

探地雷达图像目标检测算法研究

陈天斌¹, 郝黎明², 王琮², 刘睿³

(1. 西安市临潼区 94162 部队 51 分队, 西安 710614;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;

3. 中国兵器工业集团, 北京 100070)

摘要: 探地雷达是一种针对地下目标的无损探测设备, 在地下无损探测研究方面具有很强的实用性; 探地雷达图像处理过程中有关回波信号双曲线提取以及顶点识别具有非常重要的意义; 针对该内容, 文中提出使用均值滤波和平均法的探地雷达杂波抑制算法, 基于高斯-拉普拉斯算子的双曲线提取算法, 以及基于对称度曲线法的顶点识别算法, 并通过与相关算法的对比实验, 说明了所提算法的可行性; 文中所提算法对探地雷达图像预处理与探测目标识别具有一定参考价值。

关键词: 探地雷达; 林木根系; 目标检测; 双曲线提取

Target Detection Algorithm of Ground-penetrating Radar

Chen Tianbin¹, Huan Liming², Wang Cong², Liu Rui³

(1. Lintong District, Xi'an City Unit 94162 Unit 51, Xi'an 710614, China;

2. BeiJin Aerospace Measurement & Control Technology CO., LTD., Beijing 100041, China;

3. China North Industries Group Corporation, Beijing 100070, China)

Abstract: Ground penetrating radar is a device that can detect underground target without damage, so ground penetrating radar has high practicability in Non-destructive testing. In the process of ground penetrating radar image processing, hyperbolic extraction of echo signal and Vertex recognition are very important. For this, the article raises ground penetrating radar clutter suppression that using average filter and average method. This algorithm can provide image pretreatment and target identification of ground penetrating radar more reference.

Keywords: ground penetrating radar; tree root; target detection; hyperbolic extraction

0 引言

探地雷达作为一种无损探测工具, 主要利用电磁波传输过程中在两种不同介电常数介质分界面发生反射的原理, 符合对地下目标的探测及定位要求, 目前已经广泛用于诸多领域^[1], 在地下目标探测方面的应用越来越受到重视。传统根系研究方法比较繁琐耗时, 而且土壤环境具有一定破坏性、测量精度也不高。目前利用探地雷达进行地下目标探测研究已得到业界广泛认同, 该方法可以对地下目标分布进行三维重构^[2]。

探地雷达图像处理有关回波双曲线提取常用算法有下列几种, 文献[3-5]分别提出利用极值法、过零点法、标记‘+1’和‘-1’法来提取双曲线边缘轮廓, 但均未对所利用图像边缘提取算子的实用性进行研究; 文献[6]提出从双曲线对称特性角度设计出一套检测方案, 但算法实现过程中无法完全脱离人工参与识别。

GPRMAX2D 探地雷达正演模拟软件, 由爱丁堡大学的 Dr Antonis Giannopoulos 博士设计^[7], 被广泛应用于探地雷达图像仿真与模拟, 为探地雷达图像处理算法研究提供了有效数据来源^[8-9]。文中利用该软件正演模拟地下目标探测时探地雷达反射回波图像, 进行算法设计。

文中针对地下目标探地雷达图像噪声抑制、目标边缘提取、目标顶点识别算法设计进行研究; 提出有关直达波和噪声

的抑制算法; 并通过 4 种边缘检测算子和阈值法边缘检测效果对比得出高斯-拉普拉斯算子检测效果较好; 以及提出称度曲线法进行目标顶点定位。

1 GprMax2D 模拟探地雷达回波图像

GprMax2D 是一款基于时域有限差分定理的探地雷达正演模拟软件, 其仿真图像已被广泛应用于探地雷达图像处理算法验证领域。文中利用该软件来仿真探地雷达根系目标的回波图像。图 1 为利用 GprMax2D 仿真的单目标探地雷达图像。

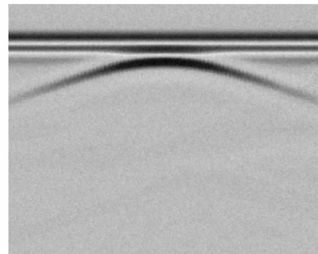


图 1 GPRMAX2D 模拟回波图像

2 预处理

探地雷达对地下目标进行检测时, 会有很强的噪声和杂波, 为了去除噪声和杂波, 需要进行适当的滤波与杂波抑制处理。

2.1 均值滤波噪声抑制

地下目标所处环境结构较为复杂, 从而导致探地雷达回波信号中通常夹带有较强噪声信号; 由于噪声信号相对于探地雷

收稿日期: 2015-04-06; 修回日期: 2015-06-03。

作者简介: 陈天斌(1972-), 四川通江县, 工程师, 主要从事装备测试方向的研究。

达信号回波信号属于高频分量, 故通过均值滤波算法平滑处理, 可以有效去除探地雷达图像中的高频噪声。

算法设计: 利用 $x(i, j)$ 表示探地雷达图像中任意像素点灰度值, 及探地雷达回波信号在该时刻回波强度, 其中 i, j 分别代表横轴和纵轴坐标位置, 使用 $y(i, j)$ 表示均值滤波后图像, 算法处理表达式如公式 (1) 所示:

$$y(i, j) = \frac{1}{9} \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 p(i+m, j+n) \quad (1)$$

即选择以原始像素点为中心周围 9 个像素点灰度值的平均值代替原图像该点灰度值, 滤波结果如图 2 所示。

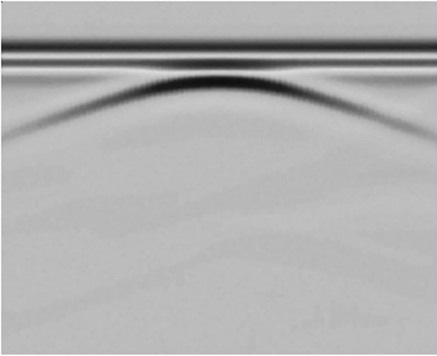


图 2 图像经过均值滤波处理

2.2 耦合波与直达波去除

利用探地雷达进行地下目标探测时, 探地雷达发射天线发出的电磁波首先会通过空气直接耦合至接收天线, 形成耦合波干扰; 其次发射天线发出电磁波会通过地面直接发射至接收天线从而形成直达波干扰。在一起探测过程中, 探地雷达接收到的每道 A-SCAN 信号中所夹带的耦合波与直达波干扰具有较大相关性, 故可以根据该特征进行耦合波与直达波干扰去除。

算法设计: $y(i, j)$ 为去除地杂波之前的图像, $z(i, j)$ 为去除地杂波后的图像, n 为图像总列数。算法表达式如公式 2 所示:

$$z(i, j) = y(i, j) - \sum_{m=1}^n y(i, m) / n \quad (2)$$

即将探地雷达图像中每一个点灰度值与图像中同一行的所有像素点的平均值相减得出的结果代替原来像素点。去除耦合波、直达波后如图 3 所示。

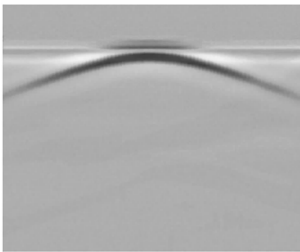


图 3 图像经过去杂波处理

3 边缘轮廓提取

图像边缘检测是数字图像处理过程中较为常见的方法, 通常为基于图像灰度值突变实现图像边缘检测, 及通过利用一个

图像点邻域的中心点处的梯度大于一定的阈值, 则可以判定该像素点为一个边缘像素, 即检测到了图像。文中选用 4 种图像边缘检测算子进行图像边缘分割, 并对检测结果进行对比。

3.1 Roberts 算子

利用局部差分 (沿 45 度方向一阶差分) 来查找图像边缘像素。

算法设计: 具体公式如公式 (3):

$$g(x, y) = \sqrt{\{|f(x, y) - f(x+1, y+1)|^2 + |f(x+1, y) - f(x, y+1)|^2\}} \quad (3)$$

其中: $f(x, y)$ 为输入处理图像, $g(x, y)$ 为输出梯度图像。算子模板如图 4 所示。

基于 Roberts 算子处理后的图像如图 5 所示。

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

图 4 边缘检测算子模板

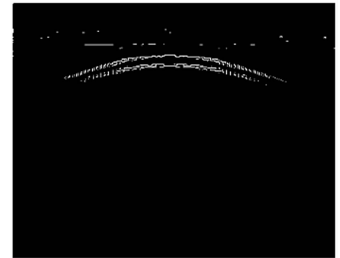


图 5 Robert 算子处理后

3.2 Sobel 算子

利用图像所有像素的梯度导数, 然后进行图像边缘提取。

算法设计: 如公式 (4) 所示:

$$g(x, y) = \{g^2(x) + g^2(y)\}^{1/2} \quad (4)$$

其中: $g(x) = \frac{\partial f}{\partial x} = (z_7 + z_8 + z_9) - (z_1 + z_2 + z_3)$, $g(y) = \frac{\partial f}{\partial y} = (z_3 + z_6 + z_9) - (z_1 + z_4 + z_7)$

$$= \frac{\partial f}{\partial x} = (z_3 + z_6 + z_9) - (z_1 + z_4 + z_7)$$

经过 Sobel 算子进行边缘提取后图像如图 6 所示。

3.3 Prewitt 算子

Prewitt 算子与 Sobel 算子类似, 只是讲公式 (4) 式中 $g(x)$ 和 $g(y)$ 的形式进行适当调整, 具体形式如下所示:

$$g(x) = \frac{\partial f}{\partial x} = (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)$$

$$g(y) = \frac{\partial f}{\partial y} = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)$$

经过 Prewitt 算子进行边缘提取后图像如图 7 所示。

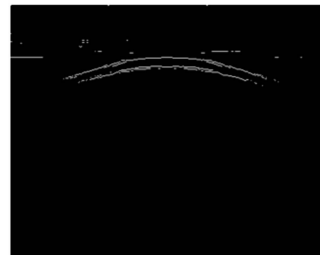


图 6 Sobel 算子处理后

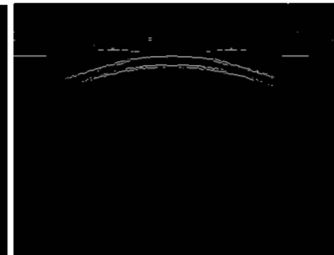


图 7 Prewitt 算子处理后

3.4 LOG 算子

LOG 算子首先使用高斯滤波器的对原图像滤波之后, 再通过二阶微分处理, 产生双边缘图像, 再通过寻找零交叉来查

找边缘。

算法设计：牛顿-拉普拉斯算子形式如 (5) 式下：

$$\nabla^2 G(x,y) = \frac{1}{2\pi\delta^4} \left[\frac{x^2+y^2}{\delta^2} - 2 \right] e^{-\frac{x^2+y^2}{2\delta^2}} \quad (5)$$

G 是标准差为 σ 的二维高斯函数。表达式为 $G(x,y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\delta^2}}$ ，通过选择合适的 δ 来检测图像的边缘。利用该算法处理后的图像如图 8 所示。

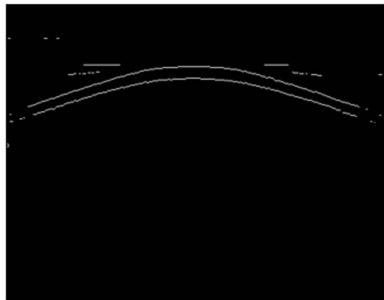


图 8 LOG 算子处理后

通过对上述 4 种边缘检测算法实现原理与处理结果对比可以得出，Roberts 算子只利用对角线像素灰度值之差进行梯度检测，故只对垂直和水平分布边缘有较明显检测效果，由于算法未考虑水平和垂直像素之间的关系，故对图像中噪声比较敏感，而且算法执行过程中阈值大小需要手动设置，边缘检测结果人为干扰因素较大；Sobel 算子需要两个掩模分别在图像的每个像素上移动，算法不够简洁，运行时间较长；Prewitt 算子利用像素点上下、左右相邻像素灰度差，在图像边缘达到极值实现边缘检测，故图像中噪声对边缘检测结果影响较大；LOG 算子首先使用高斯函数进行滤波处理，抑制了图像中噪声的影响，其次根据图像二阶微分的过零点实现图像边缘检测，检测结果比较完整，定位比较准备。

4 检测双曲线顶点

探地雷达图像中回波双曲线定点的位置识别，对于有关探地雷达波速估计^[6]以及目标反演成像研究尤为重要。根据目标图像中双曲线的对称性特点^[10]，利用图像对称度曲线进行双曲线定点识别。对称度曲线计算公式如下所示：

$$s[j] = \sum_{i=1}^{y_{\max}} \sum_{m=1}^k |r[i, j-m] - r[i, j+m]|$$

其中： y_{\max} 是图像行数， x_{\max} 是图像列数， $j \in [k+1, x_{\max} - k]$ 。

对称度曲线结果如图 9 所示。

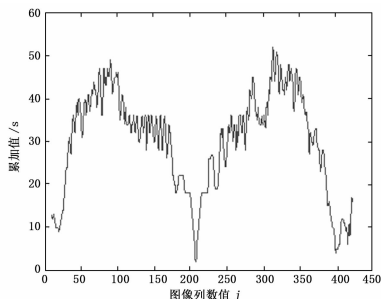


图 9 图像对称度曲线

通过图 9 可以得出，对称度曲线在第 209 列最低，及双曲线顶点横坐标位置为 209 列；进一步通过求解该列数据的边缘像素点即可得到双曲线顶点位置，纵坐标为 78。顶点识别结果如图 10 所示。

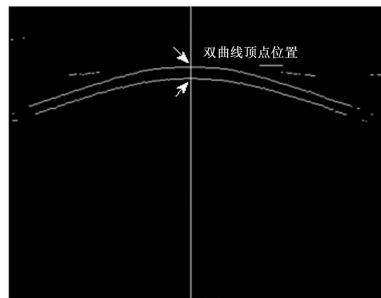


图 10 检测双曲线顶点

5 结论

文中对有关探地雷达图像杂波抑制和耦合波与直达波去除算法进行了研究，针对噪声特性提出了相应的滤波算法，并取得了预期效果。有关目标双曲线边缘提取算法，文中通过常用边缘检测算法对探地雷达图像进行处理对比，得出 LOG 算子边缘提取效果较好。文中进一步提出使用称度曲线算法实现了目标双曲线顶点识别。文中所提算法，对于探地雷达图像预处理分析具有一定参考价值，同时文中算法处理结果可为后续有关基于探地雷达图像处理的电磁波波速估计算法设计和探地雷达探测目标合成孔径反演成像算法设计提供可靠数据来源。

参考文献：

- [1] 崔喜红, 陈 晋, 沈金松, 等. 基于探地雷达的树木根径估算模型及根生物量估算新方法 [J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41 (2): 243-252.
- [2] 王 赤, 田 茂, 周 维, 等. 探地雷达回波信号预处理方法的研究与应用 [J]. 计算机测量与控制, 200 (3): 259-261.
- [3] 孔令讲, 周正欧. 浅地层探地雷达波速测量方法的研究 [J]. 电子学报, 2002, 30 (9): 1330-1332.
- [4] Kaneko T. Radar image processing for locating underground linear objects [J]. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 1991, 74 (10): 3451-3458.
- [5] Nagashima Y, Yoshida H, Masuda J, et al. Single-unit underground radar utilizing zero-crossed synthetic aperture [J]. IEICE Transactions on Communications, 1993, 76 (10): 1290-1296.
- [6] 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.
- [7] Giannopoulos A. The investigation of transmission-line matrix and finite-difference time-domain methods for the forward problem of ground probing radar [D]. University of York, Department of Electronics, York, UK, 1997.
- [8] 周奇才, 李炳杰, 郑宇轩, 等. 基于 GPRMax2D 的探地雷达图像正演模拟 [J]. 工程地球物理学报, 2008, 5 (4): 396-399.
- [9] Ceia M A R, Carrasquilla A A G. GPR simulations for pipeline oil drainage detection [A]. 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society [C]. 2005.
- [10] Eriksson M, et al. Eye-tracking for detection of driver fatigue [A]. Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC [C]. 1997, 314-319.