

# 公路结构检测中探地雷达资料自动解释技术

方慧<sup>1,2</sup>, 肖都<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083 2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**探地雷达技术正被广泛应用于公路结构检测。根据平面电磁波在具有不同物理性质的介质分界面发生的反射和折射规律,利用雷达实测信号的幅值和走时信息实现了路层厚度的快速自动解释,利用数值模拟分析和实测资料对解释技术进行检验,证明了技术的有效性。

**关键词:**探地雷达;公路;结构检测;自动解释技术

**中图分类号:** P631.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2005)02-0146-03

探地雷达技术正在以其无损、精确、高效率、低成本等特点成为公路质量检验、使用寿命评价的重要手段。探地雷达类似于探空雷达,通过发射天线以脉冲形式向地下发射高频电磁波。由于材料的成分、结构以及环境的不同,不同路层的物理性质(如介电常数)存在较明显差异,使雷达波在路层间的分界面上产生反射,并被接收天线接收。通过分析反射波的幅值和走时等信息,可以了解路层的几何及物理特征。公路雷达的一个突出特点是采用空气耦合天线。利用支架使天线悬挂于测量车外,并与地面保持一定距离(通常为50 cm左右)。公路雷达可以以正常车辆行驶速度进行测量,并且不需要封路,十分灵活。

美、英等发达国家早在上世纪90年代就开展了探地雷达公路检测技术专项研究<sup>[1-3]</sup>,研制了用于公路检测的探地雷达专用设备,美国测试与材料学会( ASTM )还制定了探地雷达公路检测技术规范<sup>①</sup>。我国有关行业部门、工程公司和大学等科研部门也完成了多项探地雷达公路检测项目<sup>[4]</sup>,但大多为高等级公路质量检测项目。

探地雷达用于公路结构检测主要用于了解公路各结构层厚度,与其他技术结合,既可用于新建公路质量检验,也可对在用公路现存状况、使用寿命进行评价。影响结构层厚度解释精度的一个重要因素是雷达波在各结构层中传播速度的准确估计。目前求取速度主要技术有如下几种:一种是利用钻探取芯技术获得结构层厚度,再根据雷达记录的时间信息

求取雷达波在各个结构层中的传播速度;二是类似地震测量技术采用宽角法或共深点法求取各个结构层速度;三是利用铺路材料样本在实验室测取样本速度。这些技术普遍存在的问题是得到的速度资料只是局部的。当被检测路段材料的成分、结构变化较小时(如新铺设的公路),局部获得的速度资料用于其他路段的解释可以获得较好的效果,但当材料成分、结构发生变化,或由于外在因素导致材料性质(如破损度、含水量)发生变化,都会引起速度的局部变化,局部的速度资料无法代表整个检测路段的速度特征,造成解释结果出现偏差。要保证解释精度就需有足够多的已知点速度资料,这样又会降低工作效率,提高成本。此外,钻孔取芯还会对路面造成一定程度的破坏,影响公路使用寿命。因此有必要研究更理想的速度求取技术。

2001~2002年,中国地质科学院物化探研究所( IGGE )在香港开展了城市公路探地雷达检测技术实验研究,2004年完成了香港岛区、九龙区近1 000 km城市公路探地雷达检测工作。测量区位于老城区,公路结构、成分复杂,且由于交通流量大,封路钻孔取芯困难,无法提供足够的钻孔资料,给解释工作带来一些困难。针对工作中存在的问题,作者开展了公路结构检测中探地雷达资料自动解释技术研究。本文为初步研究结果。

## 1 基本原理

电磁波在2种不同物理性质的分界面会发生反

① American Society For Testing And Materials. Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar. 1998.

射和折射 ,反射和折射能量的大小与界面上下介质的物理性质有关。反射波与入射波幅值比为反射系数 ,折射波与入射波幅值比为折射系数。当电磁波为垂直界面入射的平面单色波时 ,如果入射波电场垂直入射面 ,对无磁性且位移电流为主的介质 ,电磁波反射系数满足如下规律<sup>[8-9]</sup> :

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

其中  $\rho$  为反射系数 , $E_i$ 、 $E_r$  分别为入射波和反射波的电场幅值 , $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  分别为界面上、下介质的相对介电常数。如果已知上一层介质的相对介电常数 ,就可通过上式求得下一层介质的相对介电常数  $\epsilon_2$  ,进而求得电磁波在下一层介质中的传播速度  $v_2$  :

$$\epsilon_2 = \left(\frac{1-\rho}{1+\rho}\right)^2 \epsilon_1 ; v_2 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_2}} \quad (2)$$

其中  $c$  为光速。

根据上述原理 ,利用探地雷达记录的路层反射信号的幅度可求得公路面层和基层的相对介电常数 ,近似公式如下 :

$$\epsilon_{\text{面层}} = \left[\left(1 + \frac{A_{r1}}{A_{m1}}\right) / \left(1 - \frac{A_{r1}}{A_{m1}}\right)\right]^2 \epsilon_{\text{空气}} \quad (3)$$

$$\epsilon_{\text{基层}} = \left[\left(1 + \frac{A_{r2}}{A_{m2}}\right) / \left(1 - \frac{A_{r2}}{A_{m2}}\right)\right]^2 \epsilon_{\text{面层}} \quad (4)$$

其中  $A_{r1}$ 、 $A_{r2}$  为雷达记录中来自面层和基层的反射信号的幅值 ; $A_{m1}$  和  $A_{m2}$  为来自面层和基层位置的金属板反射信号的幅值。由于电磁场在完全导体(电

导率  $\sigma = \infty$ )内不能存在 ,因此电磁波在完全导体表面将产生全反射 ,即反射波与入射波幅值相等。金属板虽然并非为完全导体 ,但电导率较高 ,且由于雷达波频率很高 ,在金属板内趋肤深度较小(如对于铜金属板 ,1 GHz 电磁波趋肤深度小于  $2.1 \times 10^{-6}$  m) ,雷达波能量损失较少 ,因此金属板表面反射波  $A_{m1}$  和  $A_{m2}$  近似等效于入射波。

根据 (3)、(4) 式得到面层和基层的相对介电常数 ,再根据 (2) 式得到雷达波在不同路层中的传播速度 ,并结合雷达记录中相应路层界面反射信号的走时即可得到不同路层的厚度。应该指出的是 , (1) 式只适用于垂直界面入射的平面单色波 ,并假设介质为无磁性且以位移电流为主的介质 ;而公路雷达波为偶极天线发射的高频电磁脉冲 ,雷达波含有以天线主频为中心一定频带宽度范围内所有频率的成分 ,且为球面波 ,各个路层也都具有一定的导电性 ,因此 (3) 和 (4) 式为近似公式。天线高度越高 ,雷达波到达路面时越接近平面波。

## 2 数值模拟分析

利用正演技术进行了数值模拟分析。模型从上到下为面层—基层—路基 ,其相对介电常数分别为 5、10、20。为检验面层厚度对解释精度的影响 ,选择了 4 种不同面层厚度的模型进行对比分析。天线高度 45 cm ,天线频率为 1 GHz 或 2 GHz。表 1 为模型参数及反演结果。

表 1 数值模型参数及其反演结果

模型	面层参数		基层参数		路基参数	天线频率	面层反演结果			基层反演结果		
	$h/\text{mm}$	$\epsilon$	$h/\text{mm}$	$\epsilon$	$\epsilon$	GHz	$h_{\text{推断}}/\text{mm}$	$e_{\text{绝对}}/\text{mm}$	$e_{\text{相对}}/\%$	$h_{\text{推断}}/\text{mm}$	$e_{\text{绝对}}/\text{mm}$	$e_{\text{相对}}/\%$
模型一	300	5.0			20.0	1	298.33	-1.67	0.5			
模型二	150	5.0	150	10.0	20.0	1	149.17	-0.23	0.2	151.46	1.46	1.0
模型三	70	5.0	150	10.0	20.0	1	71.90	1.90	2.7	153.59	3.59	2.4
						2	71.49	1.49	2.1	148.30	-1.7	1.1
模型四	30	5.0	150	10.0	20.0	1	35.42	5.42	18.1	178.21	28.21	18.8
						2	30.91	0.91	3.0	154.11	4.11	2.7

注  $h$  为层厚度 , $\epsilon$  为相对介电常数 , $e$  为解释偏差。下表同

反演结果表明 :当面层具有一定厚度时 ,反演结果相对偏差远小于 10% ;当面层厚度太薄时(如模型四) ,对于 1 GHz 天线 ,偏差较大 ,但当采用 2 GHz 天线时 ,反演结果十分理想。

产生误差的主要原因为 :①当路层厚度较薄时 ,由于顶底界面的反射波相互干扰使反射波幅值产生畸变 ;②雷达波走时参数的读取是根据相邻界面反射波的峰-峰值间的时差 ,与雷达波在路层中的实际传播时间存在一定偏差 ,路层厚度越薄 ,由此引起的厚度解释结果相对偏差越大。数值模拟分析证明了

上述解释技术的有效性。

## 3 应用实例

为检验解释技术处理实际资料的有效性 ,我们选择了 2 份有代表性的公路探测雷达资料。在对资料进行初步处理后 ,利用专用处理软件自动拾取目标层反射信号的幅值和走时 ,采用上述技术对路层厚度进行解释推断 ,并利用钻探取芯技术对解释结果进行验证。

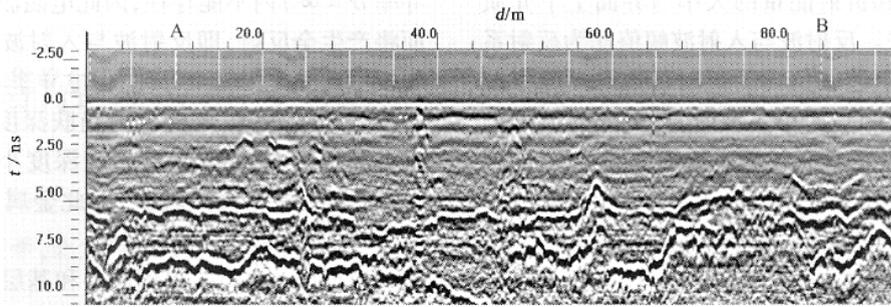


图1 实测剖面一

### 3.1 实例一

测量路段为标准公路段,主要结构可以分为两层:沥青面层和粗沙质路基。采用1 GHz和2 GHz空气耦合天线分别进行测量,采样密度1 scan/25cm。图1为实测剖面,其中A、B两点为钻探取芯位置。解释推断结果及钻探取芯验证结果见表2。验证结果表明最大偏差3.4 cm,相对偏差8.7%。

表2 实例一的面层资料解释及验证结果

位置	天线频率 GHz	$\epsilon$	$h_{\text{推断}}$ cm	$h_{\text{钻探}}$ cm	$e_{\text{绝对}}$ cm	$e_{\text{相对}}$ %
A	1	4.62	37.14	36.5	0.64	1.8
	2	4.64	37.34		0.84	2.3
B	1	4.48	42.43	39.0	3.4	8.7
	2	4.41	42.05		3.1	7.9

### 3.2 实例二

测量路段为简易公路,主要结构可分为3层,自上而下为:薄沥青面层、混凝土基层和粗沙质基层。同样,采用1 GHz和2 GHz空气耦合天线分别进行测量。图2为实测剖面,表3为解释结果及钻探取芯结果。由于面层厚度较薄,解释推断结果偏差较大,而基层的解释精度较高,与数值模拟结果规律一致。对于2 GHz空气耦合天线,由于频率较高,雷达

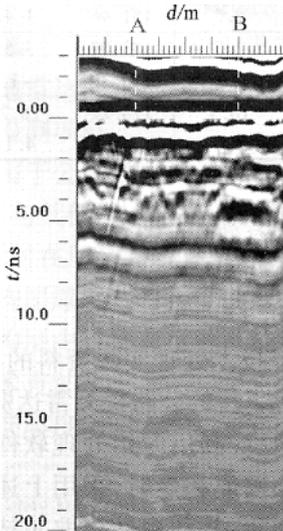


图2 实测剖面二

信号不能穿过基层,因此无法获得基层厚度。

实测结果表明,当路层具有一定厚度时,上述技术可以用于实际资料解释,并且可以得到较高的解释精度;当面层厚度较薄时,解释结果偏差较大,此时,仍需借助钻孔取芯或其他技术获取面层速度资料,以保证解释精度。

表3 实例二资料解释及验证结果

目标层	位置	天线频率 GHz	$\epsilon$	$h_{\text{推断}}$ cm	$h_{\text{钻探}}$ cm	$e_{\text{绝对}}$ cm	$e_{\text{相对}}$ %
面层	A	1	4.62	5.45	4.95	0.5	10.1
		2	4.69	6.50		1.55	31.3
	B	1	4.58	5.14	4.0	1.14	28.4
		2	4.53	5.99		1.99	50.0
基层	A	1	6.83	15.15	16.15	1	6.2
	B	1	6.18	14.74	15.0	0.26	1.7

## 4 结论

根据平面电磁波在不同物理性质的介质分界面发生的反射和折射规律,利用雷达实测信号的幅值和走时信息实现了路层厚度的快速自动解释。利用数值模拟分析和实测资料对解释技术进行了检验,检验结果表明该技术具有速度快、精度高等特点。作为一种实用技术可以应用于公路结构检测探地雷达资料解释中。

### 参考文献:

[ 1 ] Master K R ,Richter C. Ground Penetrating Radar Surveys to Characterize Pavement Layer Thickness Variations at GPS Sites[ R ]. USA :Transportation research Broad. 1993.

[ 2 ] Willett D ,Rister B. Ground Penetrating Radar :Pavement Layer Thickness Evaluation[ EB/OL ]. http://ntl.bts.gov/lib/ 2002.

[ 3 ] INFRASENSE , Inc. Non-Destructive Measurement of Pavement Layer Thickness[ EB/OL ]. http://www.dot.ca.gov/hq/esc/translab/pubs/ 2003.

[ 4 ] 杨天春,吕绍林,王齐仁. 探地雷达检测道路厚度结构的应用现状及进展[ J ]. 物探与化探, 2003, 27( 1 ).

[ 5 ] 李大心. 探地雷达方法及应用[ M ]. 北京:地质出版社,1994.

参考文献：

[ 1 ] 汪源源. 现代信号处理理论和方法 [ M ]. 上海 : 复旦大学出版社 , 2003.

[ 2 ] 王首勇 , 朱光喜 , 唐远炎. 应用最优小波包变换的特征提取方法 [ J ]. 电子学报 , 2003 ( 7 ) : 1305 - 1308.

[ 3 ] Learned Rachel E , Willisky Alan S. A Wavelet Packet Approach to Transient Signal Classification [ J ]. Applied and Computational Harmonic Analysis , 1995 ( 2 ) 265 - 278.

[ 4 ] Won G K M , Wu J , Davidson N N , et al. Wavelet packet division multiplexing and wavelet packet design under timing error effects [ J ]. IEEE Trans Signal Processing , 1997 , 45 ( 12 ) 2877 - 2890.

[ 5 ] Daubechies I. The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis [ J ]. IEEE Trans on Info Theory , 1990 , 36 ( 9 ) 961 - 1005.

## THE APPLICATION OF WAVELET PACKET TRANSFORM TO THE ANALYSIS OF RADAR SIGNALS

WANG Wei , ZHENG Zheng-qi , WANG Xiao-hua , XIA Wei  
( School of Information , East China Normal University , Shanghai , 200062 China )

**Abstract :** In this paper , the theory of using triangular radar to detect the metallic target is discussed , and the wavelet packet transform and its algorithm are also described in detail. The method of applying wavelet packet transform to pick up characteristics of radar signals is recounted , and the in-door experimental detection results are given.

**Key words :** [ WT5 "BZ ] triangular wave , Ground Penetrating Radar , wavelet packet transform , signal analysis

作者简介 : 王曦 ( 1978 - ) 女 , 山东人。华东师范大学 2002 级硕士研究生 , 主要研究方向 : 雷达探测、信号处理。

上接 148 页

## THE AUTOMATIC INTERPRETATION TECHNIQUE OF GROUND-PENETRATING RADAR DATA IN HIGHWAY STRUCTURE INSPECTION

FANG Hui<sup>1,2</sup> , XIAO Du<sup>2</sup>

( 1. China University of Geosciences , Beijing 100083 , China ; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration , CAGS , Langfang 065000 , China )

**Abstract :** The ground-penetrating technique has been widely used in highway structure inspection. According to the regularities of reflection and refraction of the surface electromagnetic wave that take place at the interface between media with different physical properties , the amplitude and travelttime information of the radar-measured signal was used to realize the rapid automatic interpretation of road layer thickness. The numerical simulation analysis and the measured data were utilized to test the interpretation technique , and the result proves the effectiveness of this technique.

**Key words :** ground-penetrating radar ; highway inspection ; automatic interpretation

作者简介 : 方慧 ( 1965 - ) 男 , 教授级高级工程师 , 1986 年毕业于长春地质学院 , 获学士学位 , 1993 年获中国地质大学 ( 北京 ) 硕士学位 , 在读博士。现就职于中国地质科学院物化探所 , 主要从事电磁法方法技术研究。