

文章编号: 1674—8247(2018)02—0014—05

既有线路基病害车载 GPR 检测数据的处理方法

陶智亮 熊洪强 咎月稳

(西南交通大学, 成都 610031)

摘要:我国既有线铁路路基下沉和翻浆冒泥等病害比较普遍。为了确保行车安全,如何快速准确检测这两类常见的路基病害是亟需解决的问题。车载 GPR 以其快速无损和高分辨率等优势已经逐渐成为铁路既有线路基病害检测的首要选择,但该技术 in 数据处理方面仍需深入研究。在综合比较多种处理方法的应用效果与运行速度后,对之前处理方法进行优化改进,提出一种专门适用于既有线路基病害检测的车载探地雷达数据处理方法。经焦柳线实地挖探验证,数据解释结果与实际情况较为吻合,该处理方法能够在保持计算速度快和通用性强的前提下,显著提升车载 GPR 铁路路基病害检测数据的可视性,突显路基层位及病害异常相关信息,对于铁路快速无损检测有着重要意义。

关键词:铁路路基病害检测; 车载探地雷达; 探地雷达数据处理

中图分类号: U216.41⁺7

文献标志码: A

Data Processing Method of the Vehicle-mounted GPR for Detection of Railway Subgrade Diseases

TAO Zhiliang XIONG Hongqiang ZAN Yuewen

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Subgrade subsidence and mud pumping diseases are widespread in China's existing railway. In order to ensure the safety of railway operation, how to quickly and accurately detect these two kinds of common roadbed diseases becomes an urgent problem. Vehicle-mounted GPR has become the primary choice of railway subgrade diseases detection because of its advantages of fast and nondestructive with high resolution. But this technology still needs to be further studied in data processing. After comprehensively comparing the application effect and speed of multiple processing methods, a new data processing method for vehicle mounted GPR is proposed based on the improvement of the prior processing method, which is used to detect the subgrade diseases of railway existing lines. After field excavation and verification of Jiaozuo-Liuzou line, it is proved that the processed data is in good agreement with the actual situation. This method can significantly improve the visibility of the vehicle mounted GPR railway subgrade diseases detection data on the premise of speed and versatility, highlighting the information about subgrade layers and diseases, and is of great significance to the railway rapid nondestructive detection.

Key words: detection of railway subgrade diseases; vehicle-mounted GPR; data processing of GPR

我国既有线铁路路基病害比较普遍,其中路基下沉和翻浆冒泥尤为严重。据统计,自上世纪 80 年代以来,每年存在的路基病害总数达 8 万多处,总延长上万

公里,且逐年增加,危及铁路的正常运营和安全。目前传统的路基检测方法以挖探法为主,不仅效率低下,信息量小,代表性差,还会对线路造成一定的损坏,难以

收稿日期: 2017-09-14

作者简介: 陶智亮(1993-),男,在读硕士研究生。

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT13092)

引文格式: 陶智亮,熊洪强,咎月稳. 既有线路基病害车载 GPR 检测数据的处理方法[J]. 高速铁路技术,2018,9(2):14-18.

TAO Zhiliang, XIONG Hongqiang, ZAN Yuewen. Data Processing Method of the Vehicle-mounted GPR for Detection of Railway Subgrade Diseases [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(2): 14-18.

满足当今铁路高速重载的要求。探地雷达以其高速无损检测、操作方便、效率高等优点,已经成为路基检测的一种常用工具。

近十多年来车载探地雷达技术已逐步被国内外学者应用于铁路道床脏污与路基病害检测。在国外, Sussmann^[1]通过大量数据发现 GPR 对水分变化较为敏感,适合探测道砟含水率与脏污状态。Silvast 等人^[2]提出利用傅里叶变换确定铁路道砟含水率和污染水平的方法。Khakiev 等人^[3]则利用积分反射波法获取铁路路基道床中含水率随季节的长期变化,但是该方法是建立在对一条线路的连续监测的基础上进行。在国内,咎月稳等人^[4]在保证探测分辨率和深度的前提下将铁路路基状态检测车速度提至 120 km/h。但针对铁路既有线路基检测的车载探地雷达数据处理方法并未形成统一,处理步骤依旧以工作人员的主观经验为主,本文提出一种专门适用于既有线路基病害检测的车载探地雷达数据处理方法。

1 检测原理

探地雷达(Ground Penetrating Radar,简称 GPR)是一种利用高频电磁波反射原理,对地下一定深度内介电常数不同的物体加以区分的主动源电磁勘探方法。高频短脉冲电磁波在地下传播时,其路径、电磁场强度与波形将随所遇到介质的介电性和几何形态的变化而变化。根据所接收波形的双程走时、幅值变化等参数可以推断地下目标体的深度、形状等特征参数,如图 1 所示。

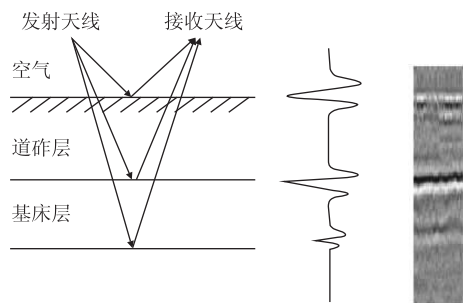


图1 铁路路基探地雷达检测原理图

咎月稳等人研发的车载探地雷达路基检测系统^[4],如图 2 所示。该车载 GPR 检测系统主要包括多通道雷达主机、空气耦合天线、GPS 定位系统、里程校正系统以及数据采集和处理系统等。

2 既有线路基检测

在铁路路基病害检测当中,采集参数的设置以及天线的选择至关重要。根据铁路路基病害检测的要求,在权衡分辨率和检测深度两项要求后选择

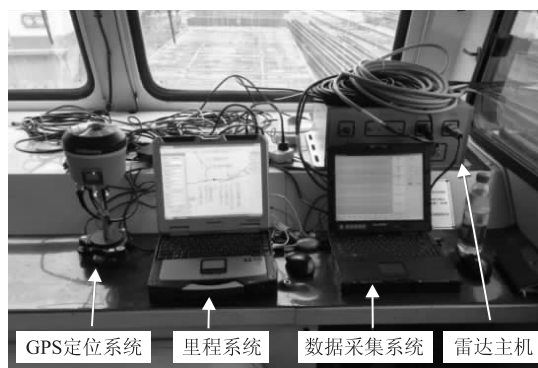


图2 车载 GPR 检测系统

300 MHz 的空气耦合天线,其可探测到道床表面以下 3 m;根据经验公式 $\text{Range} = 6.6 H \sqrt{\epsilon}$ 可知,时窗 Range 的大小取决于探测的深度 H 以及介电常数,经计算在检测当中取 60 ns;道间距选择 3 cm,扫描速率为 976 scan/s;列车运行速度保持在 80 ~ 120 km/h。天线分别位于线路中心和轨枕外侧,如图 3 所示。

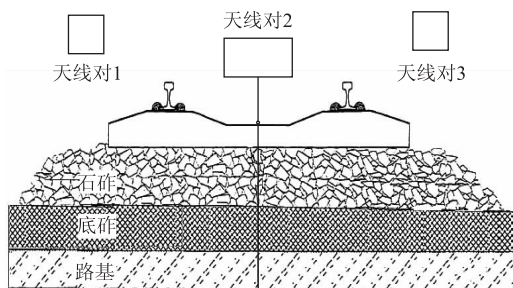


图3 天线安置位置

本次检测线路为焦柳线,该线北起河南焦作,南至广西柳州,是我国纵贯南北的第二条重要干线。线路为 I 级双线电气化线路,全长 1 759 km,于 1969 年动工,1978 年建成通车。近年来随着线路运量增加,路基病害日趋严重,线路养护工作量也日益加大。

3 数据处理

数据处理是探地雷达数据解译过程的重中之重,直接关系到数据解译的直观性以及精准性。采集数据时的环境噪音和铁路沿线的接触网、信号设备等均会降低数据的信噪比,而钢轨和钢筋混凝土轨枕均会在雷达图像上产生强烈反射,这些都将掩盖有效信息,增加数据解译的难度。如何对复杂的原始雷达数据进行适当的处理以提取铁路路基的有效信息? 本文将从以下几个方面对数据进行处理。

3.1 预处理

为了数据处理的顺利进行,需对数据进行预处理。预处理包括数据编辑、里程校正和介电常数的选取等。数据编辑主要是将其按线路里程分段整理好。数据道

头有 GPS 坐标信息、里程信息,但为了保证定位的准确性,应将数据里程信息与线路设备表进行人工比对检查。最后结合实际工况中铁路路基下各层填充物的介电性及含水率选取相应介电常数(如图 4 所示),得到铁路道砟厚度及病害具体深度,经分析在焦柳线检测中取 6.0。



图 4 数据预处理

3.2 去背景

去背景就是将雷达记录的每一道减去背景值,所以背景的选取不同导致处理后的图像也截然不同。目前主要有两种背景选取方法。其一可以将整个数据本身作为背景,但其中的桥梁涵洞、沿线设备和路基病害也将会纳入其中,必定会对数据产生影响。其二可以自定义一段长距离特定标准线路数据作为背景,或者将原数据中的桥梁等影响较大路段剔除后作为背景,这样能够更显著的突出有效信息。

选取第二种方法去除背景后的图像如图 5 所示,可见图中有规律的水平干扰和直达波已被去除,而无

规律的反射信号则得到了加强,表层部分出现规则密布的双曲线,实为轨枕的反射影响,为消除此干扰将在下一步滤波中对数据进行优化。

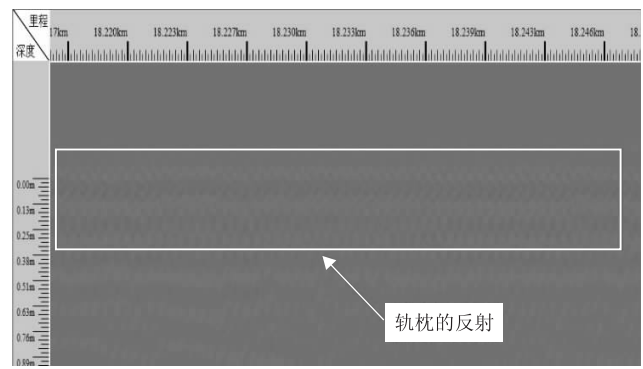
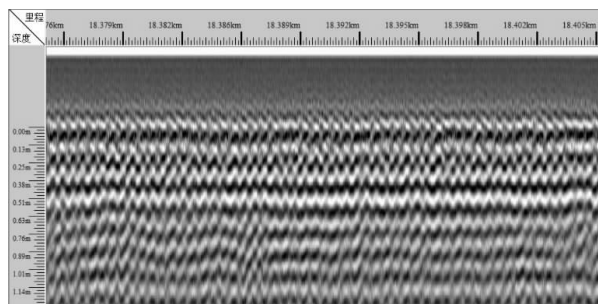


图 5 背景去除后的图像

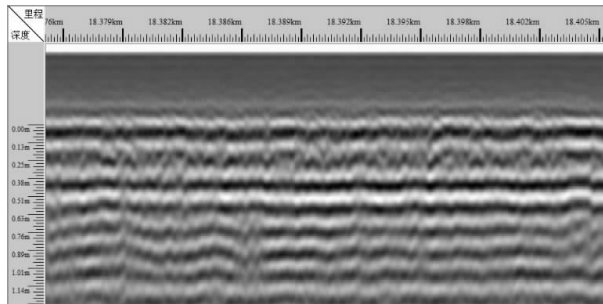
3.3 滤波

在数据采集过程中,为了尽可能保留多的数据,通常采用全通的记录方法,但与此同时诸多干扰也同样被记录其中。为了消除数据中的干扰信号,提升信号信噪比,需要对其进行滤波处理。

滤波的种类很多,经比较,在铁路路基检测中采用一维垂直时域滤波 VFI (Vertical Time Domain Filtering) 和二维水平低通滤波 HFL (Horizontal Low Pass Filtering) 两种滤波方法效果较为理想。VFI 主要是为了去除数据中的干扰信号,提升数据的信噪比。为了消除铁路轨枕的影响如图 6(a) 所示,采取二维水平低通滤波,在滤波后并加上自动增益效果如图 6(b) 所示,图像中轨枕的影响得以去除,并明显趋于平缓。



(a) HFL 滤波前图像



(b) HFL 滤波后图像

图 6 二维低通滤波 HFL 前后图像

3.4 增益

由于高频电磁波在地下传播时能量迅速衰减,原始数据在图像上直接显示的效果十分微弱,难以对其进行识别,因此对数据进行增益处理,增强其可视效果是十分必要的。在对比多种增益效果后决定选取自动增益 AGC (Automatic Gain control)。AGC 是基于信号在指定时窗中的均值幅度和其在整个长度的最大值的

差异来确定的,其优点在于可以较明显的放大深层弱反射信号特征,但同时噪声也会随之放大。增益后的数据显示如图 6(b) 所示。

在探地雷达数据处理中还有许多上述并未提及的方法,比如各种反褶积方法、偏移方法、希尔伯特变换以及谱分析法等,这些方法计算步骤较为复杂,会明显增加数据处理的运行时间。由于车载探地雷达检测的

铁路路基数据本身已经很大,在图像已经清晰的情况下,没有必要再采用复杂的处理方法。

我国高速铁路还有部分线路采用有砟轨道。当车载探地雷达用于检测高速铁路有砟轨道路基时,上述处理方法仍然适用。

4 处理结果及分析

如图 7(a) 所示,道砟厚度在图像中清晰可见,厚度约为 52 cm,而我国 TB 10082 - 2017《铁路轨道设计规范》中运行速度 ≤ 160 km/h 的铁路道床厚度为 50 cm,可判断截取路段中的道砟厚度符合设计标准。图 7(b) 中给出的箱涵与当地铁路局工务部门提供的

设备表中箱涵里程相符。

由于灰度图像对于路基含水及翻浆冒泥的反映并不明显,遂在判定含水和翻浆冒泥两种病害时一般采用彩色图像。由图 8 可见,在翻浆冒泥和道床含水路段由于水的影响,会导致介质相对介电常数增大,从而使反射波的振幅增大,反映在图像上就是呈现白紫色,与旁边正常路段的黄红色形成明显反差。为了验证翻浆冒泥的判定正确与否,对图 8(a) 中道床翻浆冒泥路段进行开挖验证,如图 9 所示。可见检测结果与现场挖探结果十分吻合,证明上述处理方法和判定准则较为准确。

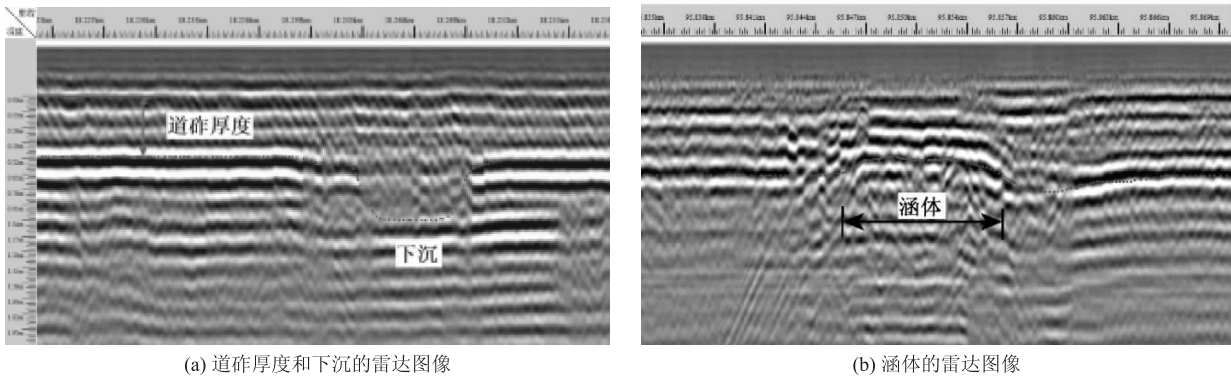


图 7 下沉及涵体在雷达图像

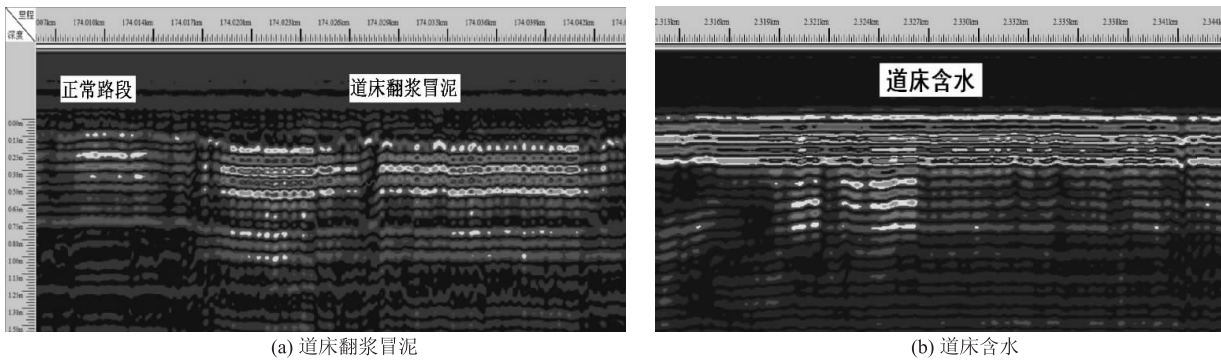


图 8 道床翻浆冒泥和道床含水在图像上的显示



图 9 现场验证实拍图

5 结论

(1)通过对焦柳线车载 GPR 数据处理表明,本文提出的数据处理方法能够显著提升数据的可视性,并能快速获取全线铁路路基的道砟厚度、各种路基病害包括下沉、翻浆冒泥和道床含水等信息。

(2)在去背景中选取背景时应避免将桥梁、设备等影响较大路段纳入,否则会在一定程度上掩盖目标信息。

(3)文中提出的二维水平低通滤波 HFL 对于消除轨枕的影响,效果理想,图像明显趋于平缓,可视性增强。

(4)既有线路基病害检测的车载 GPR 数据处理方法,对高速铁路有砟轨道路基病害检测有借鉴意义。

(5)车载 GPR 获取的大量数据对于今后铁路路基“大数据”工程的建设有着重要意义^[6]。

参考文献:

- [1] Sussmann T. Application of Ground-penetrating Radar to Railway

Track Substructure Maintenance Management[M]. 1999.

- [2] Silvest M, Nurmikolu A, Wiljanen B, et al. An Inspection of Railway Ballast Quality Using Ground Penetrating Radar in Finland [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail & Rapid Transit, 2010, 1(5):1-7.
- [3] Khakiev Z, Shapovalov V, Kruglikov A, et al. Investigation of Long Term Moisture Changes in Trackbed Using GPR [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 110(1):1-4.
- [4] 咎月稳,张安学,小田义野. 铁路路基状态检查车的研制及应用 [J]. 路基工程, 2007, 25(5):30-31.
- ZAN Yuewen, ZHANG Anxue, XIAOTIAN Yiye. Development and Application of Railway Subgrade Inspection Vehicle [J]. Subgrade Engineering, 2007, 25(5):30-31.
- [5] TB 10082-2017 铁路轨道设计规范 [S].
- TB 10082-2017 Design Specifications for Railway Track [S].
- [6] 邱永平,张东卿,刘菀茹. “大数据”在铁路路基工程设计中的应用探讨 [J]. 高速铁路技术, 2017, 8(3):16-19.
- Qiu Yongping, Zhang Dongqing, Liu Wanru. Discussion on the Application of Big Data in Railway Subgrade Engineering Design [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(3):16-19.

(编辑:车晓娟 白雪)

(上接第4页)

软件已经应用于成兰线、厦深线等多个项目,在节约人力资源、提升效率的同时,还有效确保了设计质量,具有明显的经济及社会效益。

参考文献:

- [1] 欧明喜. h 型抗滑桩力学机理及其工程应用研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- OU Mingxi. The Study on Mechanical Mechanism of H-type Anti-slide Piles and Its Engineering Applications [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [2] 柳治国. ANSYS 在 h 形抗滑桩设计中的应用 [J]. 公路工程, 2013, 38(3):144-154.
- LIU Zhiguo. Application of ANSYS on the Design of H Form Anti-slide Pile [J]. Highway Engineering, 2013, 38(3):144-154.
- [3] Christian Nagel(美), Bill Evjen(美). C#高级编程 [M]. 北京:清华大学出版社, 2010.
- Christian Nagel, Bill Evjen. C# Advanced Programming [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.

- [4] 李冠亿. 深入浅出 AutoCAD. NET 二次开发 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- LI Guanyi. Secondary Development of AutoCAD. NET [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [5] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析 [M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- WANG Xinmin. ANSYS numerical analysis of structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [6] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例 [M]. 北京:人民交通出版社, 2010.
- LI Haiguang. Design and Exemple of New Retaining Structure. [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [7] TB 10025-2006 铁路路基支挡结构设计规范 [S].
- TB 10025-2006 Code for Design of Retaining Structure of Railway Subgrade [S].
- [8] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范 [S].
- GB 50010-2010 Code for Design of Concrete Structure [S].

(编辑:赵立红 苏玲梅)