

采用短时傅里叶变换的铁路车载 探地雷达数据解译方法

朱军涛¹, 廖红建¹, 谢勇勇¹, 咎月稳²

(1. 西安交通大学土木工程系, 710049, 西安; 2. 西安铁路局科学技术研究所, 710054, 西安)

摘要: 为了更好地实现探地雷达(GPR)在铁路路基检测中的应用, 寻求一种用于识别路基不同病害特征的有效方法, 克服传统人工解译方法的低效率和主观性, 选取大同一准格尔铁路线中典型的雷达实测图像, 采用短时傅里叶变换(STFT)方法, 通过对信号进行时域和频域分析, 确定合适的窗函数类型和长度, 得到一组可用于对不同铁路路基病害进行分类的时频域图像, 分析表明, 图中不同深度处的能量分布特性与实际路基情况相符. 然后, 通过对图像形态特征的分析, 得到一组典型的特征参数值, 研究了不同目标信号在该特征参数空间的聚类特征, 并将 STFT 方法与 Welch 功率谱估计法、时域局部能量法的计算结果进行了对比分析, 结果证明 STFT 方法具有优越性, 可以作为 GPR 数据分类的基础.

关键词: 铁路路基检测; 探地雷达; 短时傅里叶变换; 数据解译

中图分类号: U216.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)07-0108-07

Data Interpretation of Ground-Penetrating Radar (GPR) via Short-Time Fourier Transform for Railway Track Detection

ZHU Juntao¹, LIAO Hongjian¹, XIE Yongyong¹, ZAN Yuewen²

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Institute of Railway Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: To make sure the wide applications of ground-penetrating radar(GPR) to railway road-bed inspection, an efficient method for recognizing different signal types gets necessary to overcome the low efficiency and subjectivity of the conventional artificial interpretation. Taking actual GPR data from Datong-Zhungeer railway as the example and analyzing the signals in time-domain and frequency-domain by short-time Fourier transform(STFT), an appropriate window function with suitable type and length is deduced to obtain a set of time-frequency patterns for classification. The energy distributions in different depths of the patterns coincide with the corresponding ground truth. The classification, which focuses on the sample collection from samples of different signal types, is performed to investigate the clustering result by a selected planar eigenvectors. Compared with the conventional methods, such as the target recognition methods based on Welch algorithm or local energy analysis in time domain, the advantages of STFT for GPR data interpretation are demonstrated.

Keywords: railway track detection; ground-penetrating radar; short-time Fourier transform; data interpretation

为了保证铁路运输的安全畅通,需要对路基进行定期的检测和维护.传统的铁路路基状况评估方法通常是外观检查和沿着轨道有选择地进行间隔钻探和挖掘.然而,外观检查难以发现路基内部的瑕疵,钻探方法则消耗时间很长,且无法提供轨道地下的连续信息.考虑到铁路路基可能会在一定范围内发生较大的地质变化,因此极有必要采用一种连续快速的检测方法.探地雷达(GPR)就是这样一种可以克服传统方法局限性的无损评价技术^[1],它的图像可以直观地反映地层变化的情况以及地下目标体的形态.然而,由于铁路路基情况复杂、GPR 数据量大以及雷达的超宽带特性等特点,使得精确解译雷达数据面临着很大困难,这也成为 GPR 技术在铁路路基检测中广泛应用的主要阻碍^[2].

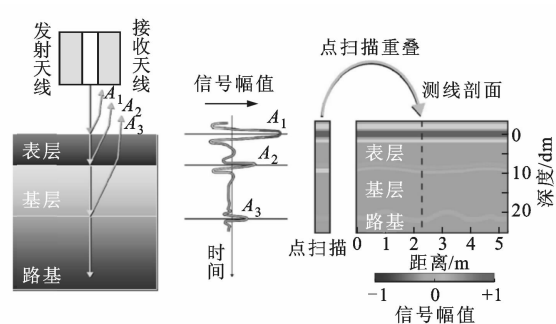
目前,对雷达回波信号进行处理以识别地下目标体的主要手段包括图像识别和特征变量识别,前者是通过对探地雷达二维或三维图像的处理,获取地下目标体的几何特征,从而根据几何特征对其加以判别,处理结果一般由人工加以解释,含有较多的主观因素;后者主要是利用探地雷达的回波信号进行特征变量的提取,借助神经网络完成目标的自动识别,特征变量的提取方法包括谱分析、连续子波变换和时频分析等.

本文研究时频分析方法中的短时傅里叶变换方法,通过对信号进行时域和频域分析,确定合适的窗函数类型和长度,得到一组可用于对不同铁路路基病害进行分类的时频域图像,通过图像典型特征参数的选取,研究不同病害的聚类特征,并与常规频域功率谱估计和时域局部能量方法的计算结果进行对比分析,以期探地雷达在铁路路基病害检测中的应用提供图像判别的理论依据和有效的数据解译方法.

1 探地雷达检测路基病害的原理

探地雷达的工作原理如图 1 所示.从雷达发射天线发出一系列电磁脉冲垂直入射到地层中(见图 1a);当遇到不同地层介质时产生反射波,经天线接收到与地层界面相对的回波,称为一个扫描线(见图 1b);当连续测试时,扫描线重叠在一起得到连续的剖面,称为探地雷达剖面图(见图 1c).

由于铁路路基分层结构明显,从上至下依次为道碴层、砂垫层、基床土层,所以各层介质的电参数(包括相对介电常数、电导率等)也不相同,当雷达入射波在地层中由一种介质射向另一种介质时,若介



(a)原理示意图 (b)扫描线 (c)剖面图
图 1 探地雷达工作原理示意图

质差异较大,则雷达波在各介质分界面会发生较强的反射.当路基出现病害后,路基介质和分层界面发生变异或异常,其特征在雷达图像上均可得到显现.通过分析沿线探地雷达剖面图像同相轴的连续性和图像变异类型,可以提取出病害类型、位置、范围和严重程度等信息^[3].

2 实验数据采集

实验数据来源于西安铁路局科研所 2011 年在大准线(大同一准格尔)实地采集的数据.铁路车载探地雷达系统包括多通道高速扫描探地雷达系统、里程测量与 GPS 校正定位系统、路面图像采集系统和数据处理系统.在多通道高速扫描探地雷达系统中,每个通道的脉冲重复频率为 500 kHz,通道之间错开发射电磁脉冲,扫描速率为 976 s⁻¹.当测点间隔设置为 5 cm 时,测试速度为 75 km/h.天线中心频率为 300 MHz,探测深度约为 3 m,在深度方向采样 512 个点.探地雷达天线安装位置如图 2 所示,中间道位于 2 条轨道中间,两侧的雷达天线距离轨道外侧 60 cm,以减少轨道杂波的影响.



图 2 探地雷达天线安装位置^[4]

雷达数据的预处理由芬兰 ROAD doctor 系统软件完成.主要处理过程包括:①通过减对空信号去

除收发天线耦合波;②通过均值法去背景,以去除地面直达波;③通过带通滤波去除外界射频干扰;④平滑处理及信号放大.

本文采用经过软件预处理的图像,以包含道床型翻浆冒泥、路基含水异常、路基下沉3种病害以及无明显异常的雷达数据作为研究对象.图3为雷达剖面扫描图,其中:横向为扫描道数(道间距设定为5 cm),对应于线路的里程信息;纵向为采样窗宽度(设定为20 ns),在假定材料均匀(相对介电常数设为7)的前提下,可以换算为路况的深度信息;标示部分为目标信息,计算对象为包含目标信息的单道扫描线.为计算方便,不考虑每列信号的实际时间长度,而以离散点数作为信号长度.

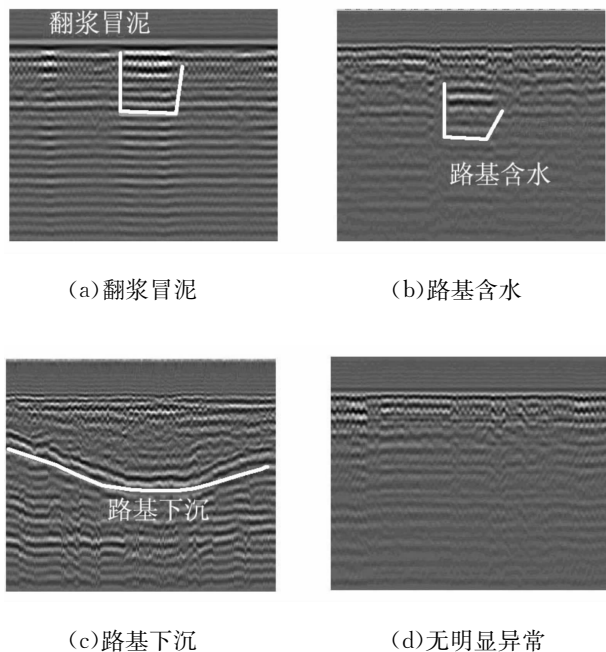


图3 4种类型的GPR图像

3 基于短时傅里叶变换的时频技术

3.1 短时傅里叶变换

根据 Clark 和 Silvis 等人^[5-6]的研究,可利用傅里叶变换得到的频谱来推算各层介质的厚度. GPR 作为一种超带宽雷达系统,主要用来获取由于目标深度及介电常数的差异所产生的频率信息.然而,采用傅里叶分析将时域信号转换到频域时,时间信息会被隐藏,不能随时间显示频域变化,这意味着傅里叶变换只适用于稳态信号,例如不随时间变化的频率响应.由于傅里叶变换技术不能获得目标的深度信息,这将给铁路路基 GPR 数据处理及目标类型判定带来困难.

短时傅里叶变换(STFT)可用来克服傅里叶分析的限制,有效地跟踪频谱随深度(时间)的变化,其表达式为

$$F_{\text{STFT}}(t, \Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \omega(\tau - t) e^{-j\Omega\tau} d\tau \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为反射信号; t 为时间变量; Ω 为径向频率变量; $\omega(t)$ 为窗函数.

信号 $x(t)$ 在时间 t 的短时傅里叶变换,就是信号 $x(\tau)$ 乘以一个以 t 为中心的窗函数 $\omega(\tau - t)$ 所作的傅里叶变换^[7]. 在实际 STFT 中,为了减少频谱能量泄漏,可采用不同的截取函数对信号进行截断,此截取函数称为窗函数,简称为窗.窗函数的类型很多,在这里选取常用的汉明窗^[8-9].

3.2 窗函数宽度的选取

窗的宽度影响着时域和频域的相对分辨率:窗窄则频率分辨率低,可以解决大幅度的时间变化,当采用极窄的窗口时,利用 STFT 的结果类似于在时域范围处理探地雷达数据的散射振幅包络法;当窗很宽时,频率分辨率很高,时间分辨率很低,当窗宽等于扫描长度时,STFT 就成为傅里叶变换.窗宽的选择是在频率分辨率和时间分辨率之间进行权衡.为了提高信号的时域或频域分辨率,借鉴 PSD 功率谱中的处理方法,采取相邻信号段之间相互叠加的方式,本文选取相邻信号段之间的叠加长度为每段长度的一半.

根据本文的实验设备条件,接收天线所能接收的信号的最大时长为 60 ns,依据采样定律设定的参数,每道信号采集 512 个点,为充分有效地利用数据,避免增加无信息长度或是减少可能有用的信息,并能够使用快速傅里叶变换(FFT)以增加计算速度,不对原始信号进行补零或是截短.按照上述要求,每段信号长度的选择余地非常有限,除去过长和过短的,选取每段信号的长度(即窗宽)分别为 64、32、16 和 8 点,相应的段数分别为 15、31、63 和 127. 对应的时频图如图 4 所示,图中不同的灰度代表不同的频率幅值,颜色越浅代表能量越高.经过对比时域和频域的分辨率发现,当窗宽为 32 点时分辨效果比较好.

3.3 不同目标类型的时频图分析

选取不同目标类型的信号进行比较,图 5 为包含翻浆冒泥、路基含水、路基下沉信息的信号以及路基正常信号所对应的时频图.图中的色标表示时频图中相应灰度像素点所对应的索引值,即相应时间段中某一频率的频域信号的幅值,从中可以估测出

不同频域幅值之间的变化情况,而幅值的变化可以代表信号在不同时频区域的分布。

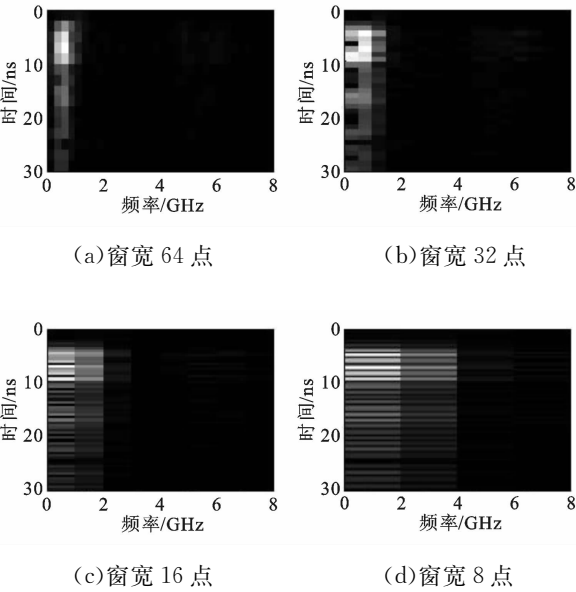


图 4 不同窗宽时的信号时频图

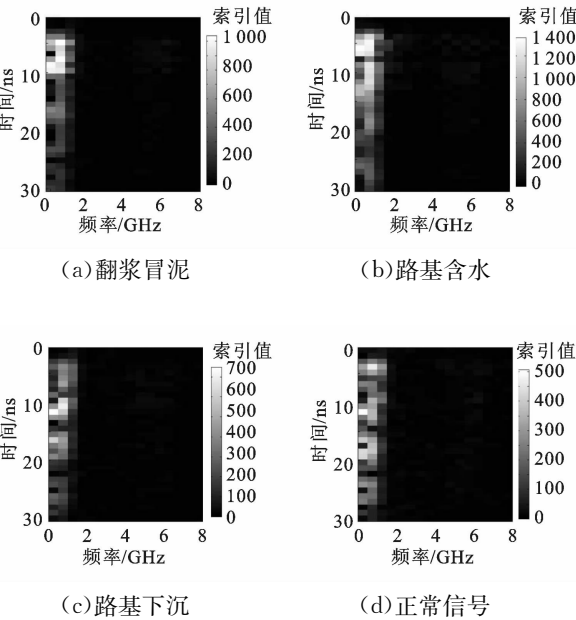


图 5 4 种类型信号的时频图

对于翻浆冒泥信号,从地表至 9~10 ns 位置能量分布非常集中,频域幅值的最大值明显高于其他信号。这是因为翻浆冒泥离地表较浅,道砟空隙被泥沙、煤屑等介质填充,同时这些介质又具有较高的保水性,使得该范围内介质的平均介电常数远高于正常道砟层,电磁波反射强烈且衰减很快,从而又使得在翻浆冒泥范围以下频率幅值非常低。

从路基含水信号可以看出,能量在道砟层范围内(以 6 ns 为中心)具有较强烈的反射,同时在 11~

16 ns 深度范围内也有一部分能量分布。大准线为货运专线,道砟表层煤屑、粉尘污染严重,当由于天气或者地质条件使得路基含水量偏高时,水分将会集中分布在脏污材料以及砂垫层等保水性较高的材料中,使得这些部分的介电常数增大,易引起电磁波的反射与衰减。这与原始信号图像(见图 3)中反映的结果相吻合。

对于路基下沉信号,因为路基下沉作为铁路线路的主要病害,在许多情况下与路基蓄水有很大的关系,这应该是时频图上浅层有明显反射的原因。同时,在以深度 20 ns 为中心的区域,能量也比较集中,该反射能量来源于下沉的道砟层与砂垫层之间的层面反射。这些特征均与雷达扫描图像相符。

对于正常路基的雷达信号,除了在路基介质材料变化处(道砟-砂垫层-基床)有较强反射外,能量分布比较均匀。至于图 5 中底部集中的能量,其实际深度在 3 m 以下,已经在路基结构以外。

由以上分析可见,改进的 STFT 方法所得结论与实际情况具有很高的相似性,可以有效地完成 GPR 数据解译。

3.4 短时傅里叶变换聚类结果评价

在得到时频图之后,需要针对 4 种不同类型的信息进行分类,而所有分类方法的重点和难点在于特征向量的选择和提取。为了通过一组具有代表性的数字来反映图中不同信号之间的差异,以时频图谱的图像像素点对应的索引值作为权值得到峰值加权和,利用峰值加权和组成的一组二维向量来研究不同信号之间的聚类情况。

针对本文 4 种不同类型的路基状况,从每种类型的 GPR 图像中,选取 8 列信号采用上述 STFT 方法得到时频图谱,将不同时间段的频域振幅峰值与对应频率的加权和作为特征值 A,将不同频率段的时域振幅峰值与对应时间的加权和作为特征值 B,获得 4 种类型的样本平面分布图,如图 6 所示。可以看出:正常信号、翻浆冒泥信号样本的类内距离较小,类间距离很大,说明信号比较集中,聚类结果很好;路基含水及路基下沉信号虽有些散乱,类内距离稍大,但各个样本类别之间的差异仍较明显。总体来说,鉴于目标信息的复杂性,运用短时傅里叶变换法得到的聚类结果还是比较令人满意的。

4 不同方法分析结果的比较

下面将 STFT 的计算结果分别与常规的 Welch 功率谱估计法和时域局部能量法的计算结果进行比

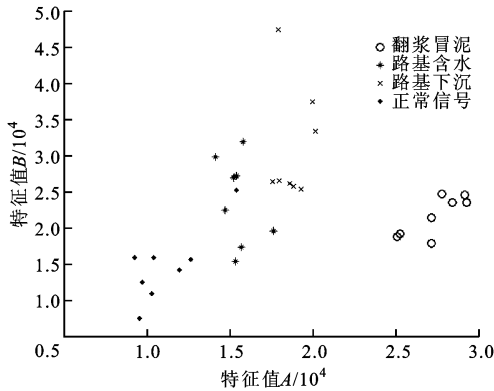


图 6 4 种信号样本平面分布的聚类特征

较,以验证 STFT 方法的优越性.

4.1 Welch 功率谱估计法及其聚类分析

频谱分析在信号分类方面应用较为广泛. 众所周知,用直接法(周期图法)估计信号功率谱的效果不理想,当数据长度 N 太大时,谱线的起伏加剧,而当 N 太小时,谱线的分辨率下降. 改进的方法之一就是采用 Welch 功率谱估计法(简称 Welch 法),又称加权交叠平均法. Welch 法的基本思想是利用窗函数对时域离散信号进行截断,得到对应的数据段,对其进行谱估计后移动窗函数,重复上述过程直到窗函数通过所有的窗口,最后对各数据段信号的功率谱求平均,得到目标信号的功率谱^[10].

Welch 法对频率的分辨率相对较高. 实验信号数据的长度为 512 点,为充分利用数据并尽可能提高分辨率,对实验数据分别截取 128 和 256 点的长度进行试算,计算结果表明这 2 种长度的窗函数对聚类结果影响不大,因此下面仅以长度为 128 点的窗函数为例进行说明. 图 7 为信号样本的功率谱估计结果,从中可以直观看出不同类型信号高功率部分之间的差异.

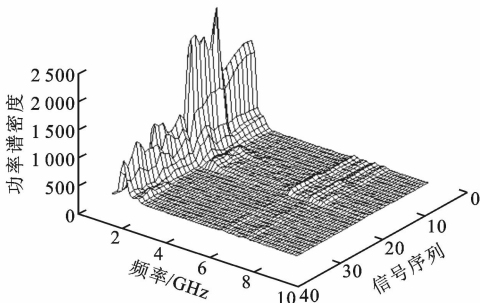


图 7 信号样本的功率谱估计结果

下面进行聚类结果的评价. 特征向量提取(即降维处理)的方法通常是在一定范围内选取极值点作为分割点,对功率谱曲线进行分割,然后取每一段功

率之和作为特征值. 由图 7 可以看出,信号在高频部分功率较低,且各个类别之间差别不大,这里只选取初期 2 个近似波峰段的功率和作为特征,对样本信号的聚类结果进行分析,聚类结果如图 8 所示. 特征值 A 为起始位置至第 1 个波谷间信号的功率和,特征值 B 为第一个波谷至第 2 个波谷间信号的功率和. 坐标平面上的每个点代表一个样本信号. 由图 8 可以看出, Welch 法可以在一定程度上对各种病害进行区分,异常信号类的类间距离较大,可以满足分类算法的要求,但是正常信号的离散性太大,混杂于感兴趣的目标信号内,使得该方法无法有效地完成路基检测.

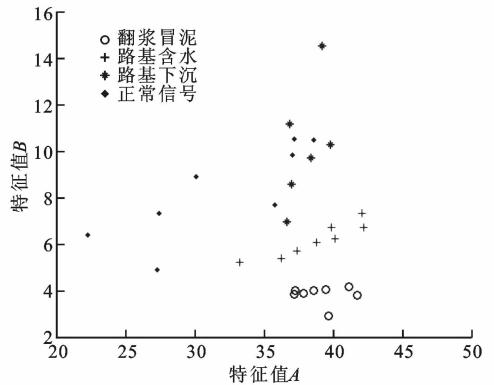


图 8 Welch 法的聚类特征

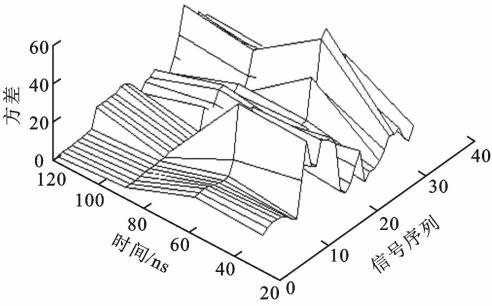
4.2 时域局部能量法及其聚类分析

时域局部能量法较为简单,常用的特征提取方法为取分段能量及方差^[11-12]. 本文将长度为 512 点的目标信号分为 4 段,对每段信号求分段能量及方差来衡量信号在不同区段的分布情况. 时域信号的幅值反映出能量的变化,每一分段信号幅值的均方和可以表征该段能量的大小,而在同一深度下,不同信号的幅值可以反映它们之间的差异,分段内不同深度的幅值方差可以反映该分段能量的差异程度(在雷达图像的形态上反映为波形的凌乱程度),计算结果如图 9 所示.

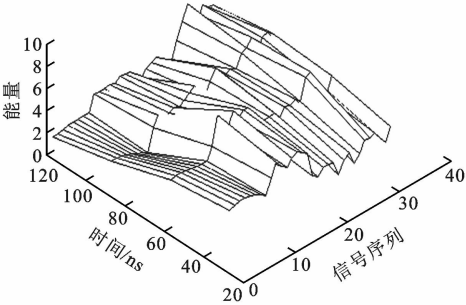
为直观显示聚类结果,取 2 个特征值为参考,分析样本各个特征间的类别可分性测度. 分别取第 1 段的分段能量及方差(即图 9 中时间段 1 对应的能量及方差)为特征值 A 和 B ,将对应的点表示在坐标平面上,结果如图 10 所示. 可以看出,时域局部能量法可以在一定程度上区分不同类型的信号,但是对于路基下沉和路基含水信号尚很难有效区分.

5 结 论

针对探地雷达在铁路路基病害检测中的应用,



(a)分段方差



(b)分段能量

图 9 信号样本时域分段能量及方差图

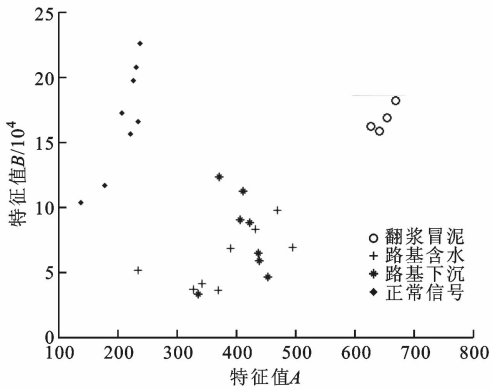


图 10 时域局部能量法的聚类特征

结合现场雷达实测图像,研究了时频分析方法中的 STFT 及其聚类特征.通过对常规频域 Welch 功率谱估计法和时域局部能量法的聚类结果进行分析,得到如下主要结论.

(1)基于 STFT 的时频分析方法,可以得到不同铁路路基病害类型的时频域图像,清晰地显示和表征实际路基情况的特征,不同深度处的能量分布特性与实际路基情况相符.

(2)通过选取 STFT 时频分析图像形态特征值,研究不同目标信号在该特征参数空间的聚类特征,结果可见翻浆冒泥、路基含水、路基下沉以及正常信号样本间的类间距离较大,而类内距离较小,同

类信号集中,不同类信号差异明显,聚类结果很好,表明 STFT 方法可以作为 GPR 数据解译分类的基础.

(3)通过分析常规 Welch 法和时域局部能量法的聚类特征,发现都存在信号混杂,在样本区别上存在一定的难度,这进一步验证了 STFT 方法的优越性.

(4)本文旨在从 GPR 自动解译角度来分析 SFTF 方法在铁路路基检测中的应用,探讨了该方法的可行性和优越性.不同的分类方法都存在各自的优势和不足之处,可以综合各种方法中的特征向量,然后通过特征提取得到最优化的特征向量.下一步工作将主要研究特征向量的精选以及分类算法.

(5)基于 STFT 的时频图在特征向量选取上尚存在较大潜力,可以从形态学角度进行特征值的选择和提取.

参考文献:

[1] 胥月稳,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(5): 30-31.

[2] 李建勋,郑军庭.超宽带探地雷达自动目标识别研究[J].电波科学学报,2005,20(4): 535-540.

LI Jianxun, ZHENG Junting. Automatic target recognition for ultra-wideband ground-penetrating radar [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 20(4): 535-540.

[3] 谢勇勇,廖红建,胥月稳.探地雷达检测铁路路基病害的二维正演模拟[J].浙江大学学报:工学版,2010,44(10): 1907-1911.

XIE Yongyong, LIAO Hongjian, ZAN Yuewen. Two dimensional forward simulation of railway roadbed disease based on ground penetrating radar technique [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 44(10): 1907-1911.

[4] 胥月稳,章锡元,张安学.铁路路基检查车的研究[J].铁道工程学报,2007(9): 17-21.

ZAN Yuewen, ZHANG Xiyuan, ZHANG Anxue. Research on railway subgrade inspection car [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(9): 17-21.

[5] CLARK M, GORDON M, FORDE M C. Issues over high-speed non-invasive monitoring of railway track bed [J]. NDT & E International, 2004, 37(2): 131-139.

[6] SILVAST M, LEVOMAKI M, NURMIKOLU A, et al. NDT techniques in railway structure analysis [C/OL]//Proceedings of the 7th World Congress on Rail-

- way Research, Montreal, Canada, June 4-8, 2006. [2011-05-01]. <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/12987>.
- [7] 张永山, 张丹. 一种探地雷达回波信号的非平稳特性分析方法[J]. 电子测试, 2011(8): 26-28.
ZHANG Yongshan, ZHANG Dan. Ground penetrating radar signal echo analysis of non-stationarity [J]. Electronic Test, 2011(8): 26-28.
- [8] AL-QADI I L, LAHOUE S. Data analysis techniques for GPR used for assessing railroad ballast in high radio-frequency environment [J]. Materials Evaluation Journal, 2010, 63 (9): 921-925.
- [9] AL-QADI I L, XIE Wei, JONES D L, et al. Development of a time-frequency approach to quantify railroad ballast fouling condition using ultra-wide band ground-penetrating radar data [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2010, 11(4): 269-279.
- [10] 樊新海, 安钢, 邱绵浩. 基于 Welch 法的一种目标识别方法[J]. 华北工学院测试技术学报, 2001, 15(1): 26-31.
- FAN Xinhai, AN Gang, QIU Mianhao. A method of target recognition based on Welch arithmetic [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2001, 15(1): 26-31.
- [11] 廖立坚, 杨新安, 丁春林. 铁路路基雷达探测图像的自动解释技术研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(6): 102-108.
LIAO Lijian, YANG Xin'an, DING Chunlin. Technique for automatic interpretation of GPR images of railroad subgrades [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(6): 102-108.
- [12] 廖立坚, 杨新安, 杜攀峰. 铁路路基雷达探测数据的处理[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3): 18-25.
LIAO Lijian, YANG Xin'an, DU Panfeng. Processing GPR detection data of railway subgrade [J]. China Railway Science, 2008, 29(3): 18-25.

(编辑 葛赵青)