

文章编号: 1673-9469 (2017) 04-0037-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.04.009

探地雷达在道路结构层厚度检测中的应用

胡艳杰^{1, 2}, 余湘娟^{1, 2}, 高磊^{1, 2}, 韩学武³, 邢欢欢⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 江苏省岩土工程技术研究中心, 南京 210098; 3. 苏州交通工程试验检测中心有限公司, 江苏 苏州 215011; 4. 中设设计集团股份有限公司, 南京 210014)

摘要: 针对道路结构层厚度检测和评估问题, 将地质雷达应用于道路检测工程中, 开展了道路地质雷达现场测试, 并将雷达检测结果与钻芯取样结果进行对比, 分析了道路分界面的位置、各结构层的厚度以及存在的病害, 对雷达原始数据进行希尔伯特变换, 得到瞬时振幅图、瞬时相位图和瞬时频率图, 重点分析了道路结构层分界面的位置。研究表明: 地质雷达能够探测道路结构层的厚度, 并且对道路的不均匀沉降也有较好的检测效果, 通过数据的二次处理, 提高了地质雷达图像解释的精确度和可信度。

关键词: 探地雷达; 道路检测; 希尔伯特变换; 瞬时振幅; 瞬时相位; 瞬时频率

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

The application of ground penetrating radar on highway structure layer thickness detection

HU Yanjie^{1, 2}, YU Xiangjuan^{1, 2}, GAO Lei^{1, 2}, HAN Xuewu³, XING Huanhuan⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center For Geotechnical Engineering Technology Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Suzhou Traffic Engineering Testing Center Co. Ltd, Suzhou 215011, China; 4. China Design Group Co., Ltd. Nanjing 210014, China)

Abstract: In this paper, the ground penetrating radar is applied to the road detection, and the field test is carried out. The radar test results are compared with the results of core sampling. The location of the interface, the thickness of structural layers, and the existing diseases are analyzed. The Hilbert transform of radar raw data is used to obtain instantaneous amplitude, instantaneous phase and instantaneous frequency, then, the interface position of the road structure layer is emphatically analyzed. The results show that the ground penetrating radar can detect the thickness and the uneven settlement of the road structure layer. The accuracy and credibility interpretation of the radar image are improved by secondary processing.

Key words: ground penetrating radar; highway detection; Hilbert transform; instantaneous amplitude; instantaneous phase; instantaneous frequency

对已有道路进行结构层检测, 确定道路各结构层厚度是否满足设计要求, 对工程质量做出合理有效的评价至关重要。目前使用较多的检测手段为钻芯取样、标准贯入等原位检测手段^[1], 此类方法属于破坏性检测, 并且人为选择测点, 随机性大, 代

表性弱, 且在通车条件下检测影响正常交通, 对行车和检测人员的安全存在威胁; 探地雷达用于道路检测, 且具有精度高、连续性好等优点^[2]。王曦光等人^[3-4]给出了探地雷达在工程中应用的典型特征图像, 对正确解读、分析采集图像具有重要指导作

收稿日期: 2017-07-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508159); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20151495); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016B20214, 2016B06114)

作者简介: 胡艳杰(1993-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事地质雷达检测方面的研究。

用;朱能发等人^[5-8]将雷达应用于道路检测,总结了常见缺陷的雷达波相特征,为公路检测及治理提供借鉴。传统的数据处理手段是采用 Fourier 变化,这种处理方法不能反映非平稳信号的局部特征,无法充分获取隐含在非线性中的频谱信息;Hilbert 变换是处理这类信号的另一种有力工具,该方法把一个实信号变成一个复信号,然后能够从复信号中分离出多个能够表征信号特征的参数^[9-12]。本文结合某公路检测工程实例,通过对实测路面地质雷达数据信号的 Hilbert 处理,提高结果分析的精确度和可读性;对比了探地雷达结果与钻芯取样结果,验证探地雷达技术在路面厚度检测中的可靠性。

1 探地雷达技术

1.1 探地雷达原理

探地雷达(GPR)的工作原理^[13]如图1所示。探地雷达通过发射天线向待测物体发射连续电磁脉冲波(图1(a)),根据电磁波传播理论,电磁波在遇到不同介质层时,由于上下介质的介电常数不同,会在分界面发生反射和折射,折射的电磁波继续向下传播,在遇到新的介质层时会继续发生反射和折射;反射的电磁波由雷达接收天线接收,称为一个扫描线(图1(b));连续测量时,扫描线重叠在一起得到连续的测量剖面,称为探地雷达剖面图(图1(c))。

电磁波在介质中的传播速度可由下式计算:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式中: c 表示电磁波在真空中的传播速度; ϵ_r 表示介质的相对介电常数。

通过记录并储存电磁波发射和接收的时刻,并且计算出电磁波在介质中的传播时间,由此可以计算反射面的深度,即可确定目标物的深度,公式如下:

$$d = \frac{v\Delta t}{2} \quad (2)$$

电磁波的介质面的折射与反射特征,由折射系数 T 和反射系数 R 表示。对于非磁性介质,电磁波垂直入射时,可由下式表示:

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (3)$$

式中: ϵ_1 、 ϵ_2 分别为上下介质的介电常数。

由上式可以看出,对于非磁性介质,反射系数仅与介电常数有关。电磁波在传播过程中遇到不同

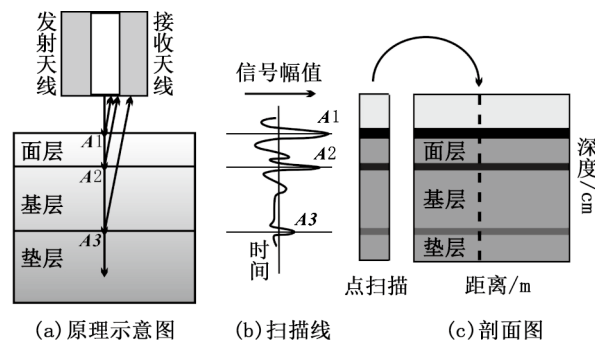


图1 探地雷达工作原理图

Fig.1 Working principle of GPR

介质的分界面时会产生反射,对反射波的振幅、频率和相位进行对比分析,即可确定道路结构层的厚度及其异常。

1.2 车载探地雷达系统

车载探地雷达系统是将雷达通过支架悬挂在工程车上或者将雷达置于天线小车上,天线小车被工程车牵引前行,检测人员在工程车内部通过操作计算机来控制雷达的工作状态。这种车载雷达相比人工方法有许多优点,它可以一次全断面检测;适用于长距离检测,大大提高了检测效率;同时保障了检测人员的安全;不影响正常的道路行车。车载探地雷达在行车中获得雷达图像类似于高速摄像机拍摄运动的物体的过程,与高速摄像机原理相同,行车速度对车载雷达检测效果的影响主要取决于雷达的扫描速率。

2 信号的 Hilbert 变换处理

对原始信号 $x(t)$ 进行 Hilbert 变换:

$$H(t) = x(t) * h(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4)$$

式中: $*$ 表示卷积; $h(t) = 1/(\pi t)$ 。

以 $x(t)$ 为实部,以 $H(t)$ 为虚部,构造解析信号:

$$f(t) = x(t) + iH(t) = A(t)e^{i\phi(t)} \quad (5)$$

式中: $A(t)$ 为瞬时振幅, $A(t) = \sqrt{x^2(t) + H^2(t)}$; $\phi(t)$ 为瞬时相位, $\phi(t) = \arctan[H(t)/x(t)]$ 。瞬时频率是相位函数对时间的一阶导数,表示为 $\omega(t) = d\phi(t)/dt$ 。

瞬时振幅是反射强度的量度,它与该时刻雷达信号的总能量的平方根成正比,当地下存在明显的分层时,在分界面位置瞬时振幅产生强烈变化,利用此特征可以确定不同介质分界面的位置;瞬时相位是雷达剖面上同相轴连续性的量度,当电磁波在

各向同性均匀介质中传播时,其相位是连续的,否则其相位会发生明显的不连续,利用此特征可以对地下分层和地下异常进行判别;瞬时频率是相位的时间变化率,当电磁波通过不同介质的分界面时,其频率会发生显著变化,此特征有助于识别地层^[14]。

图2为某公路探地雷达自带软件处理后的单道(第14道)波形图,对其进行Hilbert变换,得到与之对应的瞬时振幅图和瞬时频率图,如图3所示。从图2中可以看出,雷达波存在多个波峰,在利用分界面反射波信号划分道路结构层时,多个波峰会对层位的划分带来很大困难。但从图3中,可以清晰地将道路结构层划分为四层,其内部存在三个分界面(对应于A、B、C)。同时,雷达信号在沿深度传播的过程中,能量会发生衰减,反映到数据上即为雷达信号幅值的衰减,从图3(a)中可以发现随着深度加深,信号幅值逐渐递减,并且在测量过程中不可避免地会遇到其他信号的干扰,所以对于较深的地层,弱信号的识别变得较为困难,但瞬时频率能很好地解决这一问题,对比图3(a)和(b)中C点,虽然C点振幅较低,但其频率异常增高。所以,对实测雷达信号进行Hilbert分析后,需要综合利用信号的能量大小和频率来分层。

3 工程应用实例

3.1 工程背景

本文以某公路检测工程为例,由于重型卡车经常在该路段行驶,造成其沥青面层严重损坏,路面出现许多裂缝,尤其是横向裂缝,不仅严重影响行车的舒适性,而且影响了行车的安全性。

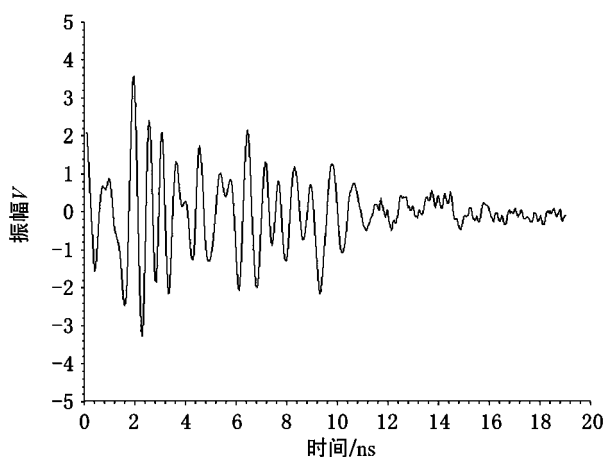
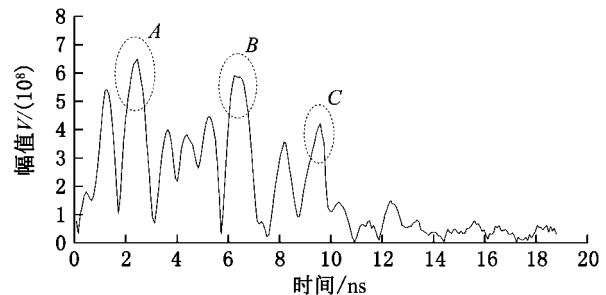
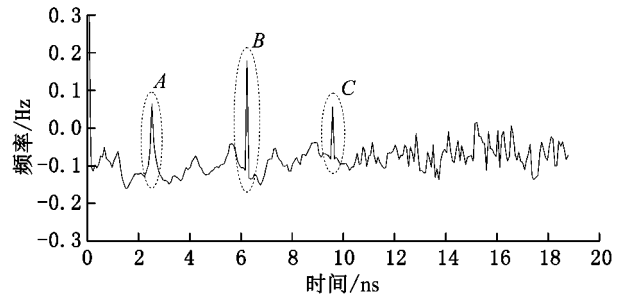


图2 雷达单道信号图

Fig.2 Single channel singal of GPR



(a) 瞬时振幅图



(b) 瞬时频率图

图3 单道信号瞬时图

Fig.3 Instantaneous graph of single channel signal

3.2 雷达参数设置及测线布置

本次检测采用意大利IDS公司RIS系列雷达,采用1600 MHz高频天线,检测深度约为0.9 m,每道采样点数512,检测车行驶速度为20 km/h。每车道沿中心线布置1条测线,由于该公路为双向四车道,故沿公路纵向共布置4条测线。

3.3 测试结果分析

(1) 钻芯取样对比分析

选取了测试路段D、E、F三处的雷达测试结果和取芯测试结果,进行对比分析。图4为D处雷达图像与芯样图像,左图为雷达图像,由浅至深依次为:空气耦合层、沥青面层、上水稳碎石层、下水稳碎石层、垫层。雷达在测试过程中,通过车载悬挂的方式测量,没有直接与路面接触,所以雷达图像最顶部一层为空气耦合层,该层厚度约为0.2 m;0.2~0.33 m范围内无明显雷达反射界面,说明此范围内物质相对介电常数变化不大,属于同种介质,为沥青混凝土面层;同理0.33~0.64 m范围为水稳碎石层。右图为钻孔取出的芯样图像,上部沥青混凝土面层开裂,但没有破碎;中部和下部都是水稳碎石层,水稳层从中间一分为二,但两部分较为完整,没有出现开裂或破碎现象。

图5为E处雷达图像与芯样图像,左图为雷达图像,由浅至深依次为:空气耦合层、沥青层、水

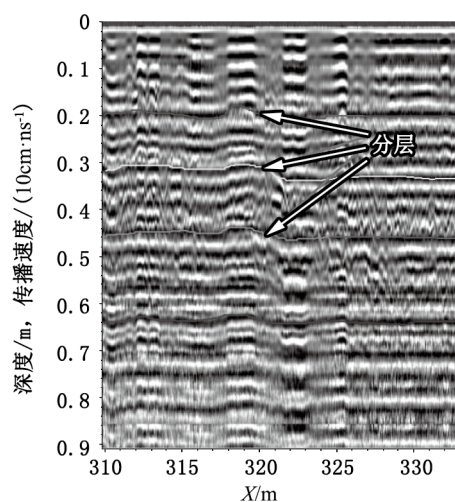


图4 *D*处雷达图像与芯样图像
Fig.4 Radar image and core image of *D*

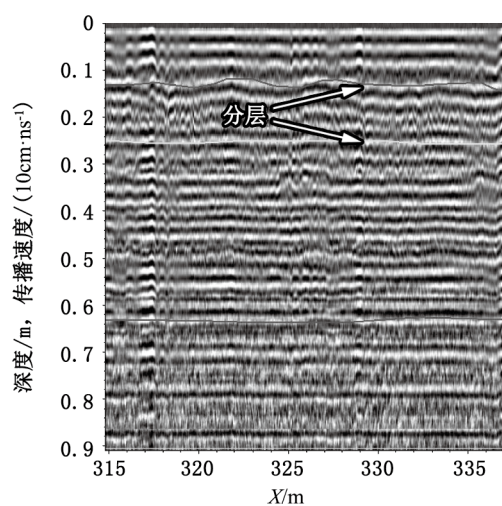


图5 *E*处雷达图像与芯样图像
Fig.5 Radar image and core image of *E*

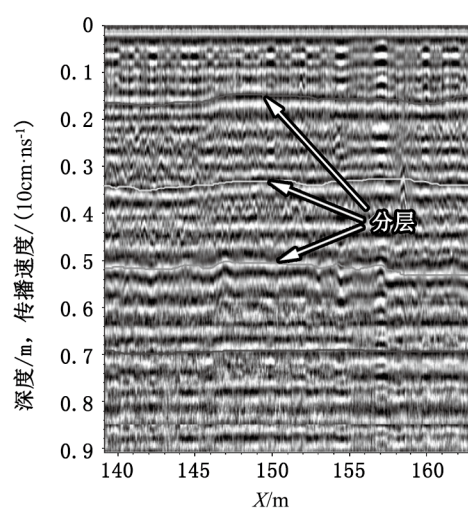


图6 *F*处雷达图像与芯样图像
Fig.6 Radar image and core image of *F*

稳层、垫层。其中,空气耦合层厚度约为0.13 m; 0.13~0.24 m范围内为沥砟层; 0.24~0.63 m范围为水稳层,上下水稳层分界面不明显。右图为钻孔取

出的芯样图像,上部沥砟层破碎;中、下部水稳层较为完整。

图6为*F*处雷达图像与芯样图像,左图为雷

达图像,由浅至深依次为:空气耦合层、沥砵层、上水稳层、下水稳层、垫层。其中,空气耦合层厚度约为 0.17 m; 0.17~0.33 m 范围内为沥砵层,0.33~0.69 m 范围为水稳层。右图为钻孔取出的芯样图像,上部沥砵层开裂;中部上水稳层开裂,下部下水稳层较为完整。

通过对雷达与芯样检测结果分析,选取结构层厚度进行对比。对比结果如表 1 所示:

地质雷达能较好地检测道路结构分界面的位置,由此推断各结构层的厚度,尽管存在一定的误差;随着测量深度的增加,高频信号衰减较快,因此对深层的判断较为困难,容易造成问题的多解性,此时需要借助其它方法加以判断;地质雷达对结构层的不均匀沉降有较好的检测效果,判断的依据为:同相轴的高低起伏状态即为地层的起伏状态。

表 1 地质雷达与钻芯取样结果对比表
Tab.1 Comparison of GPR and drill sampling results

位置	结构	雷达测试 厚度 /cm	钻芯取样 厚度 /cm	测量误差 /%
D	沥砵面层	13	12	8.3
	水稳碎石基层	31	34	8.8
E	沥砵面层	11	12	8.3
	水稳碎石基层	37	32	15.6
F	沥砵面层	16	14	14.3
	水稳碎石基层	36	36	0

(2) 信号的 Hilbert 变换分析

采用 Hilbert 变换的原始数据是直接将天线紧贴道路表面探测时的数据,与车载雷达检测不同的是数据中不含空气耦合层。

图 7 为雷达信号瞬时振幅图,当地下存在明显的分层时,在分界面位置瞬时振幅产生强烈变化,利用此特征可以确定不同介质分界面的位置。图中白色矩形条标识的位置为分界面位置,第一处在深度约 0.1 m 的位置,对应沥砵面层和水稳层的分界面;第二处在深度约为 0.3 m 的位置,对应上水稳层和下水稳层的分界面。虽然组成上下水稳层的材料是相同的,但如果水稳层出现断裂,那么在断裂面的位置也会出现明显的反射波;第三处在深度为 0.48 m 的位置,但由于信号不明显,所以需要结合瞬时相位图进行判断。此处不明显的原因是由于电磁波信号在传递过程中会发生衰减,并且频率越高衰减地越快,随着检测深度的增加,振幅趋于平缓。

白色椭圆所标识的地方为局部深度幅值较强处,

这些区域某些点虽然振幅也产生了强度变化,但不能判断该深度为分界面,因为该深度没有形成连续的振幅峰值。产生这种现象的原因是由于该处的介质不均匀、不密实,使得这些区域的材料在局部产生分离。尽管处于同一结构层的材料性质比较相似,在宏观上表现为同一种材料,但实际上还是由分散的粗细集料通过水泥等材料结成整体,所以在集料与水泥结面脱开的地方仍然会出现幅值较强的反射波。

图 8 为雷达信号瞬时相位图,地下介质电磁性差异异常引起相位的变化,因此利用此特性可推测地下介质的连续性。图中白色矩形条标识的位置为分界面位置,第一处深度约为 0.1 m 处,能够明显地看出同相轴沿水平方向具有非常好的连续性,说明此位置为一典型分界面,推测该分界面为沥砵面层和水稳层之间的分界面;第二处明显的分界面约 0.31 m 处,结合取样结果,推测该分界面为上水稳层和下水稳层之间的开裂面;第三处分界面约为 0.48 m 处,推测该分界面为水稳基层与垫层之间的分界面。

4 结论

1) 地质雷达是一种快速、高效、可连续的无损检

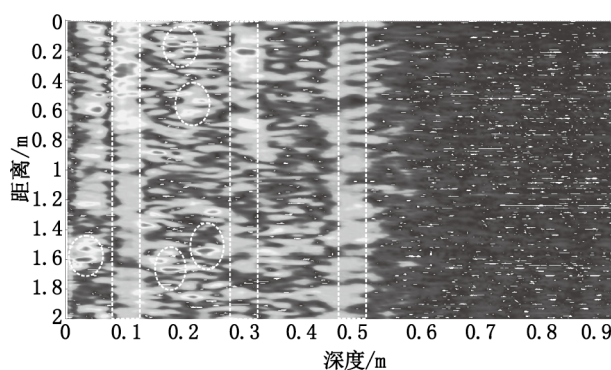


图 7 雷达信号瞬时振幅图

Fig.7 Instantaneous amplitude of radar signal

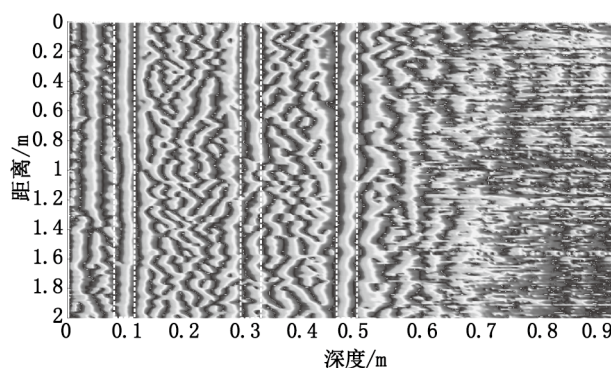


图 8 雷达信号瞬时相位图

Fig.8 Instantaneous phase of radar signal (下转第 56 页)

- [20] 李奕璠. 轮轨力连续测试方法及车轮失圆的检测与识别研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [21] 李奕璠, 林建辉, 刘建新. 基于组合预测模型的轮轨力连续测试 [J]. 西南交通大学学报, 2012(4): 597-604.
- [22] 农汉彪. 轮轨垂向载荷连续测量与识别方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [23] 任利惠, 黄 磊, 周劲松, 等. 1: 5 滚动实验台轮轨

力连续测量系统 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011(6): 895-900.

- [24] 陈建政, 林建辉. 在线连续测量轮轨接触点的神经网络方法 [J]. 振动与冲击, 2007(5): 90-92.
- [25] 潘周平, 张立民. 轮轨力连续测试系统设计 [J]. 西南交通大学学报, 2004(1): 69-72.
- [26] 赵国堂, 田 越, 刘 铁, 等. 轮轨水平力连续测试技术的研究 [J]. 铁道学报, 2000(3): 69-73.

(上接第 41 页) 测手段, 它能够有效探测出道路各结构层之间的分界面并由此推测各结构层的厚度, 同时对道路的不均匀沉降有较好的检测效果, 以上表明了地质雷达用于已通车公路检测是可行的, 可以对公路已存在的隐患进行判别, 能够对后期的修补工程提供参考依据。

2) 对地质雷达信号进行 Hilbert 二次处理, 得到其瞬时特征图, 实现对雷达数据信号的多角度解读, 相对于原始数据, 二次处理后的结果具有分辨率高、分辨深度大、图像清晰直观等优点; 同时, 将多个参数联合进行评估, 能够提高地质雷达图像解释的精度和可信程度。

参考文献:

- [1] 林志军, 林 波. 探地雷达在高速公路路基病害检测中的应用 [J]. 西南公路, 2016(3): 195-198.
- [2] 刘澜波, 钱荣毅. 探地雷达: 浅表地球物理科学技术中的重要工具 [J]. 地球物理学报, 2015(8): 2606-2617.
- [3] 王曦光. 探地雷达在工程应用中的典型图像分析 [J]. 北方交通, 2016(5): 138-142.
- [4] 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(4): 57-61.
- [5] 朱能发, 孙士辉, 陈 坚. 地质雷达在公路路面无损检测中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2014(4): 522-527.

- [6] 冯德山, 戴前伟. 高速公路路面厚度探地雷达检测 [J]. 地球物理学进展, 2008(1): 289-294.
- [7] RODES J P, GRACIA V P, REGUERO A M. Evaluation of the GPR frequency spectra in asphalt pavement assessment[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 181-188.
- [8] KHAMZIN A K, VARNAVINA A V, TORNASHOV E V, et al. Utilization of air-launched ground penetrating radar (GPR) for pavement condition assessment[J]. Construction and Building Materials, 2017, 141: 130-139.
- [9] 汤井田, 化希瑞, 曹哲民, 等. Hilbert-Huang 变换与大地电磁噪声压制 [J]. 地球物理学报, 2008(2): 603-610.
- [10] 刘 斌, 李术才, 李树忱, 等. 复信号分析技术在地质雷达预报岩溶裂隙水中的应用研究 [J]. 岩土力学, 2009(7): 2191-2196.
- [11] 张先武, 高云泽, 方广有. Hilbert 谱分析在探地雷达薄层识别中的应用 [J]. 地球物理学报, 2013(8): 2790-2798.
- [12] 刘成禹, 余世为. 基于探地雷达单道信号处理的岩溶分析方法 [J]. 岩土力学, 2016(12): 3618-3626.
- [13] 肖立锋. 铁路路基病害地质雷达检测方法 [J]. 工程地球物理学报, 2012(3): 346-350.
- [14] 余志雄, 薛桂玉, 周创兵. 复信号分析技术及其在地质雷达数字处理中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005(5): 798-802.