

文章编号:0253-9993(2013)S1-0174-06

# 不同水分条件下探地雷达电磁波波速估算方法与对比分析

王新静,赵艳玲,胡振琪,王培俊,杨耀淇

(中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所,北京 100083)

**摘要:**通过对地下管线在雷达图像的响应特征的分析,提出了基于 Levenberg-Marquardt 的一种双曲线拟合并计算电磁波速的方法,在此基础上,采用 GR-III 型探地雷达系统对不同土壤含水条件下的地下管线进行探测,并将该方法应用于地下管线深度的提取,并与介电常数法和已知埋深反算法计算结果进行了精度的对比分析。结果显示:土壤体积含水量由 17.020% 增至 25.333% 时,基于 Levenberg-Marquardt 算法的双曲线拟合法计算电磁波速与实际值的差值均约为 0.9 cm/ns,误差率约为 8%,而基于介电常数法计算结果的误差由 1.097 cm/ns 增至 1.670 cm/ns,误差率由 9.613% 增至 16.510%。研究结果表明,基于 Levenberg-Marquardt 算法的双曲线拟合法更简便有效,适用于野外不同水分条件下的未知埋深的地下管线的空间位置检测工作。

**关键词:**探地雷达;波速;Levenberg-Marquardt 算法;双曲线拟合;介电常数

**中图分类号:**P225.1 **文献标志码:**A

## Estimation method and comparative analysis of ground penetrating radar electromagnetic wave velocity based on different water contents

WANG Xin-jing, ZHAO Yan-ling, HU Zhen-qi, WANG Pei-jun, YANG Yao-qi

(Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Through the analysis of the response characteristics of underground pipe in GPR image, a method of hyperbolic fitting based on Levenberg-Marquardt algorithm to calculate the electromagnetic wave speed was presented. On this basis, underground pipe was detected by GR-III ground-penetrating-radar under different soil water contents in experiment model, and the new method was used to calculate the depth of underground pipe. The calculation was compared with some traditional methods such as Permittivity method and the anti-calculate-algorithm under the known depth. The results show when the soil moisture content increases from 17.020% to 25.333%, the all errors of the electromagnetic wave of the new method is about 0.9 cm/ns, the error rate is about 8%. However, the permittivity method's error increases from 1.097 cm/ns to 1.670 cm/ns, the error rate range from 9.613% to 16.510%. The results indicate that the hyperbolic fitting under Levenberg-Marquardt algorithm is more applicable to detect the spatial location of the underground pipe under the different water conditions.

**Key words:** ground penetrating radar; velocity; levenberg-Marquardt algorithm; hyperbolic fitting; permittivity

伴随着各省份土地整理项目的不断推进,作为“生命线”的地下管线工程的快速检测工作也显得尤为重要。目前,国内部分学者开始尝试将探地雷达无损探测技术应用其中,用于对其空间位置进行定位。

探地雷达是一种常用的无损探测装备,通过发射天线向地下空间发射电磁波,利用地下物体之间的介电性质的差异而产生的发射信号,通过接收天线进行收集,并通过现代信号处理技术,提取地下介质的分布

收稿日期:2012-04-09 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2008BAB38B03-02)

作者简介:王新静(1984—),男,河南焦作人,博士研究生。E-mail: wangxinjing888@163.com。通讯作者:胡振琪(1963—),男,安徽五河人,教授,博士生导师。E-mail: huzq@cumt.edu.cn

情况<sup>[1-2]</sup>。

探地雷达对地下管线的空间定位,影响其纵向探测精度的主要有双程走时和雷达波在介质中传播速度。目前探地雷达传播速度主要计算方法有介电常数法、已知埋深反算法、共中心点法、霍夫变换法以及双曲线拟合算法等<sup>[3-8]</sup>,多基于单一水分条件下的室内模拟,针对于特定的实验条件具备各自的优势。而在野外,不同监测时段土壤的含水情况的变化,势必对管线的空间定位带来影响与误差,采用何种方法进行电磁波波速计算是关键所在。本文通过对地下管线在雷达图像的响应特征的分析,提出基于 Levenberg-Marquardt (LM) 算法的双曲线拟合法。在此基础上,通过野外模拟试验,利用该方法,对实验区不同土壤含水条件下获取的地下管线的深度信息进行了提取,并结合传统的电磁波计算方法,例如介电常数法以及已知埋深求解法,将 3 种方法的计算结果进行对比分析,探求不同水分条件下简易适用性更广的波速计算方法,以便更好地应用于工程实践中。

## 1 算法简介

### 1.1 介电常数法

GPR 在采用高频电磁波进行地下管线探测时,波速主要取决于穿越介质的介电常数,电磁波的传播速度  $v$  可表示为

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \left( \frac{1}{2} \mu \varepsilon \sqrt{1 + \tan^2 \delta_e} + 1 \right)^2 \quad (1)$$

式中, $\omega$  为角频率,rad/s; $\beta$  为相移系数,rad/m; $\mu$  为磁导率,H/m; $\varepsilon$  为介电常数; $\tan \delta_e$  为损耗角正切。

对低耗土壤检测时,满足介电极限条件  $\tan \delta_e \ll 1$ ,故式(1)可简化为

$$v = c / \sqrt{\varepsilon} \quad (2)$$

其中, $c$  为电磁波在真空中的传播速度, $3.0 \times 10^8$  m/s; $\varepsilon$  为介质的相对介电常数。 $\varepsilon$  获取的准确与否直接影响电磁波在该介质中传播速度的计算精度。由于土壤是复杂的三相体,在 1 MHz ~ 1 GHz 频段范围内,介电常数很大程度上取决于土壤的体积含水量,而土壤结构、密度、含盐量对它的影响很小,目前 Topp 公式<sup>[9]</sup>是经验公式中反演效果最好的,计算误差为  $0.013 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,最佳适用范围为土壤密度  $1.25 \sim 1.50 \text{ g}/\text{cm}^3$ <sup>[10]</sup>,本研究土壤密度特性在此范围之内。Topp 公式模型如下:

$$\varepsilon = 3.03 + 9.3\theta_v + 146.0\theta_v^2 - 76.0\theta_v^3 \quad (3)$$

式中, $\theta_v$  为介质的体积含水量,%。

### 1.2 已知埋深反算法

公式为  $v = 2h/t_0$ ,其中  $h$  为已知埋设物的埋深, $t_0$

为雷达图像上的发射信号刚好触及地下管线顶点时初次波的时间。这种方法比较简易,且计算的电磁波速最为准确,更贴近实际。

该方法中顶点位置的识别是关键步骤,不同于一般具有明显水平分层的介质,地下管线的反射特征曲线的顶点坐标  $(x_0, t_0)$  的精确提取相对比较困难。需要模式识别和人工提取的相结合方式,并通过一定的算法才能实现,具体方法在 1.3 节中介绍。

### 1.3 基于 LM 算法的双曲线拟合法

通过对地下管线反射的电磁波运行轨迹的分析,可以建立其几何特征参数和估计参数的函数关系<sup>[11]</sup>。

$$\frac{[t_i + (2R/v)]^2}{[t_0 + (2R/v)]^2} - \frac{(x_i - x_0)^2}{[(t_0 v/2) + R]^2} = 1 \quad (4)$$

$$t_i = \frac{2}{v} \left[ \sqrt{\left( \frac{1}{2} v t_0 + R \right)^2 + (x_i - x_0)^2} - R \right] \quad (5)$$

式中, $x_i$  为反射面上第  $i$  个反射点到地下管线中心的水平距离; $t_i$  为第  $i$  点到地下管线的双程走时; $(x_0, t_0)$  为反射曲线的顶点坐标; $R$  为圆柱体的半径。

从式(4)可以看出,圆柱体的反射曲线符合严格的双曲线数学描述,其中  $(x_0, t_0, R, v)$  为 4 个未知参数,而  $(R, v)$  值的选取并不影响顶点坐标  $(x_0, t_0)$  最终的确立,且顶点坐标  $(x_0, t_0)$  估计的正确与否在很大程度上决定物体深度计算的准确性。从参数估计的角度来讲,可以通过 Levenberg-Marquardt 算法<sup>[6,11]</sup>,利用一系列的坐标对  $(x_i, t_i)$  在不考虑  $(R, v)$  的取值情况下去估计最优的  $(x_0, t_0)$ 。

在顶点坐标估算出来的基础上,当  $R=0$  时,计算的  $v$  值为电磁波的最大传播速度  $v_{\max}$ ,比真实值相对较大。在已知地下管线的半径的前提下,利用非线性最小二乘算法,给定一个很小的步长,不断减少  $v_{\max}$  值,通过不断迭代,使得

$$\min \sum_{i=1}^n (t_i - t'_i)^2$$

成立,这时  $R$  的值接近于地下管线半径的真值, $v$  值为电磁波在该介质中的真实传播速度  $v_0$ 。算法流程如图 1 所示。

## 2 实验设计

实验区位于中国矿业大学(北京)民族楼东南角的一个空地上,开挖一条长度约为 6 m、宽度为 1 m 的凹槽,在其中分别布设不同管径、材质的管线,埋深均为 0.5 m,对所开挖的土壤进行分层堆放,并用铁丝网进行筛选,分层回填,并进行适当的压实,回填至预期设定的水平线,布设情况如图 2 所示,分别在

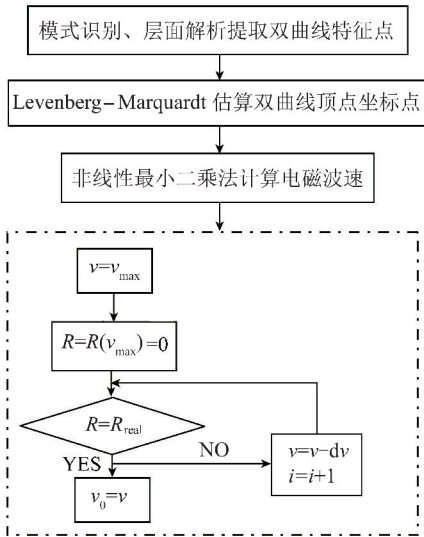


图 1 基于 Levenberg-Marquardt 估算电磁波传播速度的流程

Fig. 1 Flow chart of the electromagnetic wave propagation velocity estimated based on Levenberg-Marquardt

$R=45$  mm 的 PVC 管和  $R=30$  mm 的铁管周围布设中子仪铝管。根据管线埋深以及探地雷达波动方程<sup>[12-13]</sup>,采用 CNC100 智能中子仪和天线中心频率为 400 MHz 和 750 MHz 的 GR-III 型探地雷达系统进行数据采集。2011-11-01 进行初次试验,11 月 6 日

降雨后进行第 2 次实验。

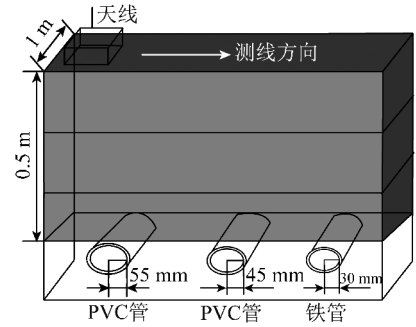
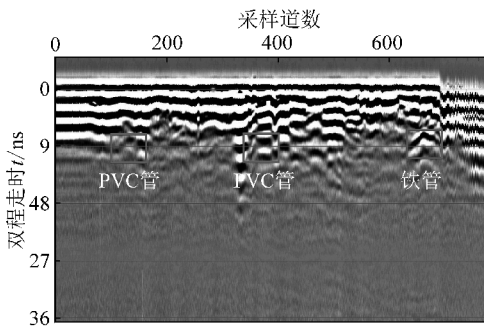


图 2 实验模型

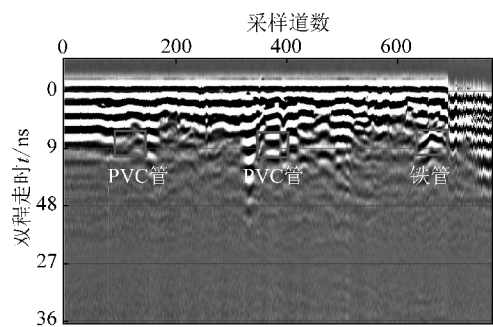
Fig. 2 Experiment model

### 3 探地雷达实验

根据中子仪标定方程,计算得到中子仪的周围土壤不同层次的水分含量,分析结果显示每个层位间的水分含量差异性不显著( $p>0.05$ ),基于此,建立土层深度与土壤体积含水量的函数模型,并将函数模型经过分段积分法,获取实验区经过不同水分处理后,其 0.5 m 以上的土壤平均体积含水量分别为 17.020%, 25.333%。图 3,4 为经过冗余数据删除、漂移去除、背景去噪、一维滤波、时窗增益<sup>[14]</sup>等多项预处理后的探地雷达图像。



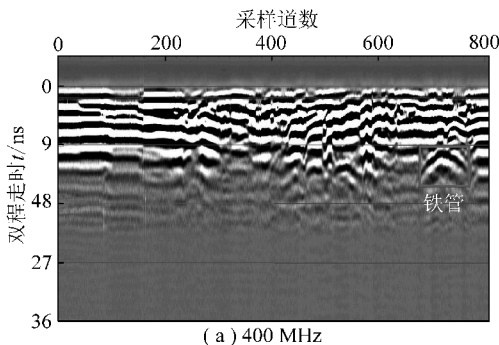
(a) 400 MHz



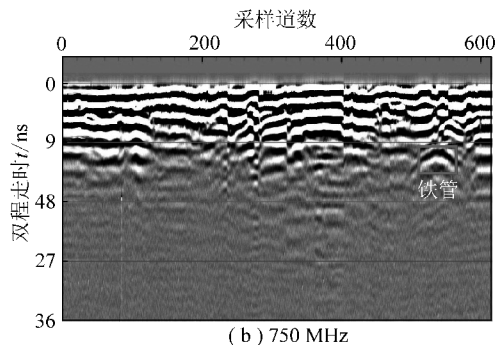
(b) 750 MHz

图 3 土壤含水量为 17.020% 时不同天线频率探地雷达剖面

Fig. 3 Ground penetrating radar profile of different antenna frequency (17.020%)



(a) 400 MHz



(b) 750 MHz

图 4 土壤含水量为 25.333% 时不同天线频率探地雷达剖面

Fig. 4 Ground penetrating radar profile of different antenna frequency (25.333%)

从图 3,4 可以看出,铁管在不同水分处理的情况下,均有明显的反射信号,在剖面上显示为双曲线,而 PVC 管随着土壤含水量的增加其显示特征开始减弱,在土壤含水量增至 25.333% 时,显示特征难以辨别。相关研究表明,电磁波的反射能力与物体间的介电常数的差异成正相关<sup>[15]</sup>,而目标体的介电常数值仅与材质或自身含水量有关,为方便起见,笔者以铁管作为研究对象。而对于铁管,电磁波触及该介质的时间随着水分的增大而变长,即双程走时变大,故在进行野外作业时,应充分考虑土壤含水量的影响,不能采用单一不变的电磁波速进行估算地下管线的深度。

### 4 算法实践与对比分析

#### 4.1 基于介电常数法的电磁波速计算

利用式(2)和式(3)以及地下管线上覆土壤的平均体积含水量,即可求得电磁波在该土壤介质中的平均传播速度。计算结果见表 1。

表 1 介电常数法计算波速

Table 1 Wave velocity by permittivity method

体积含水量/%	介电常数 $\epsilon$	平均速度/( $\text{cm} \cdot \text{ns}^{-1}$ )
17.020	8.468	10.304
25.333	12.621	8.445

#### 4.2 基于 LM 算法的双曲线拟合的电波波速计算

以铁管作为研究对象,通过模式识别和人工提取的方式,根据雷达各个采样道的能量的变化,取铁管周围时窗范围内的每个采样道能量梯度变化最大值的采样点为特征点,结合配套软件中的“层面解析”技术,特征点提取的效果如图 5 所示。

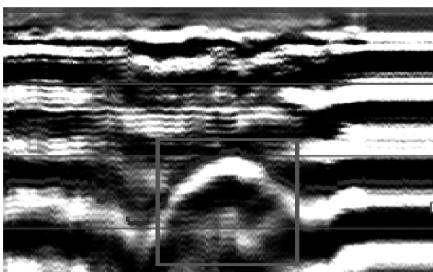


图 5 特征点提取示意

Fig. 5 Extraction of feature points

在此基础上,利用 LM 算法对特征点进行拟合,求取其双曲线的顶点坐标,拟合效果如图 6,7 所示。

LM 算法拟合的双曲线的顶点坐标以及精度分析见表 2,选取均方差 (RMSE)、残差平方和 (SSE)、相关系数的平方 (R-square) 作为评判算法拟合效果的因子。

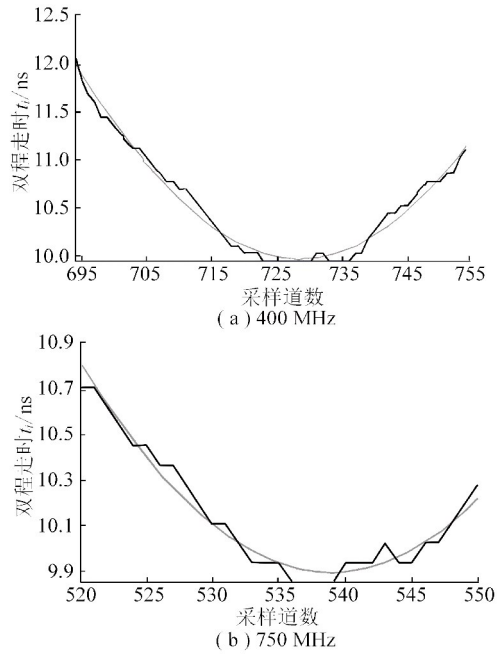


图 6 含水量为 17.020% 时 Levenberg-Marquardt 算法拟合的双曲线顶点效果

Fig. 6 Hyperbolic vertex fitting by Levenberg-Marquardt algorithm (soil water content 17.020%)

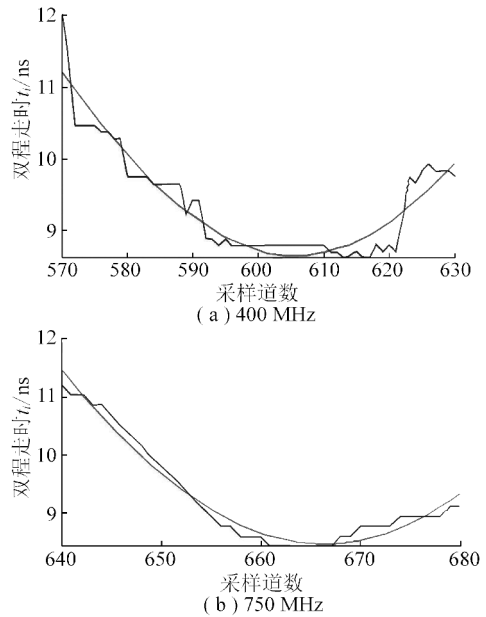


图 7 含水量为 25.333% 时 Levenberg-Marquardt 算法拟合的双曲线顶点效果

Fig. 7 Hyperbolic vertex fitting by Levenberg-Marquardt algorithm (soil water content 25.333%)

表 2 表明,不同天线频率在相同实验条件下,LM 算法估算的精度非常高,拟合的双曲线的  $t_0$  值基本一致,  $x_0$  的不同是因为采样时,叠加次数不同导致的,在进行双曲线拟合时,只需要知道各个特征点之间的水平差值 (即道间距,道间距等于采样经过的水平距离除以采样道总数) 即可。在估算出双曲线的

表 2 顶点坐标和精度分析  
Table 2 Vertex coordinates and accuracy analysis

土壤含水量 $Q/\%$	天线频率/MHz	$x_0$ (道数)	$t_0/\text{ns}$	RMSE	SSE	R-square
未降雨 17.020	400	605	8.752	0.242	0.351	0.925
	750	666	8.791	0.072	0.213	0.973
降雨后 25.333	400	723	9.883	0.080	0.392	0.982
	750	534	9.890	0.048	0.071	0.968

顶点坐标( $x_0, t_0$ )基础上,根据道间距、管径大小、式(4)以及算法要求,计算出电磁波在该水分条件下的传播速度,计算的结果见表3。

表 3 不同天线频率下电磁波传播速度  
Table 3 Electromagnetic wave propagation velocity of different antenna frequency

土壤含水量 $Q/\%$	天线频率/MHz	电磁波速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{ns}^{-1}$ )	平均速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{ns}^{-1}$ )
未降雨 17.020	400	10.533	10.575
	750	10.617	
降雨后 25.333	400	9.150	9.214
	750	9.277	

从表2,3可以看出,地下管线上覆土壤的平均体积含水量由17.020%增至25.333%的时候,电磁波触及铁管的双程走时由8.8 ns左右增至9.9 ns,出现1.1 ns的延迟,电磁波传播速度由10.575 cm/ns左右减少至9.214 cm/ns。

#### 4.3 已知埋深反算法的电磁波速计算

根据铁管的埋深以及表2中利用LM算法估算的顶点纵坐标 $t_0$ ,计算结果见表4。

表 4 已知埋深反算法计算电磁波速  
Table 4 Anti-calculate the Electromagnetic wave propagation velocity under known-depth

土壤含水量 $Q/\%$	天线频率/MHz	电磁波速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{ns}^{-1}$ )	平均速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{ns}^{-1}$ )
未降雨 17.020	400	11.426	11.401
	750	11.375	
降雨后 25.333	400	10.118	10.115
	750	10.111	

## 5 结论与探讨

以已知埋深反算法计算的电磁波速为实际传播速度 $v_0$ ,表1,3和表4表明,在不同含水条件下,采用介电常数法和基于LM算法的双曲线拟合法计算的电磁波速与 $v_0$ 的差值分别为1.096,1.670和0.826,

0.901 cm/ns,误差率分别为9.613%,16.510%和7.245%,8.908%,从上述的分析可知,采用介电常数法计算的电磁波速与 $v_0$ 的差值较大,且随之土壤含水量的增加误差也随之增加,而采用基于LM算法的双曲线拟合法与实际结果相似。从管线的埋深角度来考虑,介电常数计算的管线的埋深分别为45.190,41.752 cm,随土壤水分含量的增加,其计算结果误差也随之增加,而基于LM算法的双曲线拟合法计算的实际埋深均约为46 cm,与实际结果更为接近。出现这种情况的原因为:

(1)由于含水量的增加,导致电磁波在该介质中的损耗增大,从而可能导致 $\tan \delta_0$ 取值变大,而在采用式(2)计算时,忽略其取值,从而人为导致电磁波速的值变小,与实际差值变大。

(2)采用Topp公式反演介电常数时,部分学者如Weitz认为Topp公式在计算多孔隙湿润土壤的体积含水量时,会比真实值低5%~10%,即用体积含水量反演介电常数时,介电常数值会较之实际值增大,从而也导致电磁波速的值变小。

从上述分析结果可以看出,土壤水分含量的大小直接影响介电常数法计算精度,在进行应用时,应根据土壤组成的实际情况,建立该区域修正的Topp公式或者通过室内测定分层土壤的介电常数,而采用基于LM算法的双曲线拟合法基本不受其影响,接近实际,可用于野外不同水分条件下未知埋深的地下管线的空间位置检测工作。

#### 参考文献:

- [1] 曾昭发,刘四新,王者江,等.探地雷达方法及应用[M].北京:科学出版社,2006:71.
- [2] 刘传孝,蒋金泉,杨永杰,等.国内外探地雷达技术的比较与分析[J].煤炭学报,2004,27(2):123-127.
- [3] Liu Chuanxiao, Jiang Jinquan, Yang Yongjie, et al. Comparison and analysis of domestic and international ground-penetrating radar technology[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 27(2): 123-127.
- [3] 袁明德.探地雷达检测中如何计算波速[J].物探与化探,2003,27(3):220-223.
- Yuan Mingde. How to calculate the wave velocity of ground-penetrat-

- ing radar [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2003, 27(3):220-223.
- [4] 李廷军,周正欧. 探地雷达中双曲线的提取及在波速估计中的应用[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(1):124-128.  
Li Tingjun, Zhou Zheng'ou. Extraction of hyperbolic signatures and application for propagation velocity estimation in GPR [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(1):124-128.
- [5] Anatoly Dolgiy, Andrey Dolgiy, Vladimir Zolotarev. Optimal radius estimation for subsurface pipes detected by ground penetrating radar [A]. 11th International Conference on Ground Penetrating Radar [C]. Columbus Ohio, USA, 2006.
- [6] Aleksandar Vaso Ristic, Dusan Petrovacki, MiroGovedarica. A new method to simultaneously estimate the radius of a cylindrical object and the wave propagation velocity from GPR data [J]. *Computers & Geosciences*, 2009(35):1620-1630.
- [7] Paul O'Leary. Direct and specific least-square fitting of hyperbola and ellipses [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(3):492-503.
- [8] 胡进峰,周正欧,罗仁泽. 一种前视探地雷达波速估计方法[J]. *电子学报*, 2007, 35(6):1113-1117.  
Hu Jinfeng, Zhou Zhen'ou, Luo Renze. Research on forward-looking ground penetrating radar velocity [J]. *ACTA Electronica Sinica*, 2007, 35(6):1113-1117.
- [9] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content; measurements in coaxial transmission line [J]. *Water Resources Research*, 1980(16):574-582.
- [10] 王春晖. 探地雷达方法测量近地表含水量及污染物探测 [D]. 吉林: 吉林大学, 2007:20-21.
- [11] Donald W Marquardt. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters [J]. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1963, 11(2):4310-4341.
- [12] 戴前伟,吕绍林,肖彬. 地质雷达的应用条件探讨 [J]. *物探与化探*, 2004, 24(2):157-160.  
Dai Qianwei, Lü Shaolin, Xiao Bin. Discussion on the conditions of application of the geological radar [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2000, 24(2):157-160.
- [13] Cook J C. Radar transparencies of mine and tunnel rocks [J]. *Geophysics*, 1975, 40(5):865-885.
- [14] 彭亮,徐清,朱忠礼,等. 应用低频微波波段 GPR 测量土壤结构 [J]. *北京师范大学学报*, 2007, 43(3):324-329.  
Peng Liang, Xu Qing, Zhu Zhongli, et al. Mapping the soil layers and texture with Ground-Penetrating-Radar [J]. *Journal of Beijing Normal University (Nature Science)*, 2007, 43(3):324-329.
- [15] 孙洪星. 有效介质高频脉冲电磁波传播衰减理论与应用的实践研究 [J]. *煤炭学报*, 2001, 26(6):567-572.  
Sun Hongxing. Theory and application study on attenuation behaviors in heterogeneous medium about high frequency impulses electromagnetic wave [J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(6):567-572.