

探地雷达剖面的相干加强处理

刘秀娟, 邓世坤, 薛桂霞

(中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 简述了用相干分析法对探地雷达反射剖面进行处理的方法原理, 并结合雷达剖面的特征编制了雷达记录道相干加强处理的实用程序。对实测雷达剖面进行处理的结果表明: 雷达记录道相干加强处理能有效改善来自同一界面的雷达反射波同相轴的连续性, 有利于反射界面的追踪, 同时不会引起同相轴的形态发生畸变。

关键词: 探地雷达; 图像处理; 相干分析法; 相干加强

中图分类号: P631.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2004)01-0073-03

探地雷达目前被广泛应用于考古、水利、浅层地下构造探测、建筑工程质量检测等方面, 但因为受到来自空中的和地下的随机或规则的干扰, 加上地下介质对电磁波不同程度的吸收以及地下介质本身的不均匀性等因素, 使得雷达图像变得复杂而难以解释, 所以要对它进行适当的处理。

基于电磁波和弹性波在介质中传播的相似性^[1,2], 对探地雷达进行正演模拟、反演及数据处理的研究很多。如偏移可以使反射波归位、绕射波收敛^[3], 分形和小波变换可用来去噪及提高信噪比^[4,5], 道平均能增强反射波同相轴的连续性^[6]。这些方法的应用有效地提高了雷达剖面的信噪比与分辨率。

相干加强法利用来自同一界面的反射波之间具有相干性而对剖面进行加强处理, 在地震资料处理中是一种常用的有效的方法, 但目前未见将其用于处理探地雷达剖面的有关文献发表。作者尝试进行此项研究。实际应用证明对雷达记录道进行相干加强处理能有效改善来自同一界面的雷达反射波同相轴的连续性, 有利于反射界面的追踪, 同时不会引起同相轴的形态发生畸变。因此该方法有效地解决了雷达数据处理中常用的能加强同相轴连续性的道平均处理容易引起同相轴的形态发生畸变的问题^[7]。

1 雷达记录道相关加强的原理

互相关运算是时间域信号的基本运算之一。若已知 2 个离散的时间函数 x_k 和 y_k , 以相等的采样间

隔离散取样, 互相关函数由下式定义

$$\phi_{xy}(\tau) = \sum_{k=0}^N x_k y_{k+\tau},$$

式中, $\tau = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 是 y_k 相对 x_k (以采样间隔为单位) 的时移; k 表示样点序列。互相关函数值是两组数据之间相似性的一种度量, 因此常用互相关值来衡量 2 个信号的相似性。2 个信号彼此相似称之为相干, 不相似称之为不相干。

相干加强方法主要是先求模型道波形, 再将记录道与模型道进行互相关运算求出权系数, 然后对记录道加权处理。先以一道为例说明该方法。

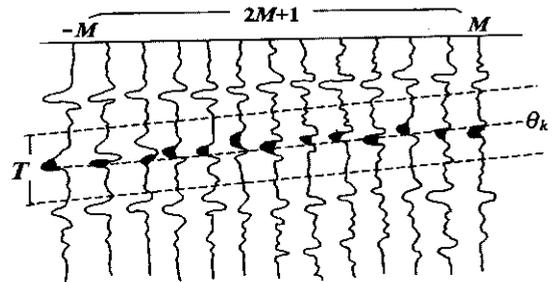


图 1 倾角扫描示意

首先求模型道波形。如图 1 所示, 设以第 i 道为中心, 以某时刻 τ 的样点为中点的模型道波形可表示为

$$M_i(\tau, \theta) = \sum_{j=i-M}^{i+M} f_j[\tau - (j-i)\theta],$$

式中 τ 为记录道样点序号, 是时窗 T 的中心; $\theta = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm k$, 是同相轴倾角; j 为以模型道为中心的相邻道序号; $2M+1$ 为组成模型道的道数。当其

收稿日期: 2003-06-10

基金项目: 国土资源部工程地球物理重点开放实验室资助项目; 湖北省自然科学基金资助项目 (2001-ABB010)

中某个倾角与时间剖面上的 θ 一致时,模型道波形 $M_i(\tau, \theta)$ 与第 i 道波形 $f_i(\tau)$ 最相似。

其次求相干加强的权系数。当用不同倾角的模型道 $M_i(\tau, \theta)$ 与 $f_i(\tau)$ 在时窗长度范围内进行互相关时,可得出 $(2k + 1)$ 个互相关值,即

$$\phi(\tau, \theta) = \sum_{t'=-T/2}^{T/2} f_i(\tau + t')M_i(\tau, \theta),$$

式中 t' 是 $f_i(\tau)$ 相对于 $M_i(\tau, \theta)$ 的时移, $2k + 1$ 个 $\phi(\tau, \theta)$ 反映了记录道 f_i 在 τ 时刻与相邻道之间的相干性,从中选出最大值记作 Φ ,则 Φ 反映此时 f_i 与相邻道有最好的相干性。对于第 i 道记录,按样点顺序依次进行上述计算,最后得到 1 条最佳相关曲线 $\Phi(\tau)$,然后从中选出最大值 Φ_{\max} ,即可通过 $w_i(\tau) = \Phi(\tau) / \Phi_{\max}$ 得到相干加强的权系数 $w_i(\tau)$,最后得到相干加强后的输出,即

$$\bar{f}_i(\tau) = w_i(\tau)f_i(\tau) \times c,$$

式中 c 称为相干加强系数,是个常数,由用户根据实测资料确定。对剖面上所有记录道作相干加强处理,使剖面上有相干同相轴的地段得到进一步的加强,没相干同相轴之处更加削弱。

为了保证处理效果,在做相干加强之前首先要利用现有的雷达处理软件对雷达剖面进行预处理,处理流程见图 2。

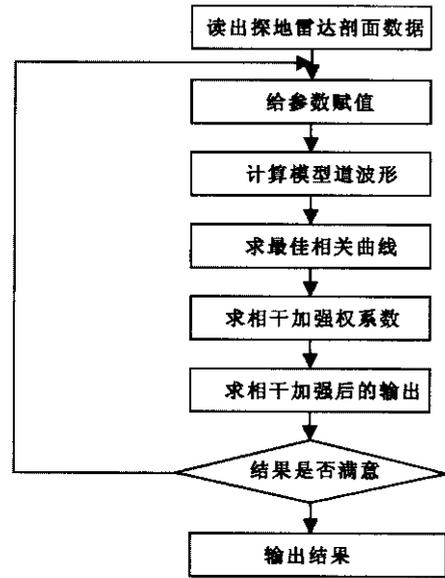


图 2 相干加强处理流程

2 实例分析

在咸宁市城区某塌陷地段进行成因探测,目的是为了了解土层厚度、土层内部结构以及基岩中溶洞和裂隙的发育情况。该测区地表为粘性土,下部为砂砾石层,其厚度在横向上分布不均,底部基岩为石灰岩。原始雷达记录的采集参数为:天线的中心

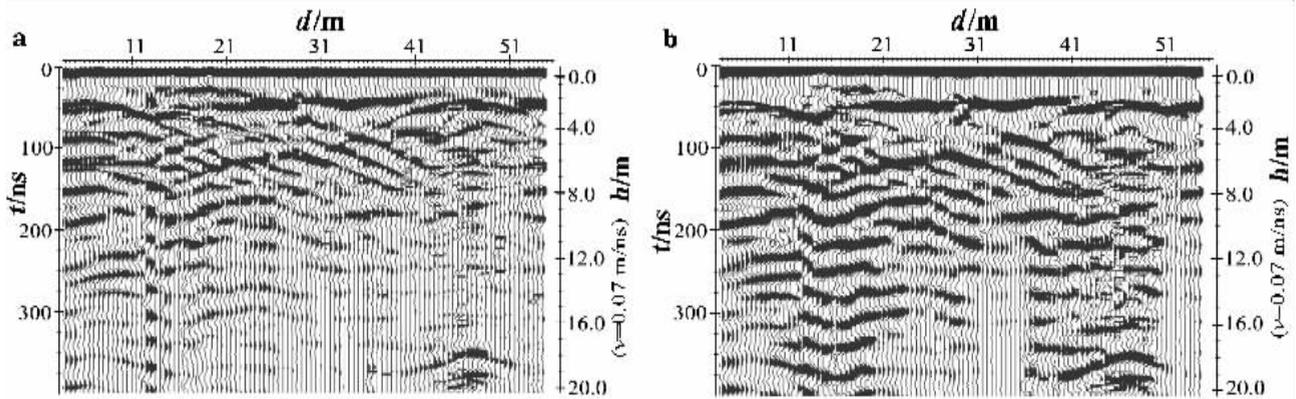


图 3 相干加强处理前 (a) 后 (b) 的雷达图像对比

频率 50 MHz, 天线距 2 m, 测点距 0.5 m, 垂直叠加次数 64 次/道。图 3 是该地区探地雷达的原始图像与经相干加强处理后的图像对比。

钻探资料揭示该区基岩面的埋深在 8 ~ 10 m 范围。从图 3a 所示的雷达剖面上可以看出:该区的第四系覆盖层的表层粘土层的厚度约为 2 m, 而整个第四系层的厚度约为 9.0 m。由于存在于表层粘性土层底部与基岩层顶面之间的砂砾石层结构不均匀,局部位置受到扰动,因而其内部反射波同相轴较

零乱,且多呈弧形。来自第四系介质层内的弧形反射同相轴反映了该层介质内的扰动现象;而来自基岩深部的弧形反射同相轴反映了基岩中存在溶洞。由于第四系介质层的结构和组成成分在横向上的不均匀性,加上基岩界面的起伏性,导致基岩界面的反射波同相轴连续性差,难以追踪,甚至要识别其存在都比较困难。另外,在剖面的深部也有一些低幅度的同相轴存在,这些同相轴可能反映了基岩内部的层理结构。

从图 3b 上可看出,来自基岩顶面的反射波同相轴的连续性得到明显改善,其幅度明显增强了,而且经处理后同相轴的形态仍保持不变;处理以后的结果能清晰地反映出该剖面所在位置基岩面的埋深在 9~10 m。在水平位置 41~50 m 段、埋深 17.5 m 以下的弧形同相轴与图 3a 中的记录相比得到了明显加强,该弧形同相轴为基岩中存在溶洞的反映;在该剖面的水平位置 11~21 m、埋深 10 m 以下,有一组近于平行的同相轴,与图 3a 中相应的同相轴相比,其连续性得到了改善,波形幅度得到了加强。该组同相轴反映了该位置处基岩中裂隙发育,构成该处地下水与地表水联系的通道;由于地表水与地下水之间的水力联系,在水动力的作用下,第四系介质被水流携带走而在土层中留下空隙,因而在第四系地层中形成扰动。图 3b 还显示在该剖面的水平位置 11~21 m、埋深 3~6 m 处的第四系地层中,有明显的扰动异常存在;同样,在该剖面的 43~49 m 位置的第四系介质层中也同样存在扰动。这种土层介质中的扰动的产生和发展在一定程度上与附近一家工厂抽取地下水有关,而且这一类土层中的扰动最终会发展成地面塌陷。

另外,经相干加强处理后的雷达剖面中,第四系介质层中粘土与砂砾层之间的界面的反射同相轴的连续性也得到了明显改善。

3 结论

从实测雷达剖面的相干加强处理可以看出相关加强对改善雷达剖面上来自同一反射界面的反射波同相轴的连续性、增强反射波信号的幅度具有良好的效果。

与道平均处理(即一维空间滤波)相比,雷达剖面的相干加强处理不仅能有效地改善反射波同相轴的连续性,而且还能较好地保持来自同一界面的反射波同相轴的形态。

参考文献:

- [1] Szaraniec E. Fundamental functions for horizontally stratified earth [J]. *Geophys. Prosp.* 1976, 24: 528-548.
- [2] Ursin B. Review of elastic and electromagnetic wave propagation in horizontally layered media [J]. *Geophysics*, 1983, 48: 1063-1081.
- [3] 邓世坤. 克希霍夫积分偏移法在探地雷达图像处理中的应用 [J]. *地球科学*, 1993, 18(3): 303-308.
- [4] 韩湘君, 赵永辉, 吴建生, 等. 分形技术在探地雷达资料处理解释中的应用 [J]. *长春科技大学学报*, 1999, 30(4): 400-402.
- [5] 肖兵, 汤井田, 何继善. 探地雷达信号奇异性检测及去噪 [J]. *中南工业大学学报(自然科学版)*, 1999, 23(1): 5-7.
- [6] 杨德山. 地质雷达图的点平均和道平均 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1993, 18(3): 311-314.
- [7] 宋维琪, 刘江华. 地震多矢量属性相干数据体计算及应用 [J]. *物探与化探*, 2003, 27(2): 128-130.

THE COHERENT ENHANCEMENT PROCESSING OF GROUND PENETRATING RADAR PROFILE

LIU Xiu-juan, DENG Shi-kuen, XUE Gui-xia
(China University of Geoscience, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, the principle of processing the GPR profile with coherent analysis was briefly described, and the program of coherent enhancement processing was composed on the basis of characteristics of the GPR profile. The processing of the field GPR profile in the limestone region with this program demonstrates that coherent enhancement processing of the GPR profile can effectively improve the continuation of the events reflected from the same interface and contribute to tracing the reflecting interface without the distortion of the event form.

Key words: ground penetrating radar; image processing; coherent analysis; coherent enhancement

作者简介: 刘秀娟(1972-), 女, 中国地质大学(武汉)地球探测与信息技术专业硕士研究生, 主要从事物探数据处理方面的研究工作。