

钻孔雷达数据处理技术及分析^①

张理轻^{1,2}, 马 晔^{1,2}, 杨 宇^{1,2}

(1.交通运输部公路科学研究所,北京 100088; 2.桥梁结构安全技术国家工程实验室,北京 100088)

摘要: 钻孔雷达已在服役桥梁桩基检测中得到应用,为提高钻孔雷达探测结果的解释精度,介绍不同数据处理技术的原理,通过实例对比分析处理前后的雷达剖面图像效果,总结数据处理的流程,比选出合适的处理参数,为钻孔雷达在服役桥梁桩基检测中的应用提供参考。

关键词: 钻孔雷达; 数据处理; 滤波; 雷达剖面

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-1107-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.1107

Study on Data Processing Techniques of Borehole Radar

ZHANG Li-qing^{1,2}, MA Ye^{1,2}, YANG Yu^{1,2}

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2. National Engineering Laboratory for Safety Technology of Bridge Structure, Beijing 100088, China)

Abstract: Borehole radar has been applied to test exiting bridge pile foundations in order to improve the interpretation accuracy of borehole radar detection results. The principles of various data processing methods are introduced in this paper. The radar profile effect is compared through example analysis before and after treatment, and the process of data processing is summarized. The appropriate processing parameter is then selected by comparison. Therefore, a reference for borehole radar data processing for detection of exiting bridge piles is provided.

Key words: borehole radar; data processing; filtering; radar profile

0 引言

探地雷达是以地下不同介质的电磁特性差异为前提的地球物理探测技术,通过发射天线以脉冲波形式发送高频电磁波。电磁波在地下介质传播过程中,遇到存在电磁特性差异的界面时便发生反射,返回的电磁波被接收后,通过对电磁波信号进行处理,形成雷达时间剖面图,然后根据图中信号强度、波形、双程走时等参数分析探测目标体的空间位置、电性状况与几何形态等。由于探地雷达探测技术的高效、无损、便捷、成本低以及探测结果的直观性,该技术在环境监测、地质勘查、考古调查、隧道检测、路基检测、极地研究等方面得到了广泛运用^[1-4]。

按照工作方式的不同,探地雷达分为地面探地雷达和钻孔雷达。钻孔雷达通过孔中天线在探孔中深入地下进行探测,更接近地下目标体,具有更大的探测范围。马晔等^[5]利用该技术开展了在役桥梁桩基的检测试验。

钻孔雷达探测过程中,由于仪器系统与周围环境各种噪声影响,以及电磁波传播过程中的信号频散、衰减等,使得采

集数据中的有效信号受到各种干扰,直接形成的雷达剖面图由于各种干扰信号的影响,必须通过有效的数据处理技术,压制各种噪声,增强有效信号,提高资料信噪比,获得高分辨率的雷达图像剖面,并从数据中提取速度、振幅、频率、相位等特征信息,帮助技术人员对雷达图像剖面进行解释。

由于工作原理一致,可将地面探地雷达的数据处理方法应用到钻孔雷达数据处理中,但各种数据处理方法有不同的作用,并且有其局限性。要获得分辨率高的雷达图像剖面,提高数据处理的速度,需掌握各数据处理方法的作用和原理。

本文详细介绍了钻孔雷达的各种数据处理技术,总结了数据处理的流程和步骤,通过实例对比分析了各种数据处理技术的作用和效果。

1 数据处理技术

1.1 数据编辑

现场探测时,由于仪器系统不稳定,外部环境噪声,探测速度不一致,影响采集数据的稳定性,经常出现数据丢失、畸

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:交通运输部建设科技项目(2011-318-223-1390);交通运输部建设科技项目(2007-318-223-30);交通运输部行业重点实验室应用基础研究计划项目(2012-319-223-020)

作者简介:张理轻(1985-),男,硕士,助理研究员,主要从事桥梁基础工程试验检测研究。E-mail:34320409@qq.com

变或被破坏。数据处理时,根据探测地质情况、周围环境等,需首先对记录的数据进行编辑:

(1) 测线方向一致化

野外探测时,为了方便采集数据,不同测线的探测方向正好相反,导致同一目标体在不同测线形成的雷达剖面中位置的不一致,为便于雷达剖面图的对比分析,需要将各测线的数据一致化。

(2) 数据合并

同一测线采集数据时,有时需要通过多次不连续的采集才能完成,在数据处理时,先将各数据进行合并。

(3) 插入或删除道

受仪器系统的不稳定、外部环境噪声、天线移动的不规范等影响,部分道的数据明显畸变、重复或丢失,为提高雷达剖面的可视效果,对相应的道进行移除、插入等编辑处理。

(4) 创建等距离道

在等间距数据采集时,由于天线移动速度的不均匀,采集得到的各道数据与实际位置存在差异,尤其是测线很长时,这种现象不可避免。处理的方法是根据现场采集时距离的标注记号,对整个剖面的道数据进行等间距分布处理。

1.2 去直流漂移

原始采集数据中一般含有直流偏移成分,子波相对基准线会出现全为正或全是负或正负不对称的情况,即子波的振幅零点偏离基准线,去直流漂移的作用就是消除信号中的直流成分或直流偏移以及随后产生的延迟振荡,使得子波的振幅零点与基准线重合,处理前后对比图见图 1 所示。

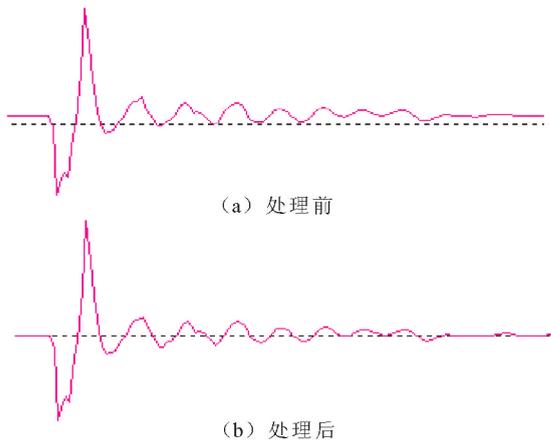


图 1 去直流漂移处理前后对比图

Fig.1 The comparison before and after using the Subtract-DC-shift method

去直流漂移的处理方法,是对所有道数据求和计算平均值,然后将每一道数据减去计算得到的平均值,公式如下:

$$x'_i(t) = x_i(t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t) \quad (1)$$

式中: N 为总道数。

若将 N 选取原始数据的部分道数,则成为了消除雷达剖面水平干扰信号的方法,公式如下:

$$x'_i(t) = x_i(t) - \frac{1}{N_2 - N_1 + 1} \sum_{i=N_1}^{N_2} x_i(t) \quad (2)$$

式中: N_1 为水平干扰信号区域的起始道数; N_2 为水平干扰信号区域的终止道数。

1.3 零点校正

钻孔雷达记录信号形成的雷达剖面图像,会依据反射信号的接收时间计算探测距离,因此反射信号的接收时间是否精确决定探测距离的准确性。为确定反射时间,首先要确定反射信号接收时间的起始点。根据钻孔雷达工作原理,时间起点为发射信号的触发点,但是由于仪器系统的不稳定、信号传输线路的不同以及天线与岩土介质之间空隙的变化,都会影响最初到达的直达波(通常视为时间零点)在记录时间零点的偏移。零点校正的作用就是将雷达剖面中所有道数据的起始点位置移到时间零点,确保目标体距离的准确识别。

时间零点确定的一般准则是,记录信号中第一个直达波振幅较大的波峰或波谷,如图 1 中所示的记录信号,时间零点定在第一个波谷处。

1.4 增益

雷达波信号在岩土介质传播过程中的衰减导致信号的幅度在时窗范围内逐渐变小,后期的信号通常很弱。为增强雷达剖面图的可视效果,需要采用增益对信号进行放大。增益方法有多种,在处理效果上虽然有不同,但都是对各道数据在时窗内进行放大,常用的增益方法如下:

(1) AGC 增益

选定时窗长度对样点的振幅进行放大,首先计算每一道的整个时窗范围的平均振幅,然后按比例对每个样点振幅值进行放大,在选定时窗长度内使平均振幅相同。时窗长度决定放大效果,小时窗长度使各点振幅较均衡且放大效果好,时窗长度只包含一个样点时,意味着每个样点的振幅都相同;大时窗长度各样点的振幅变化小,时窗长度包含整个时窗时表示没有放大。

(2) 能量衰减

根据平均振幅衰减曲线对样点振幅进行放大。平均振幅衰减曲线从雷达剖面图中所有的道数据计算得出,然后对每个样点的振幅值根据衰减曲线进行校正。

能量衰减增益处理保持了雷达信号的相对幅度信息。而 AGC 增益使得雷达信号幅度均衡化,降低了原来有效反射强信号与弱信号的对比度。

(3) 自定义增益函数

自定义增益函数的参数对雷达数据进行处理,一般有线性增益或指数增益。

1.5 一维滤波

电磁波波动是时间(t)和空间(x)的函数,滤波可分域滤波和空域滤波两类。时域滤波针对的是每道按照时间变化的数据;空域滤波指的是沿测线距离的多道数据。

一维滤波的作用是利用有效波与干扰信号的频谱差异,通过滤波去除干扰信号,提高雷达剖面的信噪比。典型的一

维时域滤波方式包括以下几种:

(1) 低通滤波

通过设置一高频截止频率, 让低于该高频截止频率的雷达信号通过, 去除高频噪声。

(2) 高通滤波

通过设置一低频截止频率, 让高于该低频截止频率的雷达信号通过, 去除低频信号和信号漂移。

(3) 带通滤波

组合了低通滤波和高通滤波, 让位于低频截止频率与高频截止频率这一频带宽度范围内的雷达信号通过。

在进行一维滤波处理时, 滤波参数应根据目标体信号所在的频率范围进行设置, 另外一个合适的设置经验是, 根据天线的中心频率 f_c , 以中心频率为中点选取 1.5 倍 f_c 的频带宽度。比如中心频率为 400 MHz 的天线, 频率宽度设置在 100~700 MHz 之间。

(4) 均值滤波

在选定时窗内, 将各样点振幅值用该时窗内各样点振幅均值代替, 进行数据平滑。该滤波方法能较好去除数据中极强的高频噪声, 效果类似于低通滤波, 数据处理比低通滤波快, 但效果要差一些。

(5) 中值滤波

选定时窗内的样点振幅值用该时窗内各样点振幅中值代替, 该滤波方法的样点数量应为奇数, 能较好去除数据中的明显尖峰, 但也会消除有效数据, 抑制信号。窗口长度一般为 3 或 5。

1.6 二维滤波

单独的按时间或空间滤波都存在不足, 如当有效波与干扰波的频谱成分接近, 或相同测线长度的道数相近时, 无法采用一维滤波去除干扰波, 则同时在时域和空域 ($t-x$) 对信号进行处理, 可达到类似一维滤波的效果。常用的二维滤波方式包括:

(1) $t-x$ 平均

采用选定雷达剖面在时间和空间的均值代替雷达数据, 有利于去除整体噪声。

(2) $t-x$ 中值

采用选定雷达剖面在时间和空间的中值代替雷达数据, 有利于去除整体噪声和尖峰。

(3) 频率波数(FK)滤波

组合了时域和空域带通滤波的高级二维滤波技术, 雷达数据被转换到频率—波数域, 采用组合的频域—空间谱域带通滤波对雷达数据进行处理。该滤波方法的主要优点在于能够抑制特定倾斜方向的散射回波。

(4) 抽取平均道

对选取的各道进行抽取平均, 然后用该均值代替所选时间范围的和所选道的雷达数据, 该滤波的作用是抑制水平一致的能量, 尤其适合于去除最初到达的直达波形成的水平信号。

抽取平均道的算法是将探测所得的数据求和, 然后取平

均值

$$\omega'(t) = \frac{1}{N_2 - N_1 + 1} \sum_{i=N_1}^{N_2} \omega_i(t) \quad (3)$$

式中: $\omega_i(t)$ 分别代表处理前各道回波; N_1 、 N_2 表示所选道的范围。

抽取平均道数的选取影响处理效果, 道数越大, 对水平信号的抑制越弱。

(5) 滑动平均

对选取的各道进行滑动平均, 然后用该均值代替所选时间范围的和所选道的雷达数据, 该滤波的作用是抑制毛刺噪声, 使得图像平滑。

它的算法是对选定的道数进行滑动平均值, 见式(4)。

$$\omega'_l(t) = \sum_{k=1}^M h(k) \omega_{l+k-1}(t) \quad (4)$$

式中: $\omega'_l(t)$ 和 $\omega_l(t)$ 分别代表处理前第 l 道回波; h 表示平均处理的函数; M 表示所选的道数。

实际处理时, 滑动平均的道数一般选择 3 道。

1.7 反褶积

反褶积处理实际上是滤波的一种逆过程。理想钻孔雷达发射脉冲应该是一个宽带尖脉冲, 由于天线频谱响应的限制和大地的吸收作用, 相当于一个低通滤波器, 使得发射脉冲变成有一定时间延迟的雷达子波, 从而使得相距较近的反射界面形成的回波容易复合叠加在一起, 在雷达图像剖面中难以区分。反褶积处理的目的是消除大地滤波作用, 压缩雷达波延迟时间形成窄脉冲形式, 提高雷达图像剖面的分辨率。常用的反褶积方法有: 最小平方反褶积、预测反褶积、最小熵反褶积等^[6]。反褶积处理方法应用较少, 一般利用预测反褶积抑制多次振荡。

1.8 频谱补偿

雷达波在岩土层中传播时不同频率信号由于大地吸收系数差异以及衰减会造成不同损失, 尤其是后期信号。为了弥补这些损失的频谱信号, 可通过人为方式进行补偿, 拓宽信号的频谱范围, 提高雷达剖面的分辨率。

1.9 偏移

钻孔雷达接收的是来自地下介质不同电磁特性界面的反射波。然而, 偏离测点的地下介质交界面的反射点, 只要其法平面通过测点, 都会被记录下来。所以在数据处理中需要把记录信号中的每个反射点移到其本来的位置, 这就需要信号进行偏移处理。偏移处理方法包括: 绕射扫描叠加、相位偏移、克希霍夫积分偏移法等。偏移的作用是将采集获得的每个反射信号移到本来位置, 获得探测区域的实际图像, 比如对于点状体目标信号特征聚回点状, 对于倾斜的线状目标在信号图中的倾角与实际一致, 提高雷达剖面的分辨率。偏移处理方法一般较少应用, 但对于确认钢筋数量比较有效。

1.10 属性分析

利用希尔伯特变换或小波变换, 求取雷达信号的三瞬属性参数(瞬时振幅、瞬时频率、瞬时相位)。瞬时振幅反映了反射信号能量大小及能量衰减状况; 瞬时相位能够较好反映

电磁特性差异的位置和同种岩土介质的连续性;瞬时频率属性反映地下介质对雷达波的吸收衰减。通过属性分析得到同一个雷达剖面的三个参数图,并将这三个参量进行相互对照,避免单一参量解释的片面性,提高解释的质量和效率^[7-9]。

2 数据处理流程

单一数据处理技术只能去除一部分干扰波,数据处理的整个过程是多种处理方法的组合,并且数据处理的具体方法与步骤应根据实际探测情况来选择。相同处理参数设定情况下,若处理流程选择不同,处理效果将存在差异。数据处理前需要选择多种处理方法和流程进行反复试验,通过对比分析找出合适的处理方法和步骤。

不管数据处理方法和流程如何变化,数据处理主要包含三个部分。第一部分为数据编辑,包括合并文件、测线方向一致化、插入或删除道等;第二部分为数字处理,包括滤波、增益、反褶积、偏移等;第三部分为图像处理,对图像信息进行增强处理,改善图像质量以利于识别。结合本文实例分析,采用的数据处理流程见图2所示。

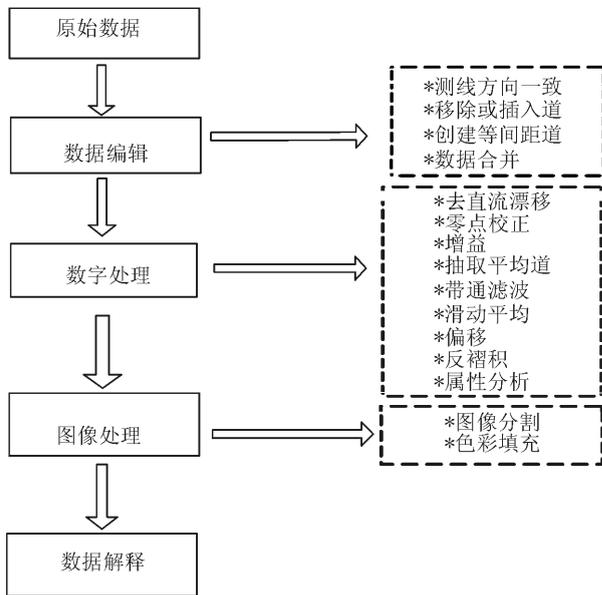


图2 数据处理流程

Fig.2 Data processing

3 数据处理实例分析

本文通过钻孔雷达探测桩基模型试验测试结果的数据处理分析为例,模型桩采用7组相同尺寸的混凝土块拼接形成,部分混凝土块设置了不同缺陷,测线位于模型桩正上方,模型桩布置见图3。数据处理流程参照图2,分析各数据处理方法的效果,各方法数据处理后的雷达剖面见图4。

图4中的各方法处理结果图的顺序为本次处理的流程和步骤,其中反褶积、偏移和瞬时振幅是在滑动平均后分别进行的处理,部分处理方法选取了不同参数,并选择效果较好的剖面进行下一步处理。从以上各剖面图分析可知:

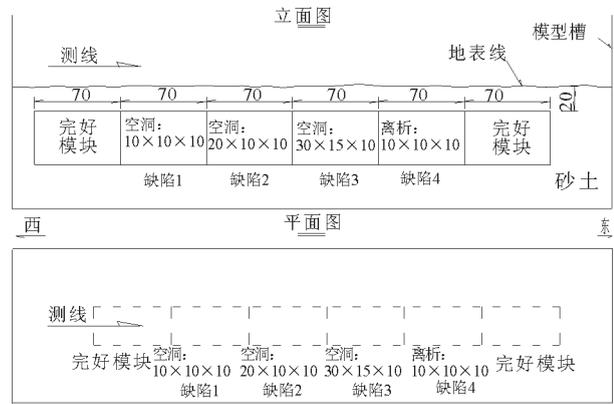


图3 模型桩布置示意图(尺寸单位:cm)

Fig.3 Diagram of pile model(unit: cm)

(1) 测线距离校正:探测时天线移动的实际距离与测距轮的转动距离存在误差,导致原始数据的测线长度与实际不符,可首先通过测线距离校正对数据进行编辑,测线距离从原始剖面的4.4 m修正到实际的5.0 m。

(2) 去直流漂移:在数字处理时,首先要通过去直流漂移,消除信号中的直流成分或直流偏移以及随后产生的延迟振荡,使得子波的振幅零点与基准线重合。

(3) 零点校正:去除天线与岩土介质之间空隙的变化产生的信号,将雷达剖面中所有道数据的起始点位置移到最初到达的直达波位置,确保目标体距离的准确识别。与原剖面相比,可以明显看出起始位置发生了变化。

以上三个处理步骤为数据处理的最基本要求,为提高雷达剖面图的分辨率,增强可视效果,还需采用其他方法进一步处理。

(4) 增益:分别采用了能量衰减和AGC两种方法,两种方法处理后剖面的反射信号与之前的剖面相比得到了明显加强,两者对比来看,AGC更加突出了层状的反射信息。

(5) 抽取平均道:分别采用了10道、100道和600道进行了处理,各参数处理后剖面的层状反射信息得到了明显抑制,尤其是最初到达的直达波形成的层状信号。通过对比还可以看出道数越小,抑制效果越明显,但从可视效果来看,100道以上的处理效果较好。

(6) 带通滤波:带通滤波处理后的雷达剖面,更加突出了异常目标体信号的显示效果,提高了雷达剖面信号的分辨率。

(7) 滑动平均:去除毛刺噪声信号,使得图像更加平滑。

(8) 反褶积:滑动平均后进行该法处理,剖面中的下部和端部水平状信号得到了明显的抑制。

(9) 偏移:滑动平均后进行采用偏移处理,原雷达剖面中典型的双曲线的两翼被明显去除,主要保留了双曲线的弧顶信号。

(10) 瞬时振幅:瞬时振幅是反射强度的量度,从瞬时振幅剖面图可以看出,之前剖面图中的双曲线信号,反射强度与其他位置存在明显差异。

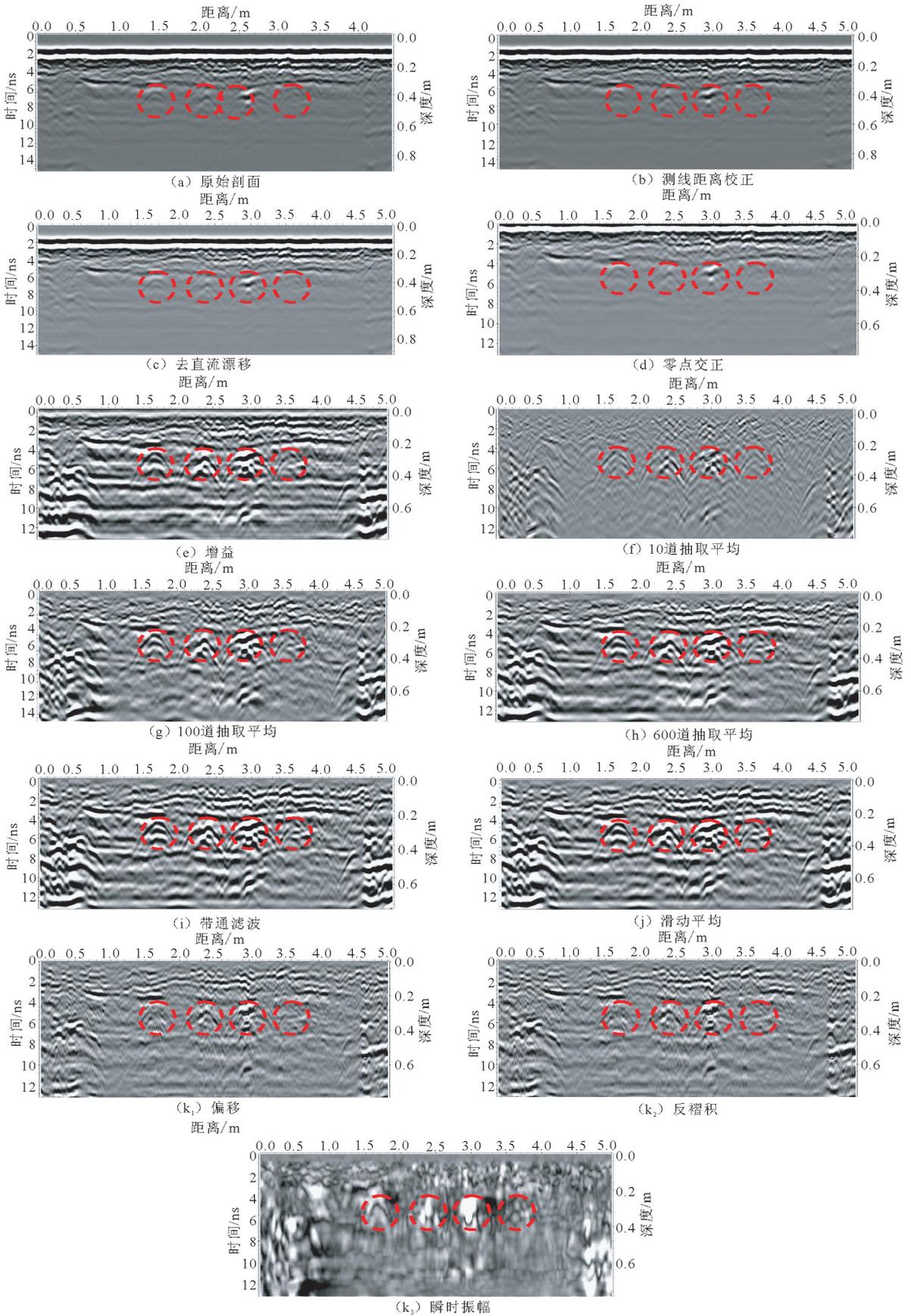


图 4 各方法数据处理后雷达剖面图

Fig.4 Radar profile after data processing with each method

4 结论与建议

(1) 通过数据处理的实例分析可以看出,合适的处理方法和流程能压制各种干扰噪声,增强有效信号,提高资料信噪比,并获得高分辨率的雷达图像剖面,提高探测结果的解释精度。

(2) 为了提高数据处理效率,须理解数据处理各种技术,掌握各种方法对数据处理的作用和效果。

(3) 数据处理方法的选择,应根据探测目标与周围岩土介质的电磁特性差异、异常响应特征、探测目标的构造以及干扰噪声情况综合而定。

(4) 对同样条件的采集数据,保持数据处理流程和参数的一致性,并在数据处理前,先进行试验对比,选择合适的处理方法和参数,然后进行批处理,提高处理效率。

参考文献(References)

- [1] Harry M Jol. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications[M]. Netherland: Elsevier Science, 2009.
- [2] 杨峰, 张全升, 王鹏越, 等. 公路路基地质雷达探测技术研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
YANG Feng, ZHANG Quan-sheng, WANG Peng-yue, et al. Research in Ground Penetrating Radar Technologies for Roaded [M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese)
- [3] 黄宏伟, 杜军, 谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆的探地雷达探测模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 243-248.
HUANG Hong-wei, DU Jun, XIE Xiong-yao. Simulation of GPR Detecting of Grouting Materials Behind Shield Tunnel Segments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 243-248. (in Chinese)
- [4] 武小鹏, 魏永梁, 张军平. 探地雷达在多年冻土工程地质勘察中的应用效果研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35(2): 240-245.
WU Xiao-peng, WEI Yong-liang, ZHANG Jun-ping. Study on the Application Effect of Ground-penetrating Radar in Permafrost Engineering Geological Investigation [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2): 240-245. (in Chinese)
- [5] Ma Y, Yang Y, Du X, et al. The Detection of In-service bridge Pile by Borehole Radar[C]// Proceedings of Geo-Chiangmai 2008: An International Conference on Geotechnical Engineering, Singapore: C I-premier PTE LTD, 2008: 245-250.
- [6] 肖宏跃, 雷宛, 杨威. 地质雷达特征图像与典型地质现象的对应关系[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(4): 57-61.
XIAO Hong-yue, LEI Wan, YANG Wei. Correspondence Between Geological Characteristics of Radar Images and Typical Geological Phenomenon [J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(4): 57-61. (in Chinese)
- [7] 黄真萍, 曹洁梅, 周成峰, 等. 探地雷达资料的高分辨去噪处理及应用[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2012, 40(4): 521-525.
HUANG Zhen-ping, CAO Jie-mei, ZHOU Cheng-feng, et al. The High-resolution De-noise and Its Engineering Application [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2012, 40(4): 521-525. (in Chinese)
- [8] 李枝文, 宋伟, 肖柏勋, 等. Hilbert 变换与小波变换在探地雷达资料处理中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(4): 428-432.
LI Zhi-wen, SONG Wei, XIAO Bo-xun, et al. Application of Hilbert Transform and Wavelet Transform to Data Processing of Ground Penetrating Radar [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(4): 428-432. (in Chinese)
- [9] 赵文轲, 陈国顺, 田钢, 等. 探地雷达属性技术进展[J]. 工程地球物理学报, 2012, 27(3): 1262-1267.
ZHAO Wen-ke, CHEN Guo-shun, TIAN Gang, et al. Progress in Ground Penetrating Radar Attribute Technology [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 1262-1267. (in Chinese)
- [10] 杨漾, 曾云飞, 郭民权, 等. 海南省测震仪器防雷问题探讨[J]. 华南地震, 2012, 33(4): 96-101.
ANG Yang, ZENG Yun-fei, GUO Min-quan, et al. Discussion of Lightning Protection Technique of Hainan Seismic Stations [J]. South China Journal of Seismology, 2012, 33(4): 96-101. (in Chinese)