

探地雷达目标检测中的加窗统计量定位方法

申家全^{1,2}, 闫怀志³, 胡昌振³

1. 北京理工大学机电工程与控制国防科技重点实验室, 北京 100081

2. 防空兵指挥学院, 郑州 450052

3. 北京理工大学计算机网络攻防对抗技术实验室, 北京 100081

摘要 目标检测与定位是探地雷达的一个重要问题。目前, 多数检测与定位方法都是通过判断探地雷达信号中的双曲线特征实现的。在检测目标大致区域的基础上, 要实现目标定位, 无论是合成孔径算法还是叠加-幅度波速法, 都存在计算量大的问题。现有的统计量方法还需依赖霍夫变换方法检测出双曲线, 算法也较复杂。根据探测背景介质结构相似及在探测方向上利用整个 A-scan 进行统计量计算干扰较大的特点, 提出了一种探地雷达目标快速定位方法。首先以能量和方差为统计量, 在深度方向上判断出目标区域的时间窗口, 而后在探测方向对 A-scan 加窗, 只选择该窗口下的部分 A-scan 数据, 以能量为统计量确定目标的位置。由于仅采用方差、能量两个统计量进行计算, 算法实现比较简单, 并且采用时间加窗方法去除了回波数据上大部分与目标无关数据的干扰, 对目标的定位准确度较高。实测数据表明, 该方法适用于探地雷达目标检测中对目标的快速准确定位。

关键词 探地雷达; 目标检测; 目标定位

中图分类号 TN959.71

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)08-0051-04

An Algorithm of Window Choice in Depth by Statistics Feature in GPR Target Detection and Location

SHEN Jiaquan^{1,2}, YAN Huaizhi³, HU Changzhen³

1. National Laboratory of Mechatronic Control and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Air Defence Forces Command Academy of PLA, Zhengzhou 450052, China

3. Laboratory for Computer Network Defence Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Target detection and location is important in the application of the ground penetrating radar. Target location is based on the result of the detection, which in turn depends on the hyperbolas of the ground penetration radar. Many algorithms for this purpose involve a large amount of computational effort, such as SAR and overlay amplitude-velocity algorithm. They include an algorithm on window-statistics to consider noises and non-targets data. At the same time, Hough transform algorithm has also to be used. Based on the similarity of time samples of ground penetrating radar and the fact that the possible target lies in some area, an algorithm is proposed in this paper for ground penetrating radar target detection and location. First, the algorithm considers energy and variance as statistics features of one-dimensional data in depth, to determine the probable depth of target signals by the right threshold. Then the energy variant is used as the statistics feature of an A-scan in the above special depth window by the threshold. Finally, the target location is determined. Because it only uses a part of A-scan data without considering the non-targets data, the location is more accurately determined than the algorithm that uses the whole A-scan data. Moreover, the algorithm is more effective than above mentioned other algorithms. The result of the test shows that the algorithm is very effective in the fast target detection and location.

Keywords ground penetrating radar; target detection; target location

收稿日期: 2010-03-10

作者简介: 申家全, 博士研究生, 研究方向为探地雷达信号处理, 电子信箱: shenjiaquan@foxmail.com; 闫怀志 (通信作者), 副教授, 研究方向为信号处理、信息安全, 电子信箱: yhzhi@bit.edu.cn

0 引言

作为一种无损检测手段, 探地雷达广泛应用于地质、考古、建筑、公路、军事等领域。由于受直达波等杂波信号的影响, 目标信号在探地雷达回波信号中较弱, 对目标准确定位是一个难题。点目标信号在探地雷达回波图像中一般呈现双曲线^[1], 目标的定位实际上是对双曲线顶点的定位。目前对目标进行定位的方法可分为双曲线定位法、统计量定位法。双曲线定位法是根据回波数据中的双曲线特征进行定位的方法, 有对称度曲线法^[1]、叠加-幅度波速法^[2]等, 其中对称度曲线法是根据探地雷达的有效口径确定一个窗口, 判断探测方向某点的曲线对称度后再确定目标水平位置, 而后通过该位置处深度方向上的目标回波主峰确定双曲线顶点, 叠加-幅度波速法需要利用一定范围的波速进行计算, 两者计算量都比较大。统计量定位法主要是利用 A-scan 的能量等特征量进行目标的定位与检测。文献[3]给出的方法是, 首先对探地雷达信号进行合成孔径算法处理, 在减少直达波对目标的影响后, 对聚焦后的目标信号在检测方向和深度方向先后使用加窗的能量统计量进行定位; 文献[4]在对探地雷达信号去除直达波后, 使用 A-scan 能量与噪声方差之商作为统计量。两种方法的共同点是对整个 A-scan 进行操作, 使用能量或其函数作为统计量。

一般情况下, 目标信号仅集中在一定深度范围及探测方向上的一段长度内。在一个 A-scan 中, 包含能量较大的直达波信号、非目标介质信号和可能的目标信号。在对直达波进行抑制^[5]后, 目标信号大大增强, 但非目标介质信号、残余的直达波信号不能忽略。故针对整个 A-scan 选择的统计量都含有一定的非目标信号, 直接利用整个 A-scan 或处理后的 A-scan 能量等统计量进行目标检测与定位并不精确。因此, 对 A-scan 在深度上加窗, 利用统计量确定窗口内的深度, 能更好地减少非目标信号和剩余直达波信号的干扰, 且计量比较简单, 可对目标实现较为迅速准确的定位。

1 探地雷达回波信号特征分析

图 1 是探地雷达对埋藏于背景介质中点目标进行检测的示意图。探地雷达天线在探测表面沿探测方向 x 移动, 发射的高频电磁波经点目标反射后的回波信号在探测方向形成一个 $x-t$ (时间) 坐标的 B-scan, 并且 B-scan 中目标区域形成一个双曲线。因此, 点目标与双曲线相对应, 目标的检测和定位, 理论上就是确定的双曲线顶点。由于直达波和背景其他介质信号的干扰, 目标信号比较弱, 甚至会被淹没在背景信号中, 因此直接确定双曲线顶点进行目标的定位比较困难, 误差比较大。

探地雷达 B-scan 可以用二维矩阵 $|X|$ 表示, x_{ij} 为矩阵中的第 i 个测点第 j 个时间采样点的数据, 其中 $i, j \in Z, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n, m$ 为探测方向测点数, n 为深度方向时间采样点数。A-scan 可用一维向量 X_A 表示, 深度方向某一采样点的一维向量用 X_T 表示, 则 A-scan 和深度方向的 X_T 分别为 X

的行向量和列向量。

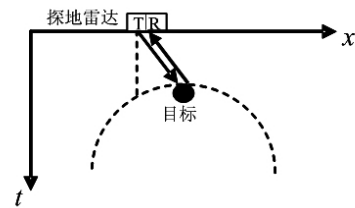


图 1 探地雷达探测点目标示意

Fig. 1 Schematic diagram of GRP dot-target signals

定义 $E(X_{Ti})$ 为第 i 个测点的 A-scan 能量, 即

$$E(X_{Ti}) = \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 \quad (1)$$

通常情况下, 同一深度 (以采样时间点序号表示) 背景介质结构相似, 介电常数相差不大, 故 B-scan 中此深度下各测点回波信号幅值在一个比较小的范围内变化; 而包含探测目标的情况下内, 同一深度下介质介电常数变化较大, 则 B-scan 中此深度下各测点回波信号幅值变化范围较大, 目标位置往往出现较大的幅值。由于直达波的存在, 浅层目标回波信号被压制, 同一深度下各测点回波信号变化不明显, 与直达波幅值相比较小。根据幅值变化范围和幅值大小的不同, 可引入能量和方差 2 个统计量区别目标处的探地雷达回波信号, 根据目标位置处方差和能量都比较大这个特征对目标位置进行深度上的定位。

2 算法

基于以上分析, 提出一种快速目标定位方法, 具体算法流程如图 2 所示。

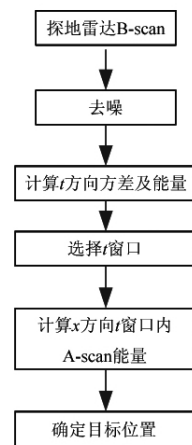


图 2 探地雷达目标快速定位流程

Fig. 2 Flowchart of fast target location of GPR

2.1 去噪

探地雷达回波信号中直达波、背景噪声及其他非目标介质信号的存在, 使得直接对信号进行目标检测非常困难, 须进行去除或抑制, 增强目标信号。目前, 对于直达波及其他干

扰信号的抑制算法较多,有小波去噪法、主成分分析法、平均抵消法、自适应抵消法^[6-8]等。各种算法中,平均抵消算法最为简单,应用得较多,在探测背景表面较平时效果比较好。

2.2 获取 t 方向目标的可能窗口

根据 t 方向 T-scan 的特点可知,去除直达波之后,在非目标区域,T-scan 的方差较小,能量较小;在目标区域,T-scan 的方差较大,能量较大。实际探测中,由于表面附近介质的不平整,去除直达波不彻底,使得在时间 t 轴上对应直达波的最初一段区域内部分 T-scan 方差也较大,但其能量较小。所以综合利用能量和方差 2 个统计量,选取能量和方差都为峰值的区域,并结合合适的阈值,就可大致确定出目标所在的深度范围(用时间表示) $t_a \sim t_b$,其中 $t_a \leq t_b, t_a, t_b \in T$ 为时间采样点数。

2.3 测线 x 方向加窗能量法检测目标位置

选择时间窗口后,每个 A-scan 中除 $t_a \sim t_b$ 之外的数据全为 0(此处对 A-scan 归一化处理)。很显然,加窗后的 B-scan 在测线方向上每个 A-scan 都减少了许多干扰信号,剩下的信号成分中若无目标,则每个采样点的幅值接近于零;如有目标,则有较大幅值。由此,可以根据加窗后 A-scan 的能量变化情况,选择能量曲线中最大值处的位置,并结合阈值的选取确定目标的大致位置。

3 试验和结果分析

为验证所提算法,利用瑞典 MALÅ 公司的探地雷达进行实测试验,测试背景为水泥墙,目标为预置在 0.05m 深的钢筋,钢筋直径 0.1m,钢筋间距 0.1m。探地雷达工作参数为天线频率 1.2GHz,测点间距 0.002m,时间采样点数为 312,探测方向垂直钢筋竖向,探地雷达所测 B-scan 图像如图 3 所示。

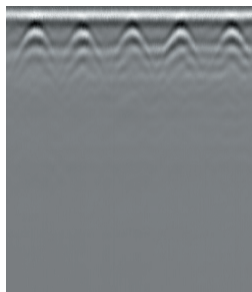


图 3 水泥墙体内钢筋 B-scan 图像

Fig. 3 Image of B-scan of rebar in the concrete wall

从图 3 可发现,水泥墙体预置的 5 根钢筋在 B-scan 灰度图中呈现为 5 条双曲线,理论上,钢筋的位置应为双曲线的顶点,但由于直达波的影响,顶点位置不易确定。对实测的 B-scan 数据按所提算法在时间上和测线方向先后进行处理,对钢筋进行定位,处理过程和结果如图 4、图 5 所示。在深度统计曲线上,可发现在第 27 和第 32 点,2 条曲线重合在一起,在此范围内能量 E 和方差 δ^2 都比较大,均大于 0.5 (归一化值,标量);而在能量曲线上的其他能量极大值处,相应的方

差曲线上方差数值小于 0.5,因此在方差曲线上选择 0.5 作为阈值,确定 27~32 为深度时间窗口。

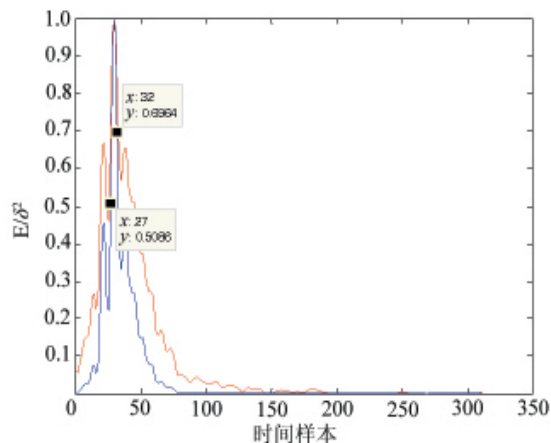


图 4 深度方向上归一化能量和方差的统计量曲线
Fig. 4 Plot of normalized energy and variance in time samples

如图 5 所示, E-window 和 E-window1 分别表示加窗后的能量曲线和文献[4]加窗的能量曲线。可以看出,所提的加窗后的能量曲线定位较好,选定阈值为 0.5 后,发现有 6 个极大值处,分别为第 30、33、81、132、176、232 个测点,由于第 30 和第 33 个测点的极大值相距较近,合并为一个,最后 5 个钢筋位置分别第 30、81、132、176、232。经计算,第 1 个钢筋距初始测点距离为 0.06m,5 个钢筋间距分别为 0.102、0.102、0.088、0.112m,考虑预置过程中的误差,基本上与实际位置相符,定位较为准确。而在文献[4]加窗的能量曲线上,选定阈值为 0.5 后,发现有 9 个极大值处,分别为第 30、32、35、79、132、169、176、180、231 个测点,合并后则为 6 个,分别为第 32、79、132、169、180、231 个测点。很显然,第 4 根钢筋处的定位区别较大,使用所提的加窗法后,减小了干扰信号,定位较为准确。文献[3]的方法比较精确,但需要进行合成孔径处理,比所提算法复杂。

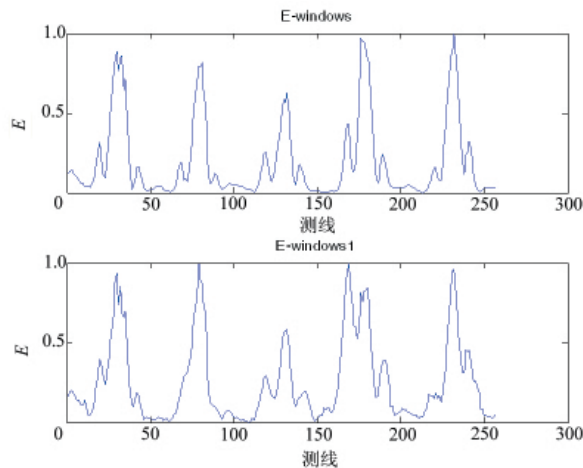


图 5 测线方向能量统计曲线
Fig. 5 Plot of normalized energy of traces and window-traces

4 结论

方差和能量结合的方法减少了同一深度不同测点直达波去除不彻底和非目标区域的信号差异的影响,深度上加窗(时间)使统计信息能更准确的反映目标的特性。由于整个算法仅使用能量和方差 2 个统计量,故算法实现简单,计算速度快。当然,当背景介质复杂时,还应结合目标属性进行判断和定位,以能保证定位的准确性。需注意的是,算法本身只是一种定位算法,是在目标检测的基础上进行的。另外,定位的结果可为下一步识别提供数据样本。

参考文献 (References)

- [1] 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 zhengou. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(1): 124-128.
- [2] 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 Zhengou, Luo Renze. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1113-1117.
- [3] 张春城, 周正欧. 浅地层探地雷达自动目标与定位研究 [J]. 电子与信息学报, 2005, 27(7): 1065-1068.

Zhang Chuncheng, Zhou Zhengou. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(7): 1065-1068.

- [4] 陈德莉, 黄春琳, 栗毅. 用统计方法和 Hough 变换进行 GPR 目标检测与定位[J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1468-1471.
Chen Deli, Huang Chunlin, Su Yi. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(9): 1468-1471.
- [5] 包乾宗, 陈文超, 高静怀, 等. 探地雷达直达波衰减的 Curvelet 变换方法[J]. 电波科学学报, 2008, 23(3): 449-454.
Bao Qianzong, Chen Wenchao, Gao Jinghui, et al. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(3): 449-454.
- [6] 陆珉, 李禹, 黄春琳, 等. 基于小波变换的探地雷达随机 RFI 抑制方法[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(3): 65-69.
Lu Min, Li Yu, Huang Chunlin, et al. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, 31(3): 65-69.
- [7] 肖艳军, 李建勋. 基于小波变换的信号滤波在探地雷达中的应用[J]. 电波科学学报, 2006, 21(1): 140-149.
Xiao Yanjun, Li Jianxun. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(1): 140-149.
- [8] 李昂, 蒋延生, 张安学, 等. 自适应对消在去除探地雷达信号直达波的应用[J]. 电波科学学报, 2004, 19(2): 223-227.
Li Ang, Jiang Yansheng, Zhang Anxue, et al. *Chinese Journal of Radio Science*, 2004, 19(2): 223-227.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·



“2010年中国药学会 大会”征文

由中国药学会主办的“2010年中国药学会大会”将于2010年10月在杭州举行。会议主题:发展生物医药新型产业,保障人民身体健康。

征文范围:生化与生物技术药物、中药和天然药物、药剂、抗生素、药物分析、药物化学、制药工程、医院药学、老年药学、海洋药物、药事管理、军事药学、药物流行病、应用药理、药物经济学、药学史、医药知识产权研究、药物安全评价研究、药物临床评价研究以及药物信息研究与利用。全文截稿日期为2010年9月10日。

会议网站: <http://www.cpa.org.cn/Article/xhdt/201003/1289.asp>。

联系方式:北京市朝阳区建外大街四号建外 SOHO 九号楼 18 层 1802 室 (100022), 孙文虹; 电话:010-58699280-819; 电子信箱: sunwenhong2002@163.com。

·学术动态·



“中国颗粒学会第七届 学术年会暨海峡两岸颗粒 技术研讨会”征文

由中国颗粒学会主办的“中国颗粒学会第七届学术年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会”将于2010年8月15-18日在西安召开。

征文范围:颗粒测试与应用;气溶胶基本特性、监测与分析;鼓泡床、快速床、循环床、喷动床、流化床中的传热、传质和化学反应;颗粒制备技术、表面改性处理技术;制备、表征及应用方面的新进展,特别是新思想、新材料、新技术在环境、能源、保健等领域的重要意义及其客观需求等。全文截稿日期为2010年6月15日。

会议网站: http://www.csp.org.cn/csp/csp_active/10nianhui.htm。

联系方式:北京中关村北二条1号(100190), 韩秀芝; 电话:010-62647647; 电子信箱: klxh@home.ipe.ac.cn。