

基于小波变换的探地雷达弱信号增强

韦宏鹄^{1,2)} 邹长春³⁾

(1)中国科学院力学研究所,北京,100080; (2)北京华科软水电信息技术开发有限公司,北京,100761;
(3)北京大学地球与空间科学学院,北京,100871)

摘要 弱信号增强处理是探地雷达数据处理中的一个重要环节,而且是探地雷达数据处理难以解决的问题。弱信号在两方面使其不易于直接从探测剖面上识别出来:一是本身信号强度小且受到随机噪声的干扰;二是存在浅部强信号的明显反差,视图上难以识别。本文根据小波变换的特征提出一种信号增强方法,即多尺度小波变换信号增强法。从理论上分析该方法增强深部弱信号强度及提高弱信号可识别能力的基本原理,并通过实例应用说明方法的实用效果。

关键词 探地雷达 弱信号 波变换 多尺度系数 信号增强

Enhancement of GPR Weak Signal Based on Wavelet Transformation

WEI Honghu^{1,2)} ZOU Changchun³⁾

(1) *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080*; (2) *Beijing Huakeruan Company of Hydropower Information Technology Development, Ltd., Beijing, 100761*; (3) *School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing, 100871*)

Abstract Enhancement of weak signal is one of the important and very difficult steps in GPR data processing. Because of the intervention of random noise and the large contrast of the shallow strong reflection, weak signal is usually difficult to be identified clearly. Based on the characteristics of wavelet transformation of effective and noise signals, this paper presents a method for strengthening GPR weak signal-GPR weak signal enhancement based on multiscale wavelet transformation. Its basic principle and its capacity of enhancing deep weak signal and identifying the signal are theoretically analyzed in this paper. An example of actual application is given to demonstrate the effectiveness of the method.

Key words ground penetrating radar weak signal wavelet transformation multiscale coefficient signal enhancement

探地雷达是一种精度较高的浅层工程探测技术,在城市建筑工程检测中起着重要的作用。但由于浅层介质的强吸收性,以及浅层工程探测目标的尺寸较小。因此,探测结果目标体的反射信号往往很弱,很难直接从探测剖面中识别出来,甚至在经过常规的频谱滤波处理后也不能清楚地识别出来,大大影响了方法本身的探测效果,直接影响了探测方法的推广应用。因此,研究有效提高弱信号强度的方法是十分重要的。在过去的几年中,曾经出现过一些方法,其中一种常用的方法为时变常量增益法^①,但这种方法不能同时兼顾深浅等同增强的问

题。又有人援引反射地震的反Q滤波法到探地雷达的数据处理中来(Turner等,1994),以消除大地的影响,但反Q滤波的衰减因子的选取对噪声很敏感,且需要长时间剖面,因而应用于短时剖面的雷达探测时难以得到满意的效果。最近又有人提出采用复信号分析法提高弱信号强度的方法^②,即通过增强瞬时相位系数的方法来提高弱信号。由于相位系数与振幅无关,因此,可以同等程度地反映不同深度信号的变化。但这种“同等程度”的做法在提高信号强度的同时,也提高了随机噪声的幅值,达不到只提高信号强度,而又压缩随机噪声成分的效果。笔者

第一作者:韦宏鹄,男,1960年生,应用地球物理专业,从事岩石断裂的三维地质建模方法及地理信息系统(GIS)研究;E-mail:whh88@211.net。

① Sensors & Software Inc. pulseEKKO IV USER'S GUIDE Version 4.0.

② 肖兵. 1996. 探地雷达成像技术研究(博士学位论文).

根据小波变换的性质,提出了多尺度小波变换信号增强法^①,即利用有效信号在小波变换域中的系数相关性及随机噪声的不相关性特点,将多尺度的系数进行叠加处理,从而达到了既增强有效信号又可衰减随机噪声的目的。实际处理结果表明,该方法在提高弱信号强度、压制随机干扰方面是有效的。

1 多尺度小波变换 1 信号增强法的基本原理

对于含有随机噪声 $n(t)$ 的有效信号 $s(t)$,其合成信号 $f(t)$ 可写为

$$f(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

对 $f(t)$ 进行小波变换,变换结果可以写为

$$WT_f(j, k) = WT_s(j, k) + WT_n(j, k) \quad (2)$$

其中 j 为小波变换的尺度系数; k 为位移参数; $WT_s(j, k)$ 、 $WT_n(j, k)$ 及 $WT_f(j, k)$ 分别为有效信号 $s(t)$ 和随机噪声 $n(t)$ 及合成信号 $f(t)$ 的小波变换。当尺度系数依次取 $j=1, 2, \dots, J$ 时, J 为分解总次数。不同的 J 值,变换结果反映了信号在不同频率空间中的特征。 j 对应于低频变换, J 对应于高频变换。

将合成信号在不同尺度下的变换结果累积得^②

$$\prod_{j=1}^J WT_f(j, k) = \prod_{j=1}^J [WT_s(j, k) + WT_n(j, k)] \quad (3)$$

令 $S_{j, k} = WT_s(j, k)$, $N_{j, k} = WT_n(j, k)$, 则上式可展开为

$$\begin{aligned} \prod_{j=1}^J WT_f(j, k) &= (S_{1, k} + N_{1, k}) \times (S_{2, k} + N_{2, k}) \times \\ &\dots \times (S_{J, k} + N_{J, k}) \\ &= \prod_{j=1}^J S_{j, k} \times \prod_{j=1}^J \left(1 + \frac{N_{j, k}}{S_{j, k}}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

括号内第二项是由于噪声存在时的附加项。

若噪声 $n(t)$ 的方差为 σ^2 , 则噪声小波变换的数学期望可表示为^②

$$E(|WT_{sn}(t)|^2) = \frac{\|\psi(t)\|^2 \sigma^2}{s} \quad (5)$$

其中 $\|\psi(t)\|$ 表示小波 $\psi(t)$ 的 $L^2(R)$ 的范数; s 为尺度参数。式(5)说明,噪声在小波算子作用下,

其模的平均值以 $1/\sqrt{s}$ 的速度衰减。又根据小波变换可知,若信号在某一点的 Lipschitz 指数为 a , 则该点的小波变换极大模为(杨福生, 1999)

$$|WT_f(a, b)| \leq Ka^a \quad (6)$$

其中 a 为尺度系数; b 为位移参数; K 为与所选小波类型及信号大小有关的量。将式(6)带入式(4), 并取尺度系数 a 为二进尺度,即 $a=2^j$, $j=1, 2, 3, \dots$ 。假设有效信号及随机噪声的 Lipschitz 指数分别为 a_1, a_2 , 其相应的 K 值分别为 K_1, K_2 , 并且 $a_1 \geq 0, a_2 < 0$ (杨福生, 1999)。另式(6)等号成立, 则式(4)括号中第二项为

$$\frac{N_{j, k}}{S_{j, k}} = \left| \frac{K_{2j} 2^{ja_2}}{K_{1j} 2^{ja_1}} \right| = \left| \frac{K_{2j}}{K_{1j}} \right| 2^{j(a_2 - a_1)} \quad (7)$$

考虑最差的情况,假设噪声强度与有效信号强度近似相等,即 $|K_{2j}| \approx |K_{1j}|$, 于是式(4)最后变成

$$\prod_{j=1}^J WT_f(j, k) = \prod_{j=1}^J S_{j, k} \times \prod_{j=1}^J (1 + 2^{j(a_2 - a_1)}) \quad (8)$$

由于 $a_2 - a_1 < 0$, 故括号中第二项随着尺度系数的增大而减小,相反 $S_{j, k}$ 则随尺度系数增大而增大,即随着尺度系数的增大,在合成信号的小波变换结果中,噪声的影响越小,而有效信号的影响则越大。由此可见,通过多尺度小波变换的合成方法,可以达到提高有效信号、压制随机噪声的目的,这就是多尺度小波变换信号增强法的基本原理。

2 尺度系数的选择

尺度系数的选择关系到最终的处理效果及效率。

根据(7)式,并在假设 $|K_{2j}| \approx |K_{1j}|$ 的条件下,可以得到有效信号系数占总信号系数的比例为

$$\prod_{j=1}^J \frac{S_{j, k}}{S_{j, k} + N_{j, k}} = \prod_{j=1}^J \left[1 - \frac{2^{j(a_2 - a_1)}}{1 + 2^{j(a_2 - a_1)}} \right] \quad (9)$$

表 1 为(9)式在尺度系数 1~8 的计算结果, Lipschitz 指数 a_1 及 a_2 分别取为 0.5 及 -0.5 (考虑最差情况)。由计算结果可以看出,假设原始信号的信噪比接近于 1:1, 经过 1 次变换后,合成信号中有效信号所占的比例只有 67%,而当尺度系数为 5 时,有效信号的比例已达 97%。说明此时分解系数

① 韦宏鹤, 2000. 探地雷达小波分析方法研究(博士学位论文).

② 肖兵, 1996. 探地雷达成像技术研究(博士学位论文).

中基本上由有效信号组成,噪声成分可以忽略不计。可见,变换次数越多,有效信号强度的比例越大,噪声成分衰减越快。

表1 多尺度小波变换有效信号占总信号的比例与尺度系数(J)的关系

j	1	2	3	4	5	6	7	8
比例	67	80	89	94	97	98	99.2	99.6

由表1的计算结果可得,当变换次数太少,对于深部弱信号来说,由于信号本身与噪声在强度上相差不大,因此变换结果有效信号与噪声强度的差别不明显,这时弱信号识别结果的可信度不高。从这点来说,应该尽量增大尺度系数进行变换,以提高对深部弱信号识别的可靠性。

另一方面,并非尺度系数越大越好。当变换次数过大时,由于浅部信号强度一般远大于深部信号,故随着尺度系数的增大,浅部信号增大速度比深部弱信号快。因此,若 J 过大,容易使信号的深浅反射波强度差异悬殊,失去道均衡的特征,使深部弱信号在视图上容易被压制,不利于识别而造成信号丢失。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,保证深部有效信号在视图上能清楚地识别。

模拟探地雷达信号计算了具有4个反射界面的一维模型的反射波,由地表向下界面的反射系数分别为 -0.198 、 0.127 、 -0.127 及 0.197 ,对应的层厚分别为 2.5 m、 1.9 m、 1.5 m及 2.5 m。对反射信号分别采用尺度系数为16的6次变换,对应各尺度系数的变换结果见图1所示。

从图1可见,当尺度参数 $j=1$ 时,深部有效信号的变换结果幅值很小。随着尺度参数的增大,深部有效信号的强度也随着增大,并且深浅信号的强度差值逐渐减小。约在 $j=3$ 时达到最佳平衡。随着尺度系数的继续增大,深浅信号强度的差值逐渐增大。由此可见,尺度参数取得过大,不但使处理工作量加大,同时也会引起深浅有效信号的幅值平衡受到影响,不利于视图上的识别。综合表1及图1的计算结果,并考虑实际有效信号与随机噪声的大小,最佳尺度参数可取为4或5即可。

3 应用实例

厦门市某花园是一座高层建筑,地基残积土层厚度很大(大于 50 m),为此基础设计采用打入桩。桩基施工前的勘察并未发现地基有任何异常,可在

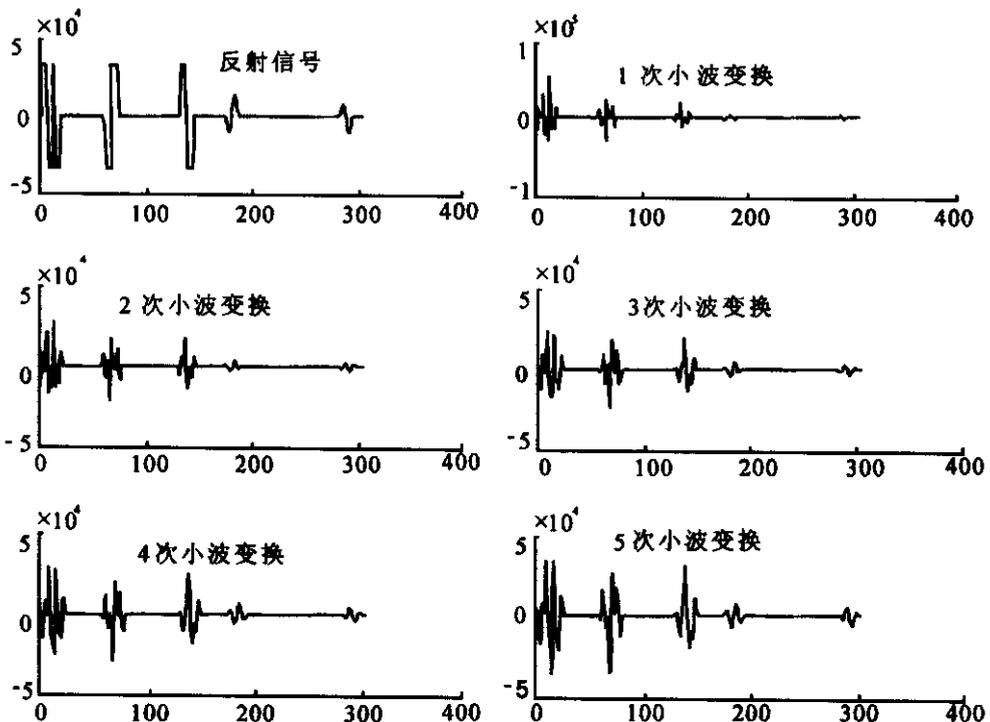


图1 小波变换与尺度系数之间的关系

具体桩基打入过程中多个桩位都碰到了残积土层内未风化孤石障碍物。个别桩位上的钻探结果表明,在要求桩基施工深度范围内的残积土层中多次出现孤石。施工场地地层条件的复杂性远远超出了初期设计的预料,使施工无法正常进行。

为了掌握施工桩点位置地基土层内孤石的分布情况,采用探地雷达对施工场地进行扫描观测。图2-a为其中一个剖面的观测结果经噪声滤波处理后的结果。经过噪声滤波处理后,剖面信号的分辨率得到了提高,可以看到在上部地层中存在若干个局部反射异常,说明该层中孤石分布比较多。尽管能识别到孤石的存在,但由于反射波强度依然较弱,仍不能由该图清楚地划分孤石的剖面分布。同时,由

于浅部反射波强度比深部信号大得多,信号深浅均衡性很差,故由图上无法看到下部地层中有无异常存在。

为此,对该剖面的滤波结果进行信号增强处理,结果见图2-b所示。尺度参数 j 取为4。经过信号增强处理后,地层中的异常反射波强度相对浅部信号得到了明显加强,异常范围清晰可辨。此外,经过信号增强处理后,使信号深浅均衡性得到了明显的改善,可以识别下部地层中还有弱小的反射波存在,说明下部地层中也存在局部不均匀体异常。根据处理结果所划分的孤石体的剖面分布,经钻探结果验证后说明,雷达探测结果所揭示的孤石分布与钻探结果基本吻合。

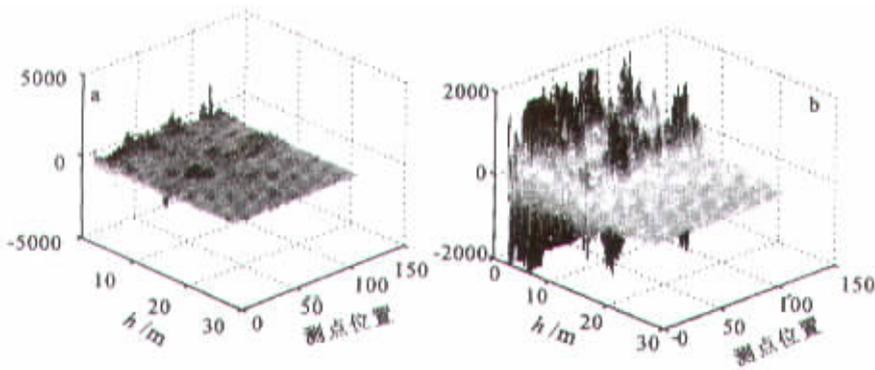


图2 孤石探测剖面信号增强处理结果

Fig.2 Enhanced result of weak signal obtained on lonestone profile

4 结论

根据有效信号与随机噪声的小波变换系数随尺度的变化特征,提出探地雷达多尺度小波变换信号增强方法。研究表明,多尺度小波分解信号增强法在提高有效信号强度的同时,又明显压制了噪声成分的影响,这种双重作用是其他传统的方法所无法比拟的,为拓宽探地雷达信号处理技术提供了新的方法手段。其次,该方法在适当的尺度系数上

能最大程度地提高深浅信号的均衡性,使深部在确保浅部信号不失真的情况下也能从剖面上识别出来,相应地提高了方法的探测深度。此外,方法实施简便、快速,可用于对实时数据的处理。

参考文献

- 杨福生. 1999. 小波变换的工程分析与应用. 北京: 科学出版社.
 Greg Turner, Anthony F. 1994. Siggins, constant Q attenuation of sub-surface radar pulse. *Geophysics* 59(8):1192~1120.