

用统计方法和 Hough 变换进行 GPR 目标检测与定位

陈德莉, 黄春琳, 粟毅

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 本文所提出的 GPR 目标检测方法包含两个步骤. 首先基于对 GPR 一维回波(A2Scan)统计特性的研究, 应用加窗统计法从海量数据中实现快速高效的目标检测和感兴趣区域的提取; 进而根据 GPR 二维回波图像(B2Scan)中目标回波的双曲线特征, 对经过图像分割的 ROI 区域采用改进的 Hough 变换检测目标双曲线, 去除虚假目标并实现目标的精确定位. 对实测数据检测结果表明: 此法水平和纵深向定位误差均小于 1cm, 输入数据信杂比可低至 2dB 左右.

关键词: 探地雷达; 检测; 定位; 霍夫变换

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 09-1462-04

An Integrated Method of Statistical Method and Hough Transform for GPR Targets Detection and Location

CHEN DeLi, HUANG ChunLin, SU Yi

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: The detection and location method of GPR targets presented in this paper has two steps. First, based on the analysis of GPR A2scan signal's statistical features, a windowed statistical method is introduced to efficiently extract the range of interest (ROI) from a large amount of data. Second, according to the hyperbola feature of GPR B2scan signal, a modified Hough transform is used to detect the hyperbola from the ROI data that after being segmented, aims to get rid of the false targets and locate the targets accurately. The method had been employed to find and locate targets from GPR data. The results show that all targets are detected correctly, and the depth and horizontal location errors are less than 1cm. Moreover, the signal-to-clutter ratio (SCR) of ROI data can be down to about 2dB.

Key words: GPR; detection; location; Hough transform

1 引言

探地雷达(GPR, Ground Penetrating Radar)作为非破坏性探测手段广泛应用于探测地下未知目标,例如埋藏的地雷、路面下的管道、机场跑道下的空洞或缝隙等等^[1]. 由于地下介质不均匀,较之自由空间,介质中目标属性的反演更加复杂,以及多种因素的干扰与杂波噪声造成了 GPR 的自动目标检测异常困难,这已成为限制 GPR 应用范围的一个瓶颈. 目前广泛采用的仍然是存在人工干预的目标检测,分为两种. 一种是现场检测,即由操作人员根据现场录取的数据直接根据经验做出判断;另一种是离线检测,即根据对录取数据进行成像处理的结果判断是否存在目标. 很显然,这两种方法都存在致命的弱点))) 对人主观经验的依赖性,这导致了检测结果的不稳定性和效率的低下,特别是处理海量数据时. 因此,国内外的学者在 GPR 的自动目标检测方面做了大量的研究,并提出了各种方法:基于信号能量的检测方法以其计算量小的优点适用于现场目标的粗略检测^[2];基于图像模式的检测方法,例如:神经网络、模糊聚类模式识别方法,需要大量的样本训练才可达到较好的检测质量^[3],这限制了它的应用范围;而由

成像结果进行目标自动检测的方法,首先受限于成像质量的好坏,其次计算量非常大,只能用于离线的目标检测.

本文针对海量数据中的目标检测问题,提出了由粗检测到精确检测的两步检测法. 首先应用基于能量检测的统计方法从海量数据中提取出感兴趣区域(ROI, Region of Interest),该方法计算结果较粗略,但计算量小,可以将绝大部分非目标区域排除. 为了得到更精确的检测结果,可以从边缘二值图像中检测是否含有目标双曲线^[4],但由于电磁波在地下的传播机理非常复杂,回波图像受到各种噪声干扰而且雷达回波的边界是缓变的,所以利用边缘信息检测双曲线得到的结果不理想而且对回波信杂比要求较高. 考虑到 Hough 变换对噪声具有较强的鲁棒性,可适用于较低的信杂比,故本文采用 Hough 变换准确检测出目标双曲线,并精确估计出目标的位置等信息;此外,提出检测前背景灰度置零的方法分割出含目标的图像区域,可以较大程度减少计算量.

2 介质中目标的二维回波特性

GPR 雷达扫描介质中横截面相对较小的目标,多道扫描数据所构成二维回波图像(B2Scan 图像)中,目标回波多呈

双曲线或近似双曲线的几何形状,这是由雷达的运动及雷达与目标相对距离变化的几何关系所决定的.假设雷达使用收发共置天线(或是收发分置,但发射和接收天线间距不大),沿地面同一个方向移动,并不断向地面下的目标发射和接收电磁波.这里假设地下介质为均匀无色散,并忽略电磁波由空气进入地面时的折射,形成的B2Scan图像中,目标回波时延与天线水平位置的关系为:

$$S: t^2/t_0^2 - 4(x - x_0)^2/(vt_0)^2 = 1 \quad (1)$$

式中 $t_0 = 2z_0/v$, 其中 x_0 和 z_0 分别表示目标的水平位置坐标和深度, v 是介质中电磁波的传播速度. 其关系曲线见图 1.

所有坐标轴被离散化后, 可记: $t_j = jdt$, $x_i = idx$, $x_0 = i_0dx$, $t_0 = j_0dt$

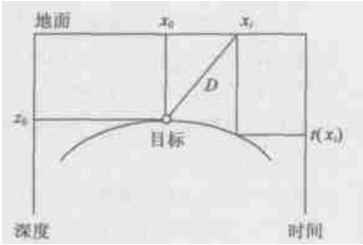


图1 探地雷达目标回波双曲线

则式(1)离散化后S曲线方程为:

$$j^2/j_0^2 - (i - i_0)^2/(v/2j_0dxdt)^2 = 1 \quad (2)$$

曲线方程 $S(i_0, j_0, v)$ 中未知量 i_0 和 j_0 是双曲线顶点坐标,若能确定出该顶点坐标及介质波速 v ,则不仅能根据其双曲线特征进行地下目标的检测,而且可以计算出目标的水平和纵深位置.



图2 目标检测与定位算法处理框图

3 算法

本文提出的海量数据中目标的自动检测和定位算法包含四个处理过程,其处理流程如图2所示,下面分别介绍.

3.1.1 预处理

原始回波信号中含有强烈的天线系统耦合信号、地面反射的直达波及其他干扰信号,上述干扰去除的效果如何直接影响后续处理的结果.采用的方法包括平均法去除随机噪声和随机RFI^[6],抵消法去除直达波等.预处理可去除随机噪声和干扰,提高信杂比,但经预处理后的数据仍然存在或多或少的残留噪声和其他非目标的干扰回波.

3.1.2 加窗统计法提取ROI区域

ROI(Region of Interest)区域是可能含有目标、缺陷或异常体的回波数据中人们感兴趣的数据区.ROI的提取是目标检测和识别的前期工作,可以简化后续处理的步骤、缩短后续处理的时间(例如成像).在某些应用中,ROI的提取结果可以作为最终结果输出.对于探地雷达的许多应用,如公路质量的无损检测和路基探测来说其录取的数据量非常庞大.因此,研究如何从海量数据中自动提取可能含有目标的ROI区域是非常具有意义的.为了便于分析问题,对GPR的目标检测建立如下二元假设检验模型^[2]:

$$\begin{cases} H_0: y_n(k) = v_n(k) \\ H_1: y_n(k) = s_n(k) + v_n(k) \end{cases} \quad (3)$$

回波信号 $y_n(k)$ 的长度(采样点个数)为 $k = 1, \dots, K$, E Scan测点数为 $n = 1, \dots, N$, $s_n(k)$ 为目标回波信号, $v_n(k)$ 为随机噪声和干扰,为零均值,方差为 R^2 的正态分布随机序列.显然上述对噪声分布的假设是不准确的,但使用加性白噪声模型便于从统计的角度分析检测问题,而且试验结果证明此方法不仅有效而且计算量小,因而做此假设.

GPR发射信号为窄脉冲,因此假设 y_n 各个分量线性无关,则对数似然函数为:

$$s_n^T \ln G + s_n^2/2 = G_0 \quad (4)$$

反之 H_0 成立.其中, $s + s(n)$ 为 s_n 的二范数.一般的,由 y_n 估计 s_n , 检验统计量为 $Y(n) = s + y_n^2/R^2$.

y_n 服从正态分布则 $Y(n)$ 服从自由度为 K 的 V^2 分布.由中心极限定理,当 K 充分大时,可用正态分布近似 V^2 分布.则可得到 $Y(n)$ 在此二元假设下的分布:

$$H_0: Y(n) \sim N(K, 2K)$$

$$H_1: Y(n) \sim N(K + s + s^2, 2K + 4s + s^2) \quad (5)$$

由NeymanPerson准则,给定虚警概率 A ,假设 K 非常大(几百),则检测概率可近似算得:

$$P_d = 1 - 5 \left[\frac{5^{-1}(1-A) - s + s^2/\sqrt{2K}}{\sqrt{1 + 2s + s^2/K}} \right] \quad (6)$$

由式(6)可以看出,目标回波信号主要能量一般聚集在某个窗口 (k_1, k_2) 中,若使用所有的采样点数据值进行判断,会增加了许多不必要的随机噪声积累,从而降低 P_d ,故考虑加窗处理,这里简单选取一个窗口函数:

$$w(k) = \begin{cases} 1, & k = k_1, \dots, k_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad 1 F k_1 F k_2 F K \quad (7)$$

则 $y(k)$ 变为 $y_w(k) = y(k) @ w(k)$. 设 $m = k_1 - k_2$, 选择窗口的目的是使检测概率 P_d 最大,即使 $m^{-1/2} \sum_{k=k_1}^{k_2} s^2(k)$ 最大.考虑到计算量,设 $k_1 = 1$, 由 $k_2 = \arg \max_{k: 1 F k F K} \left\{ \sum_{i=1}^k y^2(i) / \sqrt{k} - \sqrt{k} \right\}$, 可确定出 k_2 的近似值,同理可得 k_1 的近似值.

则此二元假设的检验统计量为: $Y(n) = s + y_w^2/R^2$, 取阈值判断即可粗略划分出ROI区域.由统计曲线的峰值及选取的窗函数可以大致确定目标的位置范围,这可以减少后续处理的计算量.

3.1.3 二维滤波与图像分割

由提取出的ROI二维区域可以看出,除目标的双曲线外,存在大量随机起伏的干扰与噪声,这种空间噪声会影响Hough变换的聚焦效果;由于目标曲线的各空间点存在相

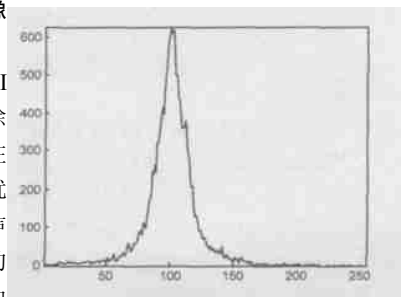


图3 灰度2像素关系图

关性,在距离轴上是慢变信号,而噪声与干扰相对曲线来说是非相关的高频分量,所以考虑设计一个空间二维低通滤波器:

$$Q(X_x, X_y) = \begin{cases} 1, & -R_1 F X_x F R_1 \text{ and } -R_2 F X_y F R_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

其中 X_x 和 X_y 是两维频域的角频率坐标,低通频率 R_1 和 R_2 分别与信号带宽和目标曲线的起伏程度有关.这里仅给出了理想的矩形滤波器,实际应用可根据不同的目标特性选取其它形式的滤波器.采用二维滤波器平滑图像,可去除奇异亮点和非相关分量,不仅能提高 ROI 区域的信杂比,而且对后续参数估计精度的提高有很大帮助.

由于目标曲线相对于整个 ROI 区域所占面积较小,可知背景灰度级所含象素最多,灰度2象素曲线一般呈现单峰,图 3 给出了典型 ROI 区域的灰度2象素曲线,横轴为 256 级灰度,纵轴为 ROI 区域中各灰度级所含有的象素数目.因此将此灰度级及其附近灰度级的象素置零,可以较大程度减少后续处理的计算量.

3.1.4 改进的 Hough 变换检测目标

Hough 变换是一种检测、定位直线和解析曲线的有效方法^[7],它对随机噪声和部分遮盖现象不敏感,具有较强的抗干扰能力,允许待检测的边界曲线不连续,且适用于并行处理.

传统的 Hough 变换需要首先做二值化及边界检测(或细化)等图像预处理工作,这固然减少了计算量,但原始图像中的许多信息将损失,这给它的应用带来了局限性.对于 GPR 回波信号,信号目标回波曲线的灰度变化是缓慢的,因此采用边缘检测的方法对 GPR 信号进行 Hough 变换检测曲线,聚焦结果势必很差.

考虑到兼顾检测精度和计算量,本文提出的对 Hough 变换的改进主要有两个方面:(1)因为回波图像边缘灰度变化缓慢,因此不采用传统的二值化图像预处理方法,而是采用 3.1.3 节所述方法对 ROI 区域预处理后,直接进行 Hough 累加;(2)根据 GPR 回波特点,将传统 Hough 变换累加器单纯根据位置信息投票改变为位置、幅度信息综合投票.

根据曲线方程式(2),Hough 变换计算公式为:

$$H(i_0, j_0) = \sum_{i=i_1}^{i_N} \sum_{j=j_1}^{j_N} I(i, j) Q(i, j) \quad (9)$$

其中, (i, j) 是 ROI 区域经图像分割后的特征点 $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 的坐标,顶点位置 (i_0, j_0) 组成 Hough 变换的参数空间, $I(i, j) = \begin{cases} 1, & |S(i, j)| < D \\ 0, & |S(i, j)| > D \end{cases}$ D 为设置的误差范围, $Q(i, j)$ 为 ROI 区域 (i, j) 位置上的灰度值函数,即 B2Scan 目标回波幅度值.

在 Hough 变换域中,若有目标则 $H(i_0, j_0)$ 会出现陡峭的高峰,而无目标时 $H(i_0, j_0)$ 多为平缓的起伏,故根据 $H(i_0, j_0)$ 的分布情况可以判断是否有目标出现,即采用 $H(i_0, j_0)$ 作为检验统计量.

对 $H(i_0, j_0)$ 搜索最大值,可以得到双曲线的顶点估计值 (\hat{i}_0, \hat{j}_0) .实际测量中介质波速也是未知的,虽然根据实际的介质构成和潮湿程度等情况,可以查表

粗略估计出波速,但往往不准确,这会影响顶点位置的估计精度.故将波速也作为估计变量,其估计公式为:

$$\begin{aligned} (\hat{i}_0, \hat{j}_0, \hat{v}) &= \arg \max_{i_0, j_0, v} |H(i_0, j_0, v)|^2 \\ &= \arg \max_{i_0, j_0, v} \left| \sum_{i=i_1}^{i_N} \sum_{j=j_1}^{j_N} I(i, j, v) Q(i, j) \right|^2 \end{aligned} \quad (10)$$

由估计结果不难得到目标实际位置 (z_0, x_0) :

$$z_0 = \hat{v} \# \hat{j}_0 \# dt/2, \quad x_0 = \hat{i}_0 \# dx \quad (11)$$

由统计方法可估计出双曲线顶点的粗略值,介质波速则可由先验知识给出范围,这样可大大减少计算量.值得注意的是在式(10)的估计中, i_0 和 j_0 的估计并不受限于距离和时间的量化间隔影响,采用最优估计方法可得到远高于量化间隔的估计精度.而若对 $Q(i, j)$ 二值化后进行检测估计,由于信息的损失,其估计精度要差很多,这是传统 Hough 变换方法的不足之处.实际的目标形状多有不规则,其回波不是理想双曲线,仅是接近于双曲线,且 GPR 雷达回波中一般会有较多的相干性干扰及色噪声,故在实际情况中所提出的估计方法性能要有所下降,但实测数据处理结果表明该方法具有相当好的估计精度.此外,上述检测与估计方法并不需要知道目标回波的参考波形,这使得所提出的方法对各种复杂环境背景有很强的适用性,尤其是 GPR 雷达所探测的多为非均匀的色散介质,目标回波往往存在相位扭曲和波形畸变,这对目标的精确定位来说是一个严峻的挑战,本文所提出的方法不失为一种很好的解决方案.

4 实验结果分析

实验场地为长方形水泥池,坑内填的是自然粘土,自然粘土表面和内部分布有较多的粘土块(最大的约有乒乓球大小);录取设备为冲激体制探地雷达,中心频率 1GHz,发射脉冲宽度为 1ns,收发天线为一对加载平面天线,天线背面加有屏蔽;探测目标为一段直径 1cm 的螺纹钢及半径为 10cm 的金属半球.本文给出了两组典型数据的计算结果,其中一组数据为相距 140cm 的螺纹钢和金属半球,另一组为平行放置的相距 10cm 的两段螺纹钢.雷达 B2Scan 扫描轨迹偏离目标正上方一段距离.

对两组数据分别进行处理,图 4 为第一组数据的中间处理结果.图 4(a)为预处理后数据,横轴为扫描点,纵轴为采样点.而后采用加窗统计法提取 ROI 区域,图 4(b)为未加窗的统计法得到的归一化后的检验统计量 $Y(n)$,横轴为扫描点,

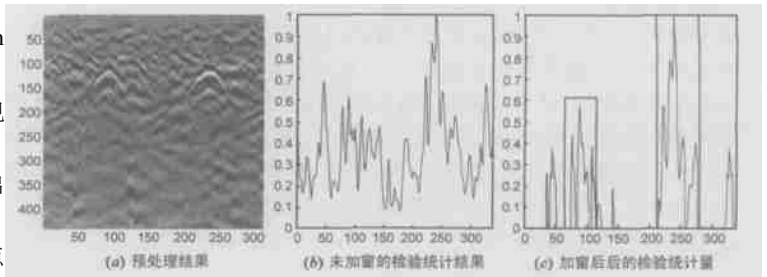


图 4 第一组数据的中间处理结果 2

纵轴为归一化幅值,图 4(c)为加窗统计法得到的 $Y(n)$,框中为目标区域。此法在未增加计算量的前提下,抑制了噪声的影响,减少了随机噪声所造成的虚警,而能量较强的杂波造成的虚警则需后续处理将之去除。

经 ROI 提取后,从第一组数据提取出了两块 ROI 区域,这里分别以 (\hat{N}) 和 $(\hat{0})$ 表示,第二组数据提取出一块 ROI 区域。对 ROI 区域作 Hough 变换检测和估计后,所得结果列在表 1。

其中,第一组 (\hat{N}) 和第二组 ROI 区域的 Hough 变换结果如图 5(a)、(b) 所示,圆圈中为目标双曲线聚焦的峰值,其中横轴(0~250)为采样点,纵轴(0~70)为扫描点,幅度轴(-1~1)为 Hough 变换后聚焦幅度值。

第一组 (\hat{N}) 和第二组 ROI 区域的图像分割及检测结果如图 6(a)、(b) 所示,横轴为扫描点,纵轴为采样点,黑线为检测出的双曲线轨迹。介质中波速,扫描点间隔,采样间隔。由以上结果可以看出,目标回波双曲线能量经过一次 Hough 变换聚焦到一个峰值区域。若定位精度不足要求可对此峰值区域进行一次 Hough 变换,检测 Hough 变换后的局域极值即可。

Hough 变换有效的将回波双曲线聚焦,实现了目标的精确定位并且具有对噪声不敏感的优点。实验数据表明:当 ROI 区域时,目标仍可被检测出,水平和纵深的定位误差小于 1cm,但存在多个虚假目标,虚警概率较高。由于去除直达波不完全等原因,数据中遗留具有强相关性的能量较强的杂波,这是造成虚警的主要因素。在检测时可以在 C-Scan 数据中与相邻 B-Scan 数据的处理结果作比较等相关处理,达到减少强杂波,降低虚警率的目的。

5 结论

本文主要研究了 GPR 海量数据的自动目标检测算法。将加窗改进的统计方法应用于海量数据中的目标检测和感兴趣区域的提取,并用实验数据证明了此法的有效性,而且此法计算量小,适合快速实时处理 GPR 应用中的公路质量检测、探雷等领域。进一步采用 Hough 变换对 ROI 区域进行处理,可去除虚假目标,实现精确目标定位。对实测数据处理结果表明此法抗噪声能力强,在输入数据信杂比较低的情况下,能正确检测出单个或多个目标,水平和纵深向的定位误差小于 1cm。

参考文献:

- [1] G Olhoef. Applications of ground penetrating radar [A]. Proc 6th Int Conf Ground Penetrating Radar (GPR 96) [C]. Japan: SPIE, 1996. 18-23.
- [2] Xiaoyin Xu, Eric L Miller. Statistical method to detect subsurface objects using array ground penetrating radar data [J]. IEEE Trans on Geo

表 1 实测 GPR 数据的目标检测与定位结果

	ROI 区域 SCR [*] / dB	目标数目 (实际/检测)	实际位置/cm (深度/水平位置)	检测结果/cm (深度/水平位置)	误差/cm
第一组 (\hat{N})	4 4947	1/1	2115/103	211941431/102 6	0 44/ 014
第一组 $(\hat{0})$	6 6954	1/1	2115/243	211759652/242 5	0 26/ 015
第二组	7 6654	2/2	2115/211 5 间距 10 cm	211 468525/21189565 间距 1014 cm	0 03/ 014 间距 0 4

* 此处 $SCR = E_s / E_c$, 其中 E_s , E_c 分别为信号的平均能量和杂波的平均能量。

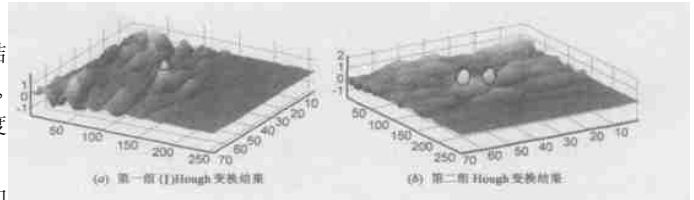


图 5 Hough 变换结果

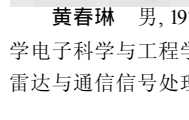
science and Remote Sensing 2002, 40(4): 963- 975.

- [3] P Gamba, S Lössani. Neural detection of pipe signatures in ground penetrating radar data [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2): 790- 797.
- [4] L van Kempen, H Sahli, J Brooks, J Cornelis. New results on clutter reduction and parameter estimation for landmine detection using GPR [A]. SPIE Proc 8th Int Conf Ground Penetrating Radar (GPR. 2000) [C]. Australia: SPIE, 2000. 872- 879.
- [5] Toru Kaneko. Radar image processing for locating underground linear objects [J]. IEICE Trans, 1991, E74(10): 3451- 3458.
- [6] Timothy Miller, Lee Potter. RFI suppression for ultra wideband radar [J]. IEEE Trans on Aerospace Electronic Systems, 1997, 33(4): 982-994.
- [7] Hough P V C. A method and means for recognizing complex patterns [P]. US Patent: 3, 069, 654, 1962.

作者简介:



陈德莉 女, 1979 年 8 月出生于山东省济南市, 现为国防科技大学 ATR 国家重点实验室在读博士, 研究方向为通信与信息系统。



黄春琳 男, 1973 年 4 月出生于江西赣州, 博士, 现于国防科技大学电子科学与工程学院任教, 研究方向为表层穿透雷达系统及应用、雷达与通信信号处理、遥感信息处理等。



栗毅 男, 1961 年 11 月生于山东省泰安市, 博士、教授、博士生导师, 主要研究方向包括: 雷达系统、信号处理、遥感信息处理。