

西藏壁画空鼓病害的探地雷达检测

李最雄^{1,2,3,4}, 杨涛^{1,2}, 汪万福^{2,3,4}, 谌文武¹

(1. 兰州大学土木工程与力学学院 兰州 730000; 2. 古代壁画保护国家文物局重点科研基地 甘肃 敦煌 736200;
3. 敦煌研究院保护研究所 甘肃 敦煌 736200; 4. 敦煌研究院文物保护技术服务中心 兰州 730000)

【摘要】以高频脉冲电磁波在层状有耗色散介质中的传播规律为理论依据,在室内模拟试验的基础上,运用RAMAC GPR探地雷达对表面有涂层的西藏壁画进行壁面耦合式空鼓病害检测。实验表明,超宽带探地雷达方法适用于检测壁画内部空鼓病害,配备中心频率1.6 GHz天线时的垂直分辨率约为5 mm。在壁画空鼓病害的定量检测方面做了有益的尝试,促进了我国壁画保护技术水平的提高。

关键词 空鼓病害; 探地雷达; 无损检测; 分辨率; 壁画保护

中图分类号 TN958.4

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.06.013

Detection of Delamination in Tibetan Wall Paintings by Using Ground Penetrating Radar

LI Zui-xiong^{1,2,3,4}, YANG Tao^{1,2}, WANG Wan-fu^{2,3,4}, and CHEN Wen-wu¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University Lanzhou 730000; 2. Key Scientific Research Base of Conservation for Ancient Mural State Administration for Cultural Heritage Dunhuang Gansu 736200;
3. Conservation Institute, Dunhuang Academy Dunhuang Gansu 736200;
4. Technical and Service Center for Protection of Cultural Relics, Dunhuang Academy Lanzhou 730000)

Abstract In tradition, the diagnosis of delamination in either grotto wall paintings or palace wall paintings is achieved by identifying the sound when lightly knocking on the wall by hand, such experience is practical in determining the area and degree of delamination, but it depends on subjective sensation, lacking some theoretical principles. Focusing on the propagation of high frequency pulse electromagnetic waves in layered lossy and dispersive medium and after the physical forward modeling experiment, this paper tries to locate delamination in polished wall paintings in Tibet by wall coupling antennas using RAMAC ground penetrating radar. It is shown that the ultra-wide band ground penetrating radar is capable of detecting delamination in vertical resolution of about 5 mm when it is equipped with a transmitting antenna of 1.6 GHz central frequency. It is a quantitative attempt to detect delamination in wall paintings, the research results promote technical improvement for conservation of wall paintings.

Key words delamination deterioration; ground penetrating radar; nondestructive detection; resolution; wall painting conservation

西藏布达拉宫和罗布林卡的壁画是在块石墙、夯土墙或轻质笕玛草墙上先敷一层粗粒红色阿嘎土,再在其上抹一层细粒白色阿嘎土层,然后绘制壁画,最后在壁画表面涂一层清漆或桐油^[1]。由于支撑体与粗泥层、粗泥层与细泥层之间的泥质粘结较弱,受建筑结构和自然环境的影响^[2],殿堂壁画和石窟壁画中的空鼓病害严重,分布范围广。调查空鼓区域的范围并了解空鼓的严重程度是一项艰巨的任务,对壁画的保护具有重要的意义。

传统上凭肉眼观察,明显鼓起并伴生有剪应力释放裂隙、甚至有空鼓出露的区域被认定为空鼓病害。在空鼓病害的调查过程中,富有经验的壁画保护修复人员用手指轻敲壁面,通过辨别音质判断该处壁画是否存在空鼓^[3]。敲壁辨音的方法依赖于个人推断,对材质相同的非空鼓区和空鼓区,其敲击声在波形和频谱上存在较大差异。尽管上述方法非常实用,但受主观因素的影响,在工程实践中容易引起争议。

收稿日期: 2009-04-11; 修回日期: 2010-03-19

基金项目: 古代壁画保护国家文物局重点科研基地开放课题(200807)

作者简介: 李最雄(1941-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事壁画保护修复和古丝绸之路土遗址加固保护等方面的研究。

探地雷达是利用高频电磁波以宽频带短脉冲的形式, 在地面通过发射天线将信号送入地下, 经地层界面或目的体反射后返回地面, 再由接收天线接收电磁波反射信号, 通过对电磁波反射信号的时频特征和振幅特征进行分析, 了解地层或目的体特征信息的方法^[4]。探地雷达广泛应用于考古、岩溶探测、砼路面板底脱空检测、隧道衬砌质量评价及路基分层等方面, 随着探地雷达天线频率的提高和超宽带技术的运用, 应用范围扩大到浅表层目标的识别。

在西藏三大重点文物保护单位壁画保护修复中, 空鼓病害占壁画病害总面积的75%左右^[1], 而在对空鼓病害壁画实施灌浆加固之前, 首先需要了解空鼓病害的分布面积及空鼓程度。由于壁画空鼓病害的埋深一般为2~5 cm, 鲜有超过10 cm^[1-2], 因此, 探地雷达的探测深度达到20 cm就可以满足要求。本文运用瑞典RAMAC探地雷达, 配备中心频率1.6 GHz的屏蔽天线, 在室内模拟检测实验的基础上, 选择4 ns的采样时窗和212 MHz的采样频率, 在涂有清漆或桐油的壁画表面蒙一张透明的硫酸纸, 雷达天线轻贴其上, 采用距离触发的方式进行雷达剖面检测。数据经带通滤波和抽取平均道后, 解译雷达图像并确定空鼓病害的范围, 同时估计壁画空鼓的厚度。

本文提供了探地雷达在超浅表层应用中的经验, 在表层杂波抑制和空鼓厚度估算等方面提出一些亟待解决的技术难题。

1 模拟检测

在测试条件较理想的情况时, 纵向分辨率的极限可达电磁波特征波长的1/10; 而在恶劣的检测条件下, 其分辨率只有特征波长的1/3^[5]。针对一般的岩土体探地雷达检测, 通常将脉冲电磁波特征波长的1/4~1/2视作其纵向分辨率^[6-9], 并据此选择合适的雷达天线。当电磁波的特征波长与空洞或空鼓的厚度比较接近时, 空洞或空鼓的上顶面和下底面在雷达图像上的反射回波信号明显易辨^[10]。由于超宽带无线电技术的应用, 超宽带探地雷达拥有更高的分辨率^[11-14]。

1.1 入射电磁波特征

模拟检测实验使用的探地雷达是瑞典MALÅ GeoScience的通用模块型RAMAC/GPR, 它由控制单元、天线和计算机终端三部分组成。在检测西藏布达拉宫壁画空鼓病害时, 选用当时中心频率最高的1.6 GHz屏蔽天线。目前最新产品是中心频率更高的

2.3 GHz雷达天线, 经由发射天线产生的脉冲电磁波, 如图1所示, 其时域和频域信号特征影响着探地雷达的性能, 尤其决定着雷达的纵向分辨率。

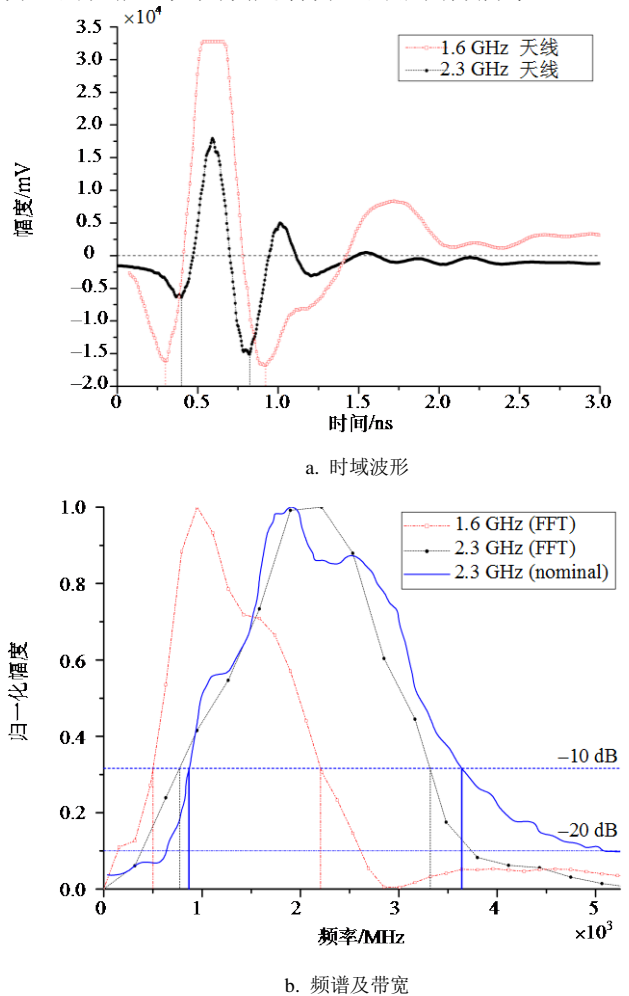


图1 无载波电磁脉冲的时频特征

美国联邦通信委员会(FCC)定义电磁波脉冲信号的带宽由功率谱 $P(f)$ 衰减-10 dB确定^[11,14], 即:

$$P_{dB}(f) = 10 \lg \left(\frac{|A(f)|}{|A_{max}(f_c)|} \right) \quad (1)$$

式中 $P_{dB}(f)$ 为频率 f 时的归一化功率, 单位为dB; $A(f)$ 为频率 f 时的幅度; $A_{max}(f_c)$ 为频率 f_c 所对应的最大幅度。

令 $P_{dB}(f) = -10 \text{ dB}$, 可得 $A(f) = 10^{-1/2} A_{max}(f) \approx 0.32 A_{max}(f)$, 图2b中幅度纵坐标0.32处即对应于-10 dB归一化功率。

在图1b中, 信号经FFT后, 1.6 GHz、2.3 GHz天线发射电磁波的频谱带宽的上界 f_H 和下界 f_L 分别约为502 MHz和2 203 MHz、772 MHz和3 321 MHz。相对带宽为^[11-12]:

$$B = \frac{f_H - f_L}{(f_H + f_L)/2} \times 100\% \quad (2)$$

式中 B 为电磁波频谱的相对带宽; f_H 为带宽的上界, 单位为 MHz; f_L 为带宽的下界, 单位为 MHz。

根据式(2)可以求得 1.6 GHz 和 2.3 GHz 天线的相对带宽分别为 126% 和 125%, 它们都属于超宽带 (UWB) 天线。

1.2 纵向分辨率

RAMAC/GPR 使用步频技术拓展脉冲电磁波的带宽, 有效带宽 B_{eff} 内的中高频成分具有更高的分辨率。由瑞利判据可以推导出探地雷达的纵向分辨率为^[13-19]:

$$\Delta R = \frac{v}{2B_{\text{eff}}} = \frac{c/\sqrt{\epsilon_r}}{2B_{\text{eff}}} \quad (3)$$

式中 ΔR 为雷达纵向分辨率, 也称为垂直分辨率, 单位为 m; v 为脉冲电磁波在介质中的传播速度, 单位为 m/s; B_{eff} 为接收信号频谱的有效绝对带宽, 单位为 Hz; c 为电磁波在真空中的传播速度, 取值 3.00×10^8 m/s; ϵ_r 为介质相对介电常数的实部。

用 Agilent 8510C 单端口矢量网络分析仪测得西藏布达拉宫壁画地仗中白色阿嘎土细泥层和红色阿嘎土粗泥层在 0.2~3.0 GHz 频带范围的相对介电常数分别约为 3.76 和 2.19, 取其平均值为 2.98。对于 1.6 GHz 天线, 其绝对带宽为 1.70×10^9 Hz, 由式(3)可得纵向分辨率为 0.051 m。

式(3)将电磁波在介质中传播的半波长作为雷达的纵向分辨率, 而瑞利准则将波长的 1/4 作为纵向分辨率的极限^[7,17]。在信噪比很高的情况下, 可以将波长的 1/8 作为理论分辨率的极限^[18-22]。另一方面, 用绝对带宽代替有效带宽计算纵向分辨率的方法其实

是一种折中算法, 因为壁画空鼓病害的探地雷达检测属于 10 cm 深度范围内的超浅层应用, 电磁波在干燥地仗层中的双程衰减距离较短, 所以超宽带脉冲信号中分辨率更高的中高频成分可以经地仗—空鼓电性差异界面反射回接收天线。

若将图 1b 中幅度纵坐标为 0.1 时对应的 -20 dB 功率谱作为有效带宽的界定线, 则 1.6 GHz 天线的有效频带范围为 121~2 624 MHz。因此, 在布达拉宫壁画地仗层中传播的电磁波的最小波长 λ_{min} 相应为 6.62 cm, 对应的 $\lambda/8$ 理论分辨率极限约为 8 mm。

1.3 物理模拟实验

为确定合适的 RAMAC/GPR 采集参数, 并掌握相应的数字信号处理方法, 在制作好的麻泥地仗^[2] 中挖设埋深不同且厚度各异的规则空鼓病害, 如图 2 所示; 选用 1.6 GHz 屏蔽天线进行模拟检测和识别, 如图 3 所示。

在图 2 中, 空鼓部位 A、B 和 C 的长度均为 100 mm, 其埋深 h 、厚度 Δh 分别是 (45 mm、5 mm)、(45 mm、23 mm) 和 (27 mm、18 mm)。麻泥地仗的相对介电常数约为 1.74, 介质中电磁波传播的速度为 2.27×10^8 m/s, 即 0.227 m/ns 或 227 m/ μ s, 高于电磁波在干粘土中的传播速度^[7-8,20]。

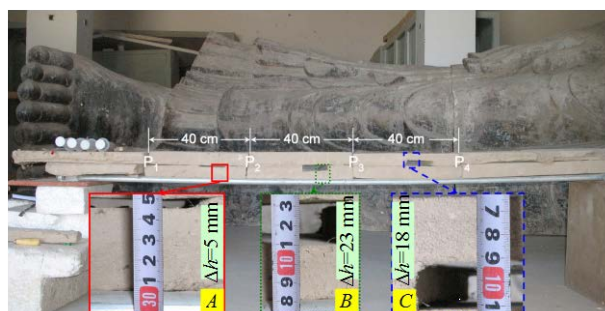
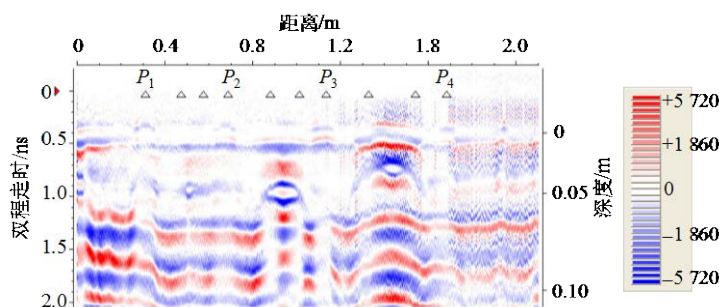


图2 1.6 GHz 天线模拟检测示意图



a. Ground Vision 软件解释结果

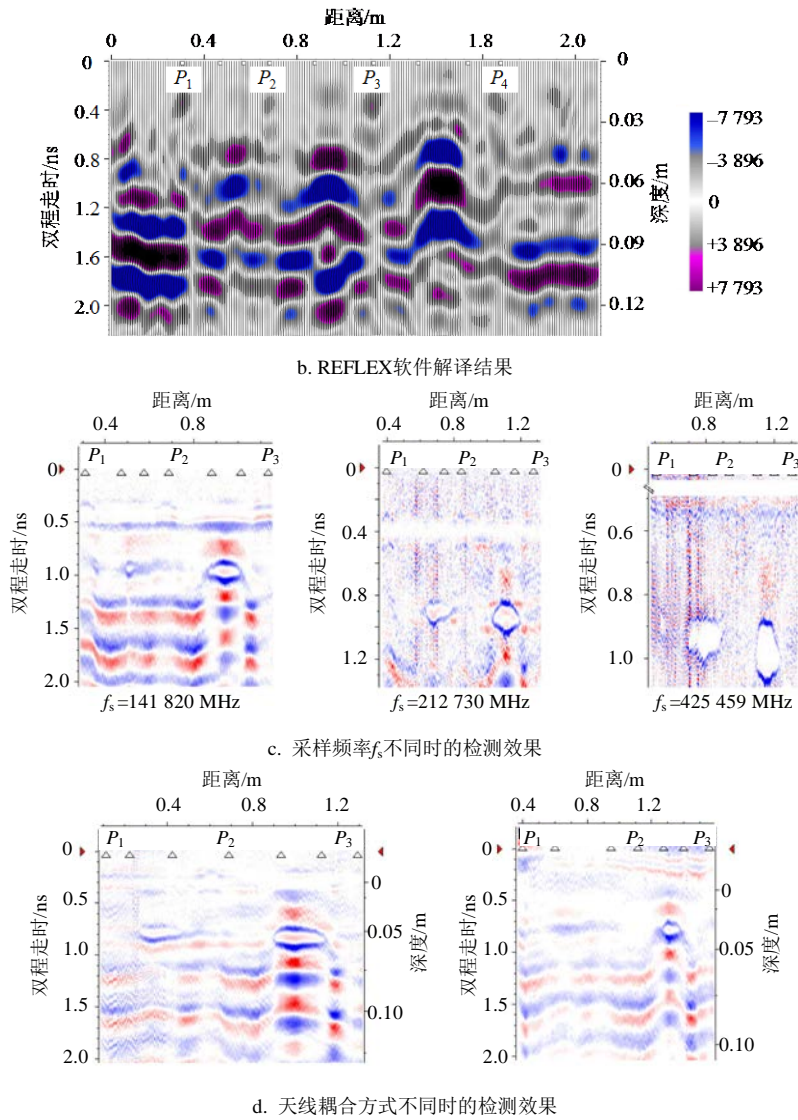


图3 空鼓病害的模拟检测结果

图3a中的雷达剖面长约为2.1 m, 发射信号的触发时间间隔为0.1 s, 历时62.1 s, 共采集得到621道数据, 天线移动的平均速度约为3.38 cm/s。剖面的时间窗口 t 为2.26 ns, 采样频率 f_s 为141.82 GHz, 每道数据的样点数为:

$$N = f_s t \tag{4}$$

由式(4)计算出 N 为320个。因此, 图3a所示为一个320×621的矩阵行列式经滤波处理后生成的雷达剖面。在探地雷达设备随机附带的Ground Vision软件中, 数据经去直流漂移、带通滤波和抽取均道等流程处理后, 空鼓部位在B-scan彩色堆积图^[19-23]中清晰可见。图中, 由于A处的空鼓厚度较小, 在水平区间 P_1P_2 对应的时间深度上辨识较困难; 由于C处空鼓埋深太浅, 其上部的杂波干扰较强; B处空鼓最明显。空鼓的厚度为:

$$\Delta h = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{c(N_t - N_0)t}{2N} \tag{5}$$

式中 Δh 为空鼓的厚度, 单位为m; c 为电磁波在空鼓区间的传播速度, 取值 3.00×10^8 m/s; Δt 为电磁波在空鼓区间传播的双程用时, 单位为s; N_t 为道内空鼓下底面的样点数; N_0 为道内空鼓上顶面的样点数; t 为整道的时间深度, 单位为s; N 为整道的样点数。

式(5)中, t 为 2.26×10^{-9} s, 根据单道波形图可知, N_t 和 N_0 分别为179和155, N 为320, 由此计算得到空鼓的厚度为25.4 mm, 与模拟空鼓的实际厚度非常接近。同理, 空鼓部位C的 N_t 和 N_0 分别为141和123, 其厚度为19.1 mm; 而空鼓A厚度的计算值与真实值偏差较大。

同一雷达剖面数据在REFLEX软件中经去零漂、巴特沃斯滤波、背景去除和F-K偏移等流程处理后的解译成果如图3b所示, 它将彩色堆积图和波形

堆积图融于一体。A、B、C三处空鼓在图中表现较明显，具有波幅骤然增加、同相轴明显的反射界面特征。

不同采样频率下对空鼓A和B的检测效果如图3c所示。采样频率越高，相同时间深度范围内的样点数越多，空鼓病害的顶、底界面越细腻，而且空鼓顶底界面的双程用时相差越大，空鼓病害越严重。

图3d中，当雷达天线与模拟地仗耦合非常好时，A处厚5 mm的空鼓在图中较易辨识。在非接触式检测条件下，由于部分电磁波能量经模拟地仗表面反射回空气，透射入地仗内部的能量较少，因此探地雷达无法检测出厚度较小的空鼓。

模拟检测结果如表1所示。由表1可知，当壁画表面与超宽带探地雷达的天线耦合较好时，雷达图像中的空鼓病害特征非常明显，而且采样频率越大，因空鼓造成的双程回波时延所对应的样点数越多，越有利于雷达图像的解译，但根据式(5)计算得出的空鼓厚度都比较接近。

表1 壁画空鼓病害的模拟检测结果对比

空鼓	几何尺寸/mm		检出的空鼓厚度 Δh /mm				
	埋深	厚度	采样频率/GHz		天线耦合方式		
			142	213	425	壁面	空气
A	45	5	16.5	19.2	15.6	16.5	未检出
B	45	23	25.4	26.6	26.3	25.4	24.7
C	27	18	19.1	/	/	19.1	/

2 现场检测

布达拉宫药师殿南壁的壁画表面涂有一层桐油或清漆，在其上蒙一层宣纸后，1.6 GHz天线轻贴壁面，沿纵横测线检测，如图4所示。宣纸保护区长2.4 m、宽1.2 m，由于探地雷达天线长0.2 m、宽0.1 m，因此实际测试区域长约2 m、宽约1 m。

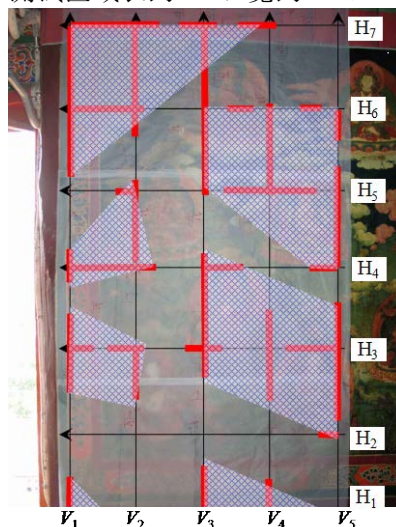


图4 布达拉宫药师殿南壁测线布设及空鼓病害解译结果

图4中，垂直测线和水平测线之间的间距分别约为0.25 m和0.35 m。虽然现场检测时的采样频率为54 190 MHz，时窗深度为10 ns，但根据模拟检测实验，空鼓埋深通常位于时深1 ns附近。在REFLEX软件环境中，雷达数据经去零漂、巴特沃斯滤波、背景去除等处理后，根据每一条剖面的解译结果，绘制出检测区域内的空鼓病害范围，如图5所示。

根据图5可判译出三处较明显的空鼓部位，它们在水平距离轴上的投影区间分别为(0.52,0.68)、(1.05,1.40)和(1.61,2.06)，空鼓最厚处约为12 mm。按相同的方法分析解译其余雷达剖面，将空鼓区间投影到图4中，最后圈定空鼓较严重的范围。

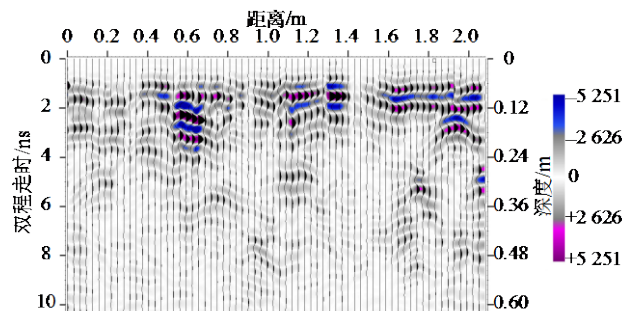


图5 测线V₂的解译结果

3 结论

通常情况下，空鼓的厚度小于1 cm，其埋深不足10 cm，因此在探地雷达的检测过程中只能使用高频屏蔽天线。理论分析表明，1.6 GHz宽频带天线在相应壁画地仗层中的纵向分辨率约为8 mm，而模拟实验结果表明，1.6 GHz天线可辨识出厚度为5 mm的空鼓。

在保证探地雷达数据采集质量的基础上，数字信号处理方法是空鼓病害解译工作的关键，其中带通滤波和均值滤波是效果最明显的两个算法。

当空鼓较厚时，病害在雷达图像上非常明显，并且可根据双程用时计算出空鼓的厚度。对于厚度较小的空鼓病害，虽然可确定其位置，但空鼓厚度的估计值偏大。

参考文献

[1] 李最雄, 汪万福, 王旭东, 等. 西藏布达拉宫壁画保护修复工程报告[M]. 北京: 文物出版社, 2008.
LI Zui-xiong, WANG Wan-fu, WANG Xu-dong, et al. Report on wall painting conservation and restoration project of Potala Palace in Tibet[M]. Beijing: Cultural Relics Press, 2008.

[2] 汪万福, 李最雄, 马赞峰, 等. 西藏布达拉宫东大殿空鼓病害壁画保护修复研究[J]. 中国藏学, 2005, 71(3): 213-

221.
WANG Wan-fu, LI Zui-xiong, MA Zan-feng, et al. Conservation of delaminated wall paintings in eastern hall of Potala Palace in Tibet[J]. *China Tibetology*, 2005, 71(3): 213-221.
- [3] 汪万福, 马赞峰, 李最雄, 等. 空鼓病害壁画灌浆加固技术研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2006, 18(1): 52-59.
WANG Wan-fu, MA Zan-feng, LI Zui-xiong, et al. Consolidating of detached murals through grouting techniques[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2006, 18(1): 52-59.
- [4] 白冰, 周健. 探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(4): 527-531.
BAI Bing, ZHOU Jian. Advances and applications of ground penetrating radar measuring technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(4): 527-531.
- [5] KNÖDEL K, LANGE G, VOIGT H J. Environmental geology, handbook of field methods and case studies[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [6] UDDIN W. Ground penetrating radar study phase I: technology review and evaluation[R]. [S.l.]: Mississippi Department of Transportation, 2006.
- [7] FERNANDES F M C P. Evaluation of two novel NDT techniques: microdrilling of clay bricks and ground penetrating radar[D]. Portugal: University of Minho, 2006.
- [8] TOPCZEWSKI L K. Improvement and application of ground penetrating radar non-destructive technique for the concrete bridge inspection[D]. Portugal: University of Minho, 2007.
- [9] VAN DAM R L, SCHLAGER W. Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses[J]. *Sedimentology*, 2000, (47): 435-449.
- [10] KOFMAN L, RONEN A, FRYDMAN S. Detection of model voids by identifying reverberation phenomena in GPR records[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2006, (59): 284-299.
- [11] 李文超, 王绪本, 邓薇. 超宽带探地雷达探测性能研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(2): 167-171.
LI Wen-chao, WANG Xu-ben, DENG Wei. A study of the performance of UWB-GPR[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2008, 35(2): 167-171.
- [12] 邓薇, 王绪本, 李文超. 基于UWB源的二维地电模型FDTD正演模拟[J]. *工程地球物理学报*, 2006, 3(6): 419-426.
DENG Wei, WANG Xu-ben, LI Wen-chao. The FDTD forward modeling of two dimension geoelectricity based on UWB signal[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2006, 3(6): 419-426.
- [13] NOON D A, STICKLEY G F, LONGSTAFF D. A frequency-independent characterisation of GPR penetration and resolution performance[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1998, (40): 127-137.
- [14] ZHU Jun, TANG Bin, WU Wei, et al. Design and implementation of a cueing wideband digital EW receiver[J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 5(3): 257-264.
- [15] KONG Fan-nian, TORE LASSE B Y. Performance of a GPR system which uses step frequency signals[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1995, (33): 15-26.
- [16] PLUMB R G, NOON D A, LONGSTAFF I D, et al. A waveform-range performance diagram for ground-penetrating radar[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1998, (40): 117-126.
- [17] 甘露, 甘良才, 田茂, 等. 高分辨率探地雷达步进系统的研究与实现[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(3): 555-559.
GAN Lu, GAN Liang-cai, TIAN Mao, et al. Step-sampling system of high resolution ground penetrating radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(3): 555-559.
- [18] SHAO Tian-ge, WANG Jian-guo. Analysis of resolution of bistatic SAR[J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 5(3): 255-259.
- [19] 粟毅, 黄春琳, 雷文太. 探地雷达理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
SU Yi, HUANG Chun-lin, LEI Wen-tai. Theory and application of ground penetrating radar[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [20] GOŁĘBIOWSKI T. 3D GPR measurements for archaeological application with interpretation aided by numerical modeling[J]. *Acta Geophysica*, 2006, 54(4): 413-429.
- [21] 孔令讲, 周正欧. 浅地表探地雷达中改善成像分辨率的一种有效方法[J]. *信号处理*, 2002, 18(6): 505-508.
KONG Ling-jiang, ZHOU Zheng-ou. A effective method of improved resolution for imaging of subsurface ground penetrating radar[J]. *Signal Processing*, 2002, 18(6): 505-508.
- [22] 张立国, 周正欧. 浅地层探地雷达回波倒相的自适应处理[J]. *电子科技大学学报*, 2004, 33(5): 519-522.
ZHANG Li-guo, ZHOU Zheng-ou. Selfadapting processing of the reflecting signal phase inversion of subsurface ground penetrating radar[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2004, 33(5): 519-522.
- [23] 廖立坚, 杨新安, 黄凯, 等. 小波域KL变换用于去除探地雷达直耦波[J]. *工程勘察*, 2008, (6): 72-75.
LIAO Li-jian, YANG Xin-an, HUANG Kai, et al. KL transformation wavelet domain used to get rid of direct coupled wave of GPR[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2008, (6): 72-75.

编辑 黄莘