

浅地层探地雷达波速测量方法的研究

孔令讲,周正欧

(电子科技大学 704 教研室,四川成都 610054)

摘 要: 波速的测量在探地雷达的研究中一直是一个至关重要的课题,尤其是对地下目标进行定位和成像时;本文针对浅地层探地雷达接收信号的特征,抛弃传统的过零点检测和其他的边缘轮廓检测方法,提出用极值进行边缘轮廓检测的方法,从而对目标的提取更准确并且有较少的数据,减少了霍夫变换的计算量;通过对霍夫变换算法的分析,针对传统霍夫变换的缺点,提出了一种加 FIR 低通滤波器的改进霍夫变换;同时应用算法对实测数据进行了计算,证明所提算法比传统的霍夫变换方法有更高的测速准确度。

关键词: 探地雷达;霍夫变换;过零点;边缘轮廓;双曲线

中图分类号: TN955.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 09-1330-03

Research on Measurement of Wave Speed for Sub-Surface Penetrating Radar

KONG Ling-jiang, ZHOU Zheng-ou

(Dept. of Electronic Engineering, Teaching Group 704, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: The measurement of wave speed is always one of the key problems in the research of subsurface penetrating radar, particularly when the location and image of the targets in the ground are measured. On the basis of the signal features of subsurface penetrating radar, extraction of edge contours which uses zero-crossing points and others traditional methods are discarded. The method of extremum is given for extraction of edge contours. The edge contours of the targets can be extracted more accurately using the method of extremum and the new method generates less data for Hough transform. And according to the analysis of Hough transform and the deficiency of traditional Hough transform, an improved Hough transform is proposed in which a FIR low-pass filter is added to improve the accuracy of Hough transform. The improved Hough transform has better performance than the traditional Hough transform by the evaluation for the practical data.

Key words: subsurface penetrating radar; Hough transform; zero-crossing; edge contour; hyperbola

1 引言

地下目标的定位对于很多行业都是一种非常重要的技术,比如:地下电缆,地下的水气管道,埋藏在地下的军械等。尤其是这些目标的位置和深度,因此,探地雷达已经被广泛深入的研究。

实现这样雷达的一种简单的方法就是垂直地面发射脉冲,并且接收与传播路径相关的来自目标的回波,测得回波的接收时间。探地雷达的目标是确定目标的位置和深度,为改善方位分辨率,合成孔径成像的方法在文献[1]被提出来,但是这种方法需要知道雷达波在地下的传播速度;对目标的尝试的测量也需要知道电磁波在地下的波速。因此,在探地雷达中,对电磁波在介质中的传播速度的测量是非常重要的。波速的准确度直接决定了目标的定位是否准确,波速的测量在探地雷达的研究中也一直是一个至关重要的课题。特别是浅层目标,波速的准确度对目标的定位是否准确影响更大。

由于目标回波产生双曲线的雷达图像,因此可以通过回波的双曲线形状确定波速。边缘检测和曲线拟合是最简单的图像处理方法;文献[2]基于两次霍夫变换提出一种测量波速的图像处理方法,但是这种方法的抗噪声性能比较差而且两

次霍夫变换的处理时间较长,针对这一缺点作者提出一种改进的霍夫变换方法,对数据的处理结果证明改进的霍夫变换方法比原来的方法有更高的测量准确度和更短的处理时间。文献[10]提出一种改进的霍夫变换,但该算法主要是针对霍夫变换的离散和三维参数空间的处理,而且该算法只适用于中距离(0.5~5米)的探地雷达。

对于边缘检测,文献[2]中提出一种过零点进行边缘检测的方法;文献[3]中提出了一种对过零点交替用+1和-1标识的边缘检测方法。但是对于浅层地下目标这些方法存在一定的缺陷,特别是地表反射回波零时刻的确定。作者提出针对目标的特性用极值进行边缘检测的方法。

2 雷达图像的特性

对雷达回波产生双曲线图像的特性在这部分给一个几何的解释。假设雷达使用收发共置天线,在地面沿同一个水平方向移动就得到一个二维的雷达图像,垂直轴和水平轴分别指示目标的水平位置和目标深度,并且假设介质是均匀的,因此波速是常数,针对浅层目标这种假设更加合理。

假设 x_0 和 z_0 分别表示目标水平位置的坐标和目标的深度。从目标到天线的距离用 D 表示, x_a 表示天线的水平位置,

收稿日期:2001-06-25;修回日期:2002-02-28

因此有方程:

$$D = \sqrt{(x_a - x_0)^2 + z_0^2} \quad (1)$$

脉冲回波的响应时间 $t(x_a)$ 用下方方程给出, 其中 v 是地下的电磁波传播速度.

$$t(x_a) = 2D/v = \sqrt{4(x_a - x_0)^2/v^2 + t_0^2} \quad (2)$$

所有的坐标轴被离散化后, 可记: $t = jdt$, $x_a = idx$, $x_0 = i_0dx$, $t_0 = j_0dt$

离散化后可以得到下面的双曲线参数方程:

$$j = \sqrt{\beta(i - i_0)^2 + j_0^2} \quad (3)$$

其中, $\beta = \frac{4dx^2}{dt^2v^2}$

在边缘图像中任意选择三个不同的点就可以解得 β , i_0 , j_0 的值. 从而得介质中的波速为: $v = \frac{2dx}{dt\sqrt{\beta}}$, 目标位置为: $x_0 = i_0dx$, 目标深度为: $z_0 = vj_0dt$.

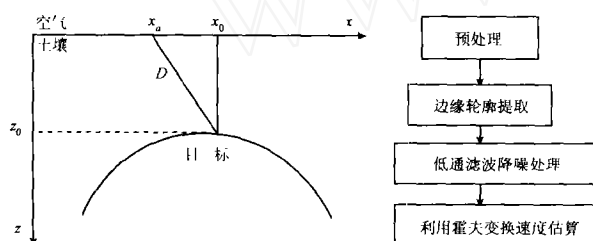


图 1 目标和雷达之间的简单几何关系 图 2 算法流程图

3 算法

改进的算法包括四个处理过程, 如图 2 所示. 预处理主要是为了降低图像中噪声的影响; 边缘轮廓提取用来提取目标脉冲回波; 低通滤波是为了进一步降低回波双曲线轮廓中噪声对霍夫变换的影响. 最后用霍夫变换对速度进行估算.

(1) 预处理

原始的雷达图像通过局部窗口平均来降低噪声的影响. 假设 $p(i, j)$ 表示原始图像, i 和 j 分别是天线水平和沿响应时间轴的坐标. 则预处理后的图像 $b(i, j)$ 变为:

$$b(i, j) = \sum_{m=-w}^w \sum_{n=-w}^w p(i+m, j+n) / (2w+1)^2 \quad (4)$$

其中 $(2w+1)$ 是窗口的尺寸.

(2) 边缘轮廓提取

脉冲回波的响应时间 $t(x_a)$ 由下面的关系给出: $t(x_a) = j_e^* \tau$, 其中 j_e 和 τ 分别是边缘的位置和沿垂直轴每个像素的单位时间. 由于雷达回波是浅层目标回波, 地面和目标的回波都比较强, 因此可以用极值来进行边缘轮廓的提取. 具体方法是先判定图像中每一个 A 扫数据的极值区域, 然后在极值区域内取得极值及其所在的位置. 保留这些极值并且置 '1', 非极值点置 '0'. 可以看到, 图像的边缘轮廓已经被提取出来 (包括地表参考线和回波双曲线), 但是包含很多的干扰点; 记此时图像中为 '1' 像素的坐标为 (X_0, T_0) , $s(X_0, T_0)$ 为该像素的顶点和. 顶点和 $s(X_0, T_0)$ 的定义为, 如果从 (X_0+1, T_0-2) 到 (X_0+1, T_0+5) 像素最大值是 '1', 那么 $s(X_0, T_0) = s(X_0, T_0)$

+ 1, $s(X_0, T_0)$ 的初始值为 0; 记录此时最大值像素位置是 (X_0+1, T_0) , 然后重复第一步操作, 直到对每一个 (X_0, T_0) 搜索完整个图像. 这样在每个非 '0' 像素点都获得一个顶点和, 取最大的顶点和所在位置是图像中目标回波双曲线的顶点, 并且记录计算最大顶点的所有像素位置, 得到目标回波的有效双曲线.

(3) 低通滤波处理

对于边缘提取出的目标回波双曲线, 明显可以发现曲线中的空间噪声对后面霍夫变换影响很大; 由于噪声相对曲线来说是高频分量, 所以可以设计一个低通滤波器滤除噪声.

(4) 利用霍夫变换估算速度

坐标 $(x_a, t(x_a))$ 处边缘双曲线的一阶导数 (即斜率) $g(x_a)$ 由下式给出.

$$g(x_a) = \frac{dt(x_a)}{dx_a} = \frac{4(x_a - x_0)}{v^2 t(x_a)} \quad (5)$$

定义 $u = \frac{v^2}{4}$, 式 (5) 可重新记为: $x_0 = -g(x_a)t(x_a)u + x_a$. (6)

理想情况下, 对每一个边缘双曲线数据集 $\{x_a, t(x_a), g(x_a)\}$, 式 (6) 都成立, 但是噪声和测量误差经常引起偏差. 设 (x_h, u_h) 是二维霍夫变换平面上的点, 对每一个数据集在平面上画出下方方程的可能取值点.

$$x_h = -g(x_a)t(x_a)u_h + x_a \quad (7)$$

在霍夫变换平面上可以找到最聚焦的点, 但是由于噪声的存在, 聚焦点将会变得模糊, 因此直接得到波速 v 将会有很大的误差. 为了增强变换的可靠性, 对边缘轮廓进行二阶求导. $t(x_a)$ 的二阶导数由式 (8) 给出:

$$h(x_a) = \frac{dg(x_a)}{dx_a} = \frac{1}{ut(x_a)} - \frac{g(x_a)^2}{t(x_a)} \quad (8)$$

由式 (8) 可得: $u = \frac{1}{h(x_a)t(x_a) + g(x_a)^2}$ (9)

因此, 由式 (9) 可以直接得到波速 v .

4 实测数据计算及结果分析

本文所用数据来自国外某反雷技术中心实测数据, 一个 B 扫描包括 98 个 A 扫描, 每个 A 扫描记录 512 个数据点. 数据等效采样速率是 40G. 天线离地面 10cm 左右, 目标是 PMN-2 雷, 尺寸: 直径 120mm, 高度 53cm. 埋藏于地下 10cm 深处.

图 3 所示是过零点边缘检测的方法得到的边缘轮廓, 图 4 是对过零点交替用 +1 和 -1 标识的边缘检测方法得到的边缘轮廓. 在这两个图像中, 噪声的干扰非常明显, 大大增加了有效双曲线提取的计算量; 而且地表反射波的零时刻的定位在纵坐标刻度为 50 附近, 每个 A 扫的零时刻不一致, 将导致目标的定位出现偏差.

图 5 是用极值法提取的边缘轮廓, 与图 3 和图 4 相比, 图中的干扰像素减少很多, 可以大大减少计算量; 而且双曲线轮廓和地面回波的零时刻清晰, 有利于有效双曲线的提取和目标深度的计算. 因为在浅层雷达应用中, 地面和目标的回波相对都较强, 且地面回波的极值比地面回波的过零点相对比较稳定, 地面回波和目标回波极值的相对值和两个回波的过零点的相对值是一致的, 因此, 可以用极值代替过零点进行边缘轮

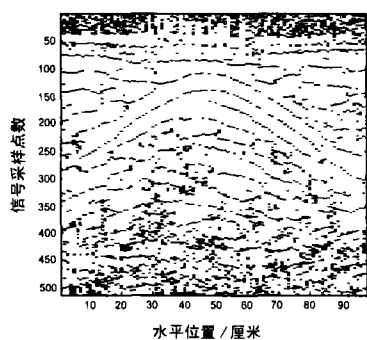


图3 过零点边缘轮廓提取结果
廓提取。

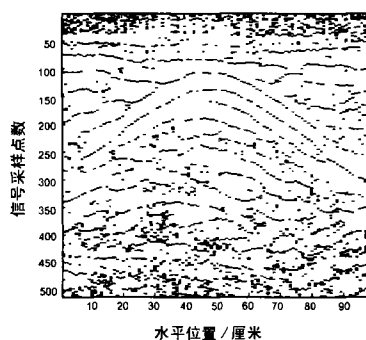


图4 标记 '+1' 和 '-1' 的边缘轮廓提取结果

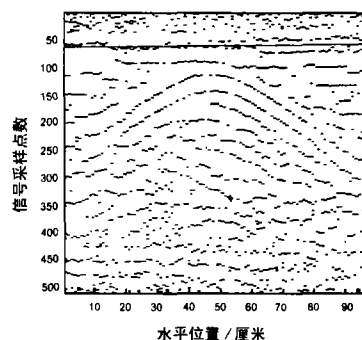


图5 用极值法边缘轮廓提取的结果

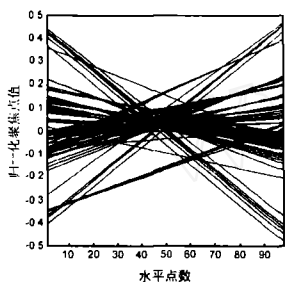


图6 未滤波时一次
霍夫变换结果

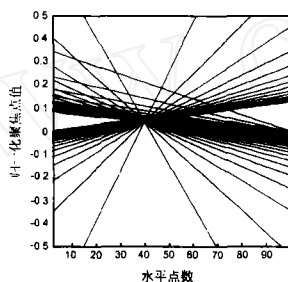


图7 滤波后一次霍
夫变换的结果

图6是对所提取的双曲线未进行滤波进行一次霍夫变换得到的结果。可以看出,由于噪声的影响,曲线的聚焦点发散,因此,由此聚焦点得到的波速 v 也是不准确的,只是一个大概的范围。图7是对双曲线滤波后进行一次霍夫变换的结果。显然曲线的聚焦点比图6的聚焦点更集中。因此,滤波后进行霍夫变换的方法会有更高的测速准确度。

对未滤波数据进行二次霍夫变换得到波速是 14.97cm/ns,对滤波后数据进行二次霍夫变换得到的波速是 15.99cm/ns。由提取双曲线顶点和的位置与地表回波位置可以得到二者回波时刻之差为 $\Delta t = 1.25\text{ns}$,利用未滤波数据进行霍夫变换所估算的波速得目标深度为 9.36 厘米,利用对数据滤波后进行霍夫变换所估算的波速得目标深度为 9.99 厘米,显然后者得到的目标深度更接近于实际值。因此,用极值法提取边缘轮廓和对数据滤波后再进行霍夫变换能得到更准确的波速估算值。

5 结论

从上面数据的分析和处理结果可以看出,用极值法提取层探地雷达图像中目标回波是一种很有效地方法,由于提取的较像中干扰像素比较少,因此大大节省了计算量;同时对提取出的双曲线进行滤波后再进行霍夫变换,波速的估算将更准确。

参考文献:

- [1] N Osuni, K Ueno. Microwave holographic imaging of underground objects [J]. IEEE Trans AP, 1985, Ap-33(2):152-159.
- [2] Toru Kaneko. Rader image processing for locating underground linear objects [J]. IEICE Trans, 1991, E74(10):3451-3458.

- [3] Yuji Nagashima, Hirokata Yoshida, Jun-ichi Masuda, Ryosuke Arioka. Single-unit underground radar utilizing zero-crossed synthetic aperture [J]. IEICE Trans Commun, 1993, E76-B(10):1290-1296.

- [4] Toru Sato, Kenya Takeda, Toshio Wakayama and Iwane Kimura. Automatic data processing procedure for ground probing radar [J]. IEICE Trans Commun, June 1994, E77-B(6):831-837.

- [5] L van Kempen, H Sahli, J Brooks, J Cornelis. New results on clutter reduction and parameter estimation for landmine detection using GPR [A]. Proc. 8th Int Conf Ground Penetrating Radar [C]. 2000. 872-879.

- [6] Albertos Aguado, Eugenia Montiel, Mark S Nixon. Bias error analysis of the generalised hough transform [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 12, 2000:25-42.

- [7] D J Daniels. Surface-Penetrating Radar [M]. London, UNited Kingdom: The Institution of Electrical Engineers, 1996.

- [8] Thomas R Witten. Present state-of-the-art in ground penetrating radars for mine [C]. SPIE, April 1998, 3392:576-585.

- [9] D J daniels. System design of radar for mine detection [A]. SPIE [C]. July 1999, 3752. 390-401.

- [10] L Capineri, P Grande J A G Temple. Advanced image-processing technique for real-time interpretation of ground-penetrating radar images [J]. IJIST, 1998, 9:51-59.

作者简介:



孔令讲 男, 1974 年 9 月生于河南省南阳市, 现在电子科技大学攻读博士学位, 主要从事雷达信号处理、数据传输、探地雷达 SAR 成像算法研究。



周正欧 男, 1940 年 7 月生于四川成都, 现为电子科技大学教授, 博士生导师, 主要从事雷达信号处理、数据通信、光传输等领域的教学和研究; 已在国内外刊物发表论文三十多篇。