

文章编号: 1006-6616 (2016) 03-0771-07

# 差分 GPS 实现探地雷达图像 地形校正方法研究

李双飞<sup>1,2</sup>, 李家存<sup>1,2</sup>, 张迪<sup>3</sup>

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048;

2. 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100081;

3. 河南工程学院, 郑州 451191)

**摘要:** 针对在地形起伏较大的区域探地雷达获取的图像不能表达地形变化的缺点, 通过探地雷达与差分 GPS 同步采集记录数据, 实现探地雷达图像与 GPS 数据时间同步, 选择某一标准水准面为参考面, 根据时间位移和线性插值方法, 将探地雷达数据进行时深转换, 从而实现探地雷达地形校正。探地雷达图像地形校正前后对比表明此方法在保留地下介质体水平方向分布特征的同时, 实现了探地雷达图像在垂直方向的精确校正, 对地下目标的解译和精确定位有很大的帮助, 对浅层活动断层探测具有一定的实际意义。

**关键词:** 探地雷达; GPR; 差分 GPS; 地形校正; 时深转换; 时间位移

**中图分类号:** P631.8

**文献标识码:** A

探地雷达作为一种新型的探测工具, 利用电磁波的反射吸收特性, 以脉冲的形式探测介质内部的分布规律, 具有操作简单、分辨率高、成本低、易于操作等特点<sup>[1]</sup>, 在农业、军事、考古、桥梁、水文、环境等方面应用具有很大的优势<sup>[2]</sup>, 在地质勘探, 尤其是浅层地质构造断层探测更是优势明显<sup>[3]</sup>。传统的地质构造探测基于探槽开挖和地震波发射探测, 工作周期较长, 成本较高, 对地表层面环境具有破坏。探地雷达利用电磁波在不同介质传播, 反映出不同的传播时间、电磁波强度而表现不同的几何形态<sup>[4]</sup>, 以二维图像的形式表现介质内部特征。在平坦的表层探测活动断层时, 显示效果较好, 能准确表现地下断层空间分布形态; 然而在地面起伏较大的探测区, 地表起伏可能导致探测结果图像的表现产生畸变, 需要根据地形起伏对探测结果进行图像校正<sup>[5]</sup>。目前, 多利用全站仪<sup>[6]</sup>、激光测绘、激光水准仪、GPS 多点定位<sup>[7]</sup>等技术实现地形数据与探地雷达数据叠加处理来消除地形起伏带来的探地雷达图像的畸变, 但是这些方法存在工作量大、准确度不高和设备成本高等缺点, 在道间距较小、测线长度较长等工作量大的区域不太适合。本文结合差分 GPS 等技术, 提出采用探地雷达与 GPS 同步采集数据方式, 根据设置的采集步距和测距轮最小探测精度等参数, 将探地雷达与 GPS 进行时间同步, 以测线上最高点水平面为参考面, 对探地雷达

收稿日期: 2016-05-30

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (121201104000150010, 12120114002101)

作者简介: 李双飞 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事探地雷达技术与地学应用研究。E-mail: lishuangfei\_gis@163.com

通讯作者: 李家存 (1974-), 男, 博士, 副教授, 从事遥感技术应用与研究。E-mail: lijiaacun@163.com

数据进行地形校正。

### 1 探地雷达地形校正原理

探地雷达地形校正的方法参考地震勘探领域的地震波静校正原理，把地表面上方一定距离的水平面作为探地雷达数据校正的统一标准参考面，将各道数据的样本点双程传播时间统一到标准参考面，从而完成探地雷达的地形校正<sup>[8]</sup>。探地雷达在地形起伏较大的区域采集数据（见图 1），假设测区地下介质层质地均匀，探地雷达采集的原始数据二维剖面应如图 2a 所示。由于地形起伏，探地雷达采集的数据在垂直方向发生错移，最终造成介质层探测结果产生畸变。为了准确表达地下目标物的分布，根据时间位移原理<sup>[9]</sup>，运用电磁波双程传播公式  $\Delta t = -2h(x)/v$  ( $\Delta t$  为电磁波在介质体的双程传播时间，ms； $h$  为目标物距离地面的深度，m； $v$  为电磁波在介质体内的传播速度，m/ms)，将电磁波在标准参考面和地表面的距离转换为传播时间，并与样本点在介质体内的传播时间进行结合，获得样本点到标准参考面的统一传播时间，实现探地雷达数据的地形校正，校正后的探地雷达图像能够真实准确地反映介质层分布状况（见图 2b）。

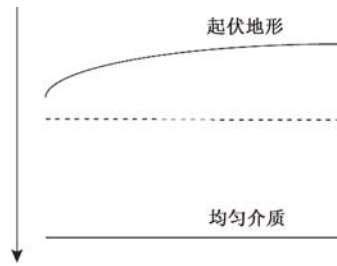


图 1 探地雷达起伏地形采集数据

Fig. 1 GPR data collected at rough terrains

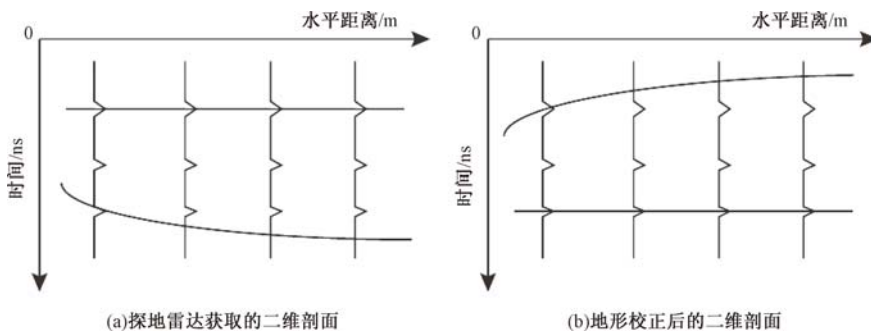


图 2 探地雷达地形校正前后二维剖面对比

Fig. 2 The 2D profiles of original and adjusted GPR images

### 2 探地雷达地形校正

探地雷达地形校正系统分为数据同步采集和数据处理校正两部分。探地雷达同步采集系统主要采用探地雷达与 GPS 设备进行硬件的改造和集成，实现探地雷达在测线上采集地下目标物分布信息数据的同时记录差分 GPS 数据，为探地雷达时间同步提供基础<sup>[10]</sup>；数据处

理校正主要是对 GPS 数据后处理和对探地雷达数据进行滤波, 然后对其时间同步, 建立统一标准参考面, 根据时间位移和分段插值理论, 实现探地雷达图像的地形校正。

### 2.1 探地雷达与 GPS 数据同步采集

探地雷达与差分 GPS 同步采集系统包括探地雷达、GPS 和数据采集计算机 (见图 3), 探地雷达主机与 GPS 流动站通过串口进行连接, 探地雷达主机与计算机通过 RJ45 接口与 USB 接口连接。探地雷达天线正上方中心位置安装 GPS 流动站, 使其与探地雷达天线中心位置水平重合<sup>[11]</sup>。

采集工作开始前架设 GPS 基站, 完成 GPS 设备的准备工作, 设置探地雷达采集间距和采集参数。在拖动探地雷达天线按照测线采集数据时, 测距轮转动触发内部光敏传感器, 产生电流脉冲, 探地雷达主机接收到脉冲信号时向 GPS 流动站发出采集指令, GPS 流动站记录数据, 同时探地雷达主机判断水平位移是否达到采集间距, 如果达到采集间距则探地雷达天线开始工作, 发射和接收电磁波, 并记录每道采集数据。采集原理示意图见图 4。



图 3 探地雷达与差分 GPS 同步采集系统

Fig. 3 GPR and DGPS data synchronous acquisition system

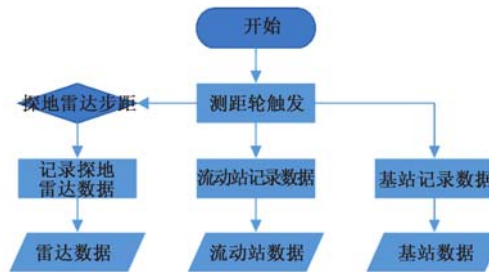


图 4 探地雷达与差分 GPS 同步采集原理

Fig. 4 The principle of synchronous acquisition

### 2.2 探地雷达地形校正数据处理

探地雷达地形校正处理是对同步采集系统获取的 GPS 数据和探地雷达数据分别进行处理, 并进行时间同步, 建立标准参考面, 实现对探地雷达图像进行地形校正。地形校正处理主要工作分为三个部分: 首先对 GPS 基站数据和流动站数据进行后处理 (见图 5), 获取准确的坐标信息; 其次对探地雷达数据进行解震荡滤波、时间零点校正、信号增益、背景去噪、带通滤波和数据平滑等处理 (见图 6), 获取较为准确雷达图像的数据; 最后通过测距轮最小测量精度和探地雷达测量步距等参数信息, 对探地雷达数据和 GPS 数据进行时间同步, 建立以测线最高点水准面为基础的标准参考面, 采用时间位移理论将探地雷达每道数据样本点电磁波传播时间统一到参考面, 从而实现探地雷达图像进行地形校正<sup>[12]</sup>。

#### 2.2.1 GPS 数据后处理

GPS 数据后差分处理利用 POSGPS 软件实现, 实现过程: 首先将 Trimble GPS 基站和流动站获取的原始 DAT 数据格式转换为 GPB 格式, 新建工程文件并导入转换后的数据, 在导入数据过程中分别输入基站天线高和流动站天线高; 然后进行差分处理, 差分处理方向为双向, 静态初始化为浮点方案, 模糊度结算为自动解算; 最后按照自定义格式输出处理结果<sup>[13]</sup>。

#### 2.2.2 探地雷达数据滤波处理

探地雷达数据滤波处理通过商用软件 Reflex 对原始数据解震荡滤波、时间零点校正、信号增益、背景去噪、带通滤波、数据平滑、数据裁剪等操作, 以提高探地雷达数据质量, 为



图 5 差分 GPS 数据后处理流程

Fig. 5 Post-processing DGPS data

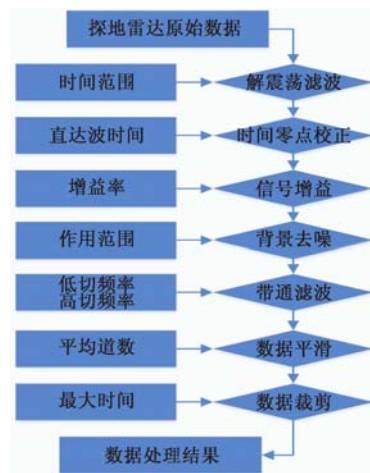


图 6 探地雷达数据后处理流程

Fig. 6 The post-processing of GPR data

探地雷达地形校正和信息解译提供支持<sup>[14]</sup>。解震荡滤波是对设定的起始时间和结束时间之间范围的每道数据的各样点做平均，每道数据减去平均值，去除上道数据造成的直流成分和直流偏移；时间零点校正读取第一次波峰或波谷处的时间数值，根据这一时间数值去除电磁波在空气中传播的时间，校正探地雷达电磁波在介质体实际传播时间，提高介质体深度探测精度；信号增益是根据电磁波信号平均振幅衰减曲线对 Y 方向进行放大，减少信号在介质体在传播过程中的衰减，增加可视化效果<sup>[15]</sup>；背景去噪通过对选定道数在整个剖面消除一致性的噪声，抑制水平一致性的能量，使雷达电磁波信号清晰；带通滤波通过不同频率探地雷达天线对应的低切频率和高切频率对每道数据用递归滤波进行带通滤波，实现噪声抑制；数据平滑对每个时间段选定的数据进行滑动平均，消除数据在水平方向上的能量散射。图 7 为探地雷达处理前后图像，经过处理的探地雷达图像能够清楚反映介质体内部分布特征。

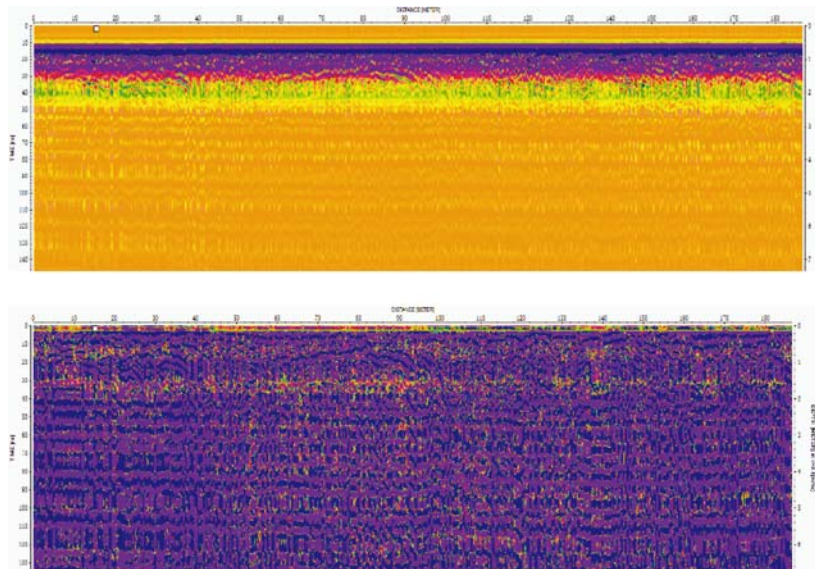


图 7 探地雷达数据处理前后图像

Fig. 7 The original and post-processing GPR images

### 2.2.3 探地雷达时间同步和地形校正

探地雷达同步采集系统在工作过程中, 探地雷达记录数据触发条件为步距, 即测距轮移动到设定的位移时记录数据, 而 GPS 记录数据为固定频率, 不同的数据记录频率造成探地雷达与 GPS 数据时间不同步。

为解决这一问题, 本文利用探地雷达测距轮最小测距单位和数据采集步距, 根据两个数据的时间信息, 从 GPS 数据中提取出与探地雷达时间相同的有效 GPS 数据, 然后利用此数据作为探地雷达地形校正的参考平面, 采用时间位移原理和样本插值方法, 对探地雷达采集的每道数据的样本点进行数据校正, 使其每一样本点的电磁波在介质体内的传播时间统一在参考面上, 真实准确地反映介质体的分布和构造 (见图 8)。

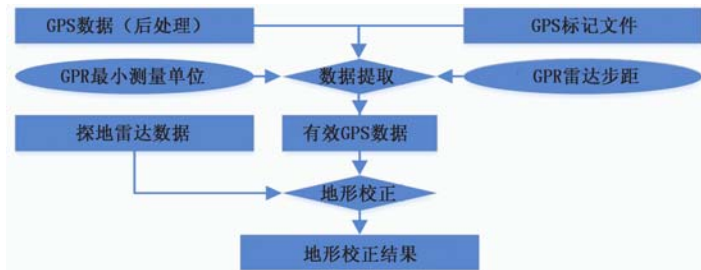
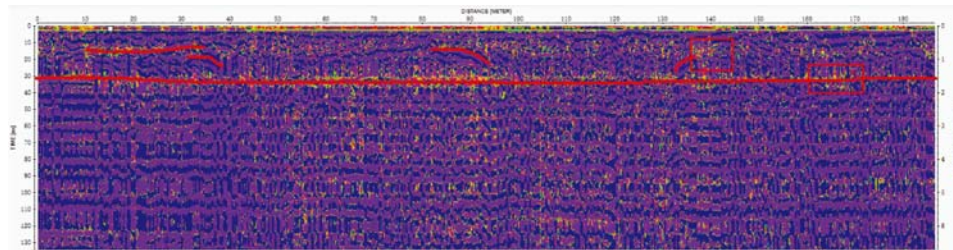


图 8 数据融合与地形校正

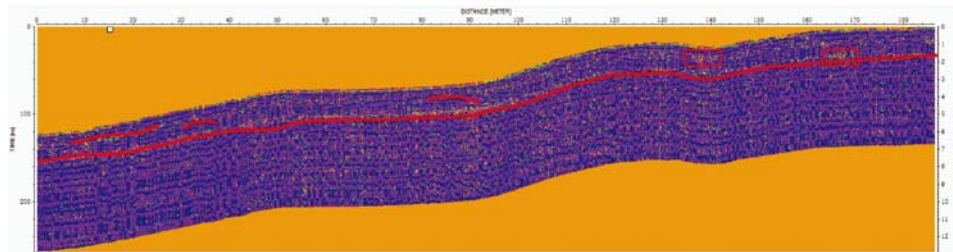
Fig. 8 Data fusion and terrain correction

### 2.3 地形校正处理结果与分析

图 9a 为经过滤波处理产生的探地雷达剖面图, 水平方向从左到右为探地雷达运动方向, 垂直方向为电磁波在介质体传播方向。从图 9a 可以看出, 在水平方向 32 ~ 38 m 和 82 ~ 92 m 出现明显的反射区域, 在 140 m 与 160 m 处存在反射异常; 垂直方向上, 根据探地雷达图像



(a)探地雷达地形校正前剖面



(b)探地雷达地形校正后剖面

图 9 地形校正前后探地雷达剖面图

Fig. 9 The original and adjusted GPR images

特征在地下 1.5 m 附近绘制地下介质体分层面, 在地下 0.8 m 附近有一小段分层。图 9b 为地形校正后的探地雷达剖面图, 根据图像特征对剖面图进行解译。探地雷达图像地形校正前后对比显示, 在水平方向上, 反射异常区域与校正前反射异常位置一致; 在垂直方向上, 经过地形校正介质体分层面随地形起伏, 与实际情况一致, 发射异常区域在垂直方向与原图像存在差异, 校正后图像更能反映实际情况。

### 3 结论

利用探地雷达与差分 GPS 同步采集获取雷达数据, 根据时间特征对探地雷达和 GPS 进行时间同步, 生成以测线最高点水平面为基准的标准参考面, 采用时间位移原理和样本插值方法, 对雷达剖面数据进行校正。实验证明, 此方法对参地形校正的效果明显, 通过地形校正能够获得与实际情况较为一致的剖面结果, 对介质体内目标物的分布和深度探测具有一定的意义。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 陈义群, 肖柏勋. 论探地雷达现状与发展 [J]. 工程地球物理学报, 2005, 2 (2): 149 ~ 155.  
CHEN Yi-qun, XIAO Bai-xun. On the status quo and development of Ground Penetrating Radar [J]. Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2 (2): 149 ~ 155.
- [ 2 ] 宋利霞. GPR 偏移技术在考古探测中的应用研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2006.  
SONG Li-xia. Research on the application of GPR migration technology in archaeological exploration [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [ 3 ] Bhosle B, Parkash B, Awasthi A K, et al. Remote sensing-GIS and GPR studies of two active faults, Western Genetic Plains, India [J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, 61, (2): 155 ~ 164.
- [ 4 ] Maury S, Balaji S. Application of resistivity and GPR techniques for the characterization of the coastal litho-stratigraphy and aquifer vulnerability due to seawater intrusion [J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2015, 165: 104 ~ 116.
- [ 5 ] 周辉, 王兆磊, 韩波, 等. 同时实现地质雷达数据地形校正和偏移成像的方法 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2004, 34 (3): 459 ~ 463.  
ZHOU Hui, WANG Zhao-lei, HAN Bo, PEI Jian-xin. Terrain correction and migration of GPR profile fulfilled simultaneously using reverse-time migration [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2004.
- [ 6 ] Solla M, Lorenzo H, Alex, et al. Evaluation of Ancient Structures by GPR: The Arch Bridges of Galicia (Spain) [J]. Scientific Research & Essays, 2011 (8) .
- [ 7 ] Urbini S, Baskaradas J A. GPR as an effective tool for safety and glacier characterization: experiences and future development [C] //Ground Penetrating Radar (GPR). 2010, 13th International Conference on. IEEE, 2010; 1 ~ 6.
- [ 8 ] 林伯香, 孙晶梅, 徐颖, 等. 几种常用静校正方法的讨论 [J]. 石油物探, 2006, 45 (4): 367 ~ 372.  
LIN Bo-xiang, SUN Jing-mei, XU Ying, et al Discussion on several common static correction methods [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45 (4): 367 ~ 372.
- [ 9 ] 张玉海. 探地雷达的工作原理和检测应用 [J]. 铁道建筑技术, 2003 (4): 70 ~ 72.  
ZHANG Yu-hai. Working principle and detection application of Ground Penetrating Radar [J]. Railway Construction Technology, 2003 (4): 70 ~ 72.
- [ 10 ] 张迪, 李家存, 吴中海, 等. 探地雷达在探测玉树走滑断裂带活动性中的初步应用 [J]. 地质通报, 2015 (1): 204 ~ 216.  
ZAHNG Di, LI Jia-cun, WU Zong-hai, et al. A preliminary application of ground penetrating radar to the detection of active faults along Yushu strike-slip faulted zone [J]. Geological Bulletin of China, 2015 (1): 204 ~ 216.
- [ 11 ] 张迪. 基于激光与探地雷达的断裂位错探测技术 [D]. 北京: 首都师范大学, 2015.

- ZHANG Di. Fracture dislocation detection technique based on laser and ground penetrating radar [D]. Beijing: Capital Normal University, 2015.
- [12] 任丽丽, 李家存, 张迪, 等. 激光点云实现探地雷达图像地形校正的研究 [J]. 激光与红外, 2014 (8): 870~873.
- REN Li-li, LI Jia-cun, ZAHNG Di, et al. Topographic correction of GPR profiles based on laser data [J]. LASER & INFRARED, 2014 (8): 870~873.
- [13] 胥辉旗, 朱平云, 王义冬, 等. GPS 数据事后处理方法研究 [J]. 海军航空工程学院学报, 2006, 21 (2): 245~248.
- XU Hui-qi, ZHU Ping-yun, WANG Yi-dong, et al. Research on off-line data processing of GPS data [J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2006, 21 (2): 245~248.
- [14] 曹震峰, 杨世福. 探地雷达数据处理方法及其应用 [J]. 地质与勘探, 1996 (2): 62~68.
- CAO Zhen-feng, YANG Shi-fu. Ground Penetrating Radar Data Processing Method and its Application [J]. Geology and Exploration, 1996 (2): 62~68.
- [15] 李建. 探地雷达数据处理方法研究与软件研制 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2008.
- LI Jian. Research on data processing method of ground penetrating radar and software development [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.

## TOPOGRAPHIC CORRECTION OF GPR PROFILES BASED ON DIFFERENTIAL GPS

LI Shuang-fei<sup>1,2</sup>, LI Jia-cun<sup>1,2</sup>, ZHANG Di<sup>3</sup>

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Key Laboratory of 3-Dimensional Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Beijing 100048, China;

3. Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

**Abstract:** As a new type of ground detection technology, Ground Penetrating Radar (GPR) has advantages of high resolution and fast survey and no damage in detection, especially in the exploration of shallow active fault. However, the result image of GPR is not consistent with the objective facts in undulated areas. This paper presents a new method to correct the topographic distortion of GPR image: GPR and GPS are combined to collect and record data at the same time, achieving time synchronization between the GPR data and GPS data. Specifically, through time shifting and linear interpolation method, taking a standard level for reference surface, converting the time-depth of GPR data, finally achieving topographic correction. Contrast the original GPR image and adjusted GPR image, it shows that the method can correctly express the distribution characteristics of underground medium, and it is helpful to interpret and position the underground target, especially in the shallow active fault detection program.

**Key words:** ground penetrating radar; GPR; DGPS; topographic correction; time-depth conversion; time-displacement