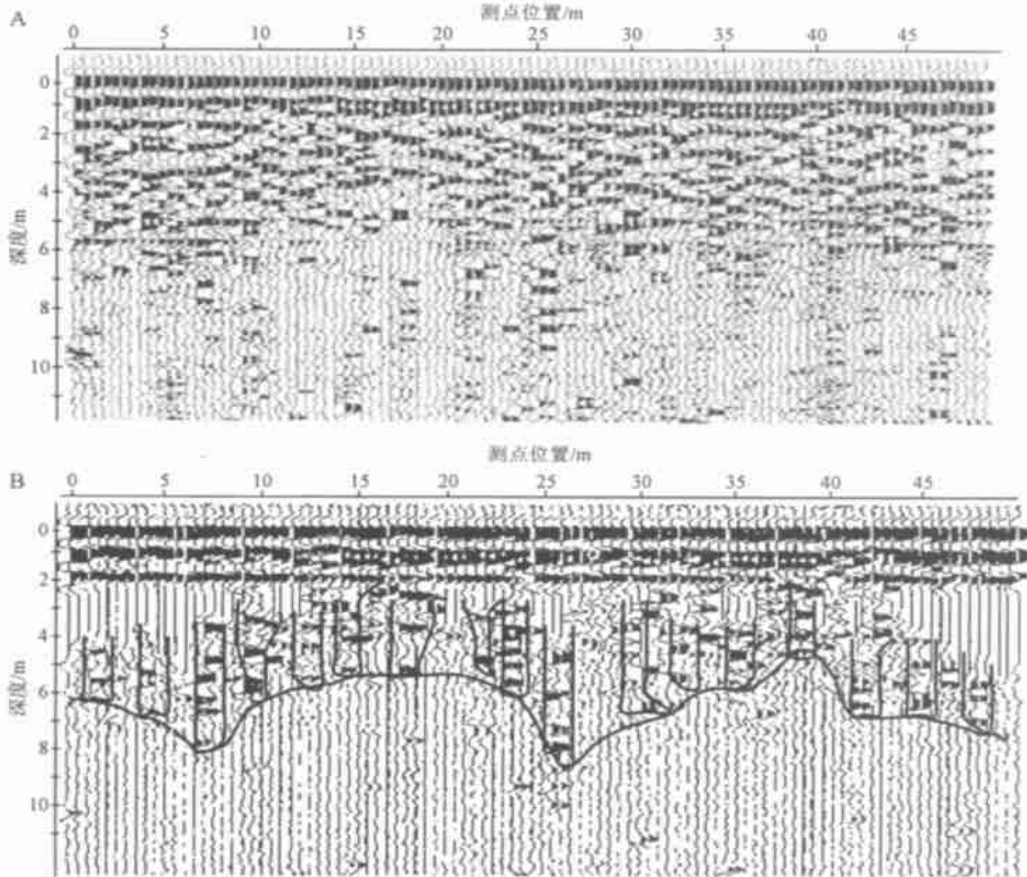


图 4 强夯土石墩剖面去噪处理前后比较

Fig. 4 Comparison of GPR original and wavelet denoising profiles

可能少。图3是多尺度小波分解去噪法对模拟的正演计算模型的滤波处理结果,分别对含噪信号进行了2,3,4及5尺度分解的去噪处理。从4种尺度的处理结果可见,2次分解的处理结果仍然存在噪声成分,从3次分解起噪声成分几乎不存在。随着分解层数的增大,去噪后波形基本没有变化,5次分解与3次分解的滤波结果一致。这说明,探地雷达高频信号中的噪声只存在于前三尺度(二进尺度)的分解结果中,故采用3次分解滤波基本上能消除信号中的噪声。

3 工程应用

以深圳市公安局某工地强夯土石墩地基的检测结果为例,说明该方法的应用效果^[3]。该工地的填土石层最厚为12m,一般为6.5m左右,块石含量大于50%,且分布不均匀。其底部一般是坡洪积砂质粘土,沟谷地段则有0~2m厚的砂质淤泥软土。为了使地基土层满足上部建筑的工程要求,设计采用间距为2.5m、夯击能量为3000kN·m的强夯土石墩复合地基进行加固处理,夯锤直径为1.2m,土石墩长度要穿透填土石层。土石墩是否形成,是否达到设计要求的长度是工程控制的关键,为此采用探地雷达扫描进行检测,以控制施工质量。

根据设计的墩体间距及墩径大小,雷达检测剖面点距为0.5m。由于墩体直径较小,为了突出单墩对观测结果的作用,减小邻近墩体的影响,野外采样时采用较小的天线距进行观测。由此可推断,在假设墩体直立的理想情况下,剖面中每5个点应出现一个墩体,墩间土应有两个检测点。可是,在原始观测结果图中,除了根据反射波强度可以大致确定强夯加固处理总体深度的变化外,很难分辨出单个墩体

的具体位置及墩体形状。

图4-B是小波去噪处理后的结果。可以看出,经过滤波处理后,剖面中噪声得到了很好地抑制,而反射波得到明显突出,相邻墩之间的反射波同相轴出现明显的错断现象。根据这些特征,可以很容易地识别墩体中心位置及墩形变化。可以看出,墩形规范,宽度基本上在2~3道,符合设计要求。同时,各墩的墩底位置也清晰可辨。图4-B提供了辨别地基加固处理效果的重要依据。根据该剖面的小波去噪处理结果,很容易地判断地基强夯处理效果的好坏。

强夯土石墩复合地基具有复杂的三维结构,根本无法直接从原始探地雷达检测剖面上判别地基加固效果,采用常规的处理方法(如镶边带通滤波法)的处理结果也不能有效地提高检测结果的分辨率。通过引入小波分解法,结合探地雷达数据特征,将多尺度小波分解去噪处理应用于强夯土石墩地基探地雷达检测剖面的处理中。实例的处理结果表明,该方法的滤波结果可大大提高检测剖面的分辨率,墩体位置、形状及长度均明显可辨。该方法的应用为软地基强夯处理效果的检测提供了有效的手段。

参考文献:

- [1] 秦前清,杨纵凯.实用小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,1995.14.
- [2] 杨福生.小波变换的工程分析与应用[M].北京:科学出版社,1999.153-154.
- [3] 胡昌华.基于MATLAB的系统分析与设计——小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,1999.223-224.
- [4] 韦宏鹤,高文,吕继东.地质雷达技术在软地基及复合地基检测中的应用[A].见:中国地质学会工程地质专业委员会.第五届全国工程地质大会文集[C].北京:地质出版社,1997.579-600.
- [5] 杨顺安,韦宏鹤,刘国卫.探地雷达在岩土工程中的应用[J].地质科技情报,1998,17(3):95-100.

GPR DATE PROCESSING BASED ON MATLAB WAVELET ANALYSIS FOR CONSOLIDATION OF SOFT FOUNDATIONS

WEI Hong-hu^{1,2}, YANG Shun-an³, ZHANG Gen-de²

(1. China Hydraulic & Hydropower Engineering Company, Beijing 100029, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China;

3. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: As a common consolidation method, compacted soil and rock piles are usually inspected with ground penetrating radar (GPR). Based on MATLAB wavelet analysis, the paper analyzes GPR wave by multiresolution of wavelet transformation, and puts forward an available processing method for a practical application in GPR profiles obtained from Shenzhen.

Key words: ground penetrating radar (GPR); wavelet transformation; denoising; multiscale resolution; compacted soil and rock pile