

利用互相关和 Hough 变换快速检测探地雷达目标

王建* 袁宵 李禹 黄春琳 粟毅
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 考虑到探地雷达目标检测效率低的问题, 该文基于目标回波能量空间分布的三参数双曲线模型, 提出了一种快速的地下目标检测算法。算法首先利用相邻 1 维回波的相关性提取回波双曲线, 再能量加权拟合曲线以估计出回波模型的两个参数, 最后通过 1 维 Hough 变换来完成目标检测与定位。实测数据实验结果表明该文算法在不降低目标检测性能和定位精度的同时, 计算时间只有传统基于 Hough 变换检测算法的 1.5% 左右, 计算量的理论分析证明了该文算法在计算效率上的优势。

关键词: 探地雷达; 目标检测; 互相关; Hough 变换

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)05-1156-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01134

Fast Detection of Ground Penetrating Radar Objects Based on Cross Correlation and Hough Transform

Wang Jian Yuan Xiao Li Yu Huang Chun-lin Su Yi

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

Abstract: Considering the issue of low computation efficiency of Ground Penetrating Radar (GPR) object detection method, a fast algorithm is proposed based on the spatial distribution of reflected energy, which is modeled as a three-parameter hyperbola. A reflection hyperbola is first extracted by utilizing the correlation between adjacent reflections. Being weighted with reflection energy, the hyperbola is then fitted to estimate the two parameters of the reflected model. Finally, the object detection and localization task is completed with one dimensional Hough transform. The efficiency of the proposed algorithm is demonstrated both theoretically and experimentally. Compared with the traditional algorithm based on Hough transform, the proposed algorithm consumes only 1.5% computational time without sacrificing the detection and localization performance.

Key words: Ground Penetrating Radar (GPR); Objects detection; Cross correlation; Hough transform

1 引言

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)作为一种无损的探测手段, 在公路质量评估、地下管线探测、地下埋藏未爆物检测等方面具有广泛的应用。其中, 地下目标如空洞、缝隙、管线等的检测是 GPR 工程应用中亟待解决的关键技术之一, 该技术不仅属于 GPR 信号处理的中间环节, 可为后续目标分类等提供支撑, 也可以单独构建一个完整的处理系统面向具体应用。在 GPR 实际探测过程中, 由于地下有耗介质的多样性、电磁波在多层媒质中传播的复杂性, 以及雷达信号的拖尾等因素, 造成地下目标的回波信号处于强干扰的背景条件下, 信噪比较低, 且与雷达发射信号在时间上的隔离度较差, 因此实现稳健、高效的地下目标检测仍是一个挑战

性课题。

目前, GPR 目标检测通常采用基于目标回波能量空间分布的检测算法^[1]。根据是否需要对回波能量聚焦可将这些算法分为两大类。一类是从成像结果中检测目标^[2-4]。雷达成像从本质上来讲是对空间分布的目标回波能量进行聚焦, 成像目的更多的是便于从人的视觉角度分析雷达数据, 在目标自动检测方面并没有优势。这类算法的性能除受限于检测算法本身外, 还受成像算法在计算量、聚焦效果以及信息丢失等方面的制约, 检测效率较低。另一类是直接从 2 维回波数据(B-scan)中检测目标^[5-8]。B-scan 中目标回波呈现的双曲线形状是一种典型的目标回波能量空间分布。这类算法主要是通过 B-scan 中检测双曲线来实现目标检测, 以基于 Hough 变换的检测算法最为常见^[5,9]。Hough 变换是一种有效的检测和解析曲线的方法, 具有定位精度高、抗噪声和杂波干扰能力强的优点。但是 Hough

2012-09-03 收到, 2012-12-31 改回

*通信作者: 王建 wangjian85@yahoo.cn

变换面临着回波双曲线多维参数带来的计算量大的困难, 从而使得基于 Hough 变换方法的检测效率较低。检测效率不高直接导致了 GPR 目标检测算法的实际工程应用性不强。

本文针对 GPR 目标检测效率较低的问题, 基于 GPR 目标回波的三参数双曲线模型, 提出一种结合互相关和 Hough 变换的快速目标检测算法。算法首先假设 B-scan 中存在目标回波双曲线, 并利用相邻 1 维回波数据(A-scan)的相关性对其进行提取, 然后利用能量加权方法拟合所提取的曲线进而估计出目标回波双曲线的两个参数, 最后用 1 维 Hough 变换完成目标检测与定位。经过参数估计后, Hough 变换只需要在 1 维参数空间中进行, 在很大程度上解决了传统基于 Hough 变换检测方法计算效率低的问题。本文通过实测数据来验证算法目标检测与定位性能以及计算效率, 并从理论上分析证明本文算法在计算效率上的优势。

2 GPR 目标回波能量空间分布模型

对于散射截面积较小的目标, GPR 在扫描过程中, 其天线与目标存在相对距离变化, 天线位置与目标回波时延的关系满足或近似满足双曲线方程。如图 1 所示, 假设 GPR 采用收发共置天线(实际中是收发分置天线, 但天线间距不大), 且地下介质均匀, 忽略电磁波通过空气与地面交界面的折射, 天线水平位置 x 和回波时延 t 满足双曲线方程:

$$C_{v,x_0,t_0}(x,t): \frac{t^2}{t_0^2} - \frac{4(x-x_0)^2}{v^2 t_0^2} = 1 \quad (1)$$

式(1)定义的 $C_{v,x_0,t_0}(x,t)$ 即为 GPR 目标回波能量空间分布的三参数双曲线模型, 其中, v 是电磁波在地下传播速度, x_0 是目标位置的横坐标, t_0 为 X - T 平面内目标位置的纵坐标, 对应目标埋深 $d_0 = vt_0/2$ 。B-scan 中目标回波双曲线可由顶点坐标 (x_0, t_0) , 离心率 $e = v/2$ 唯一确定。而 A-scan 中目标回波能量的强弱则由天线与目标的距离决定, 目标离天线越近其回波能量就越强。因此在目标回波双曲线上, 顶点处的回波能量最强, 回波越偏离双曲线顶点其能量就越弱。

由上述模型可知, 通过检测 B-scan 中双曲线, 可以实现 GPR 目标检测; 若能进一步确定模型方程中的 3 个未知参数 v , x_0 和 t_0 , 则能实现目标的定位。在非均匀介质情况下, 曲线会有所变形, 但仍接近于双曲线。因此在实际地下媒质中, 目标回波能量空间分布的双曲线模型尽管存在误差, 但仍然是地下目标检测的理论研究和工程应用中的一个基本和重要的依据。

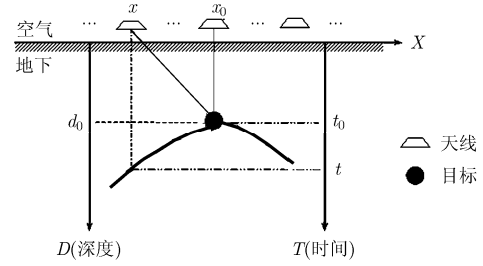


图1 GPR数据获取几何关系(天线沿水平方向(X 方向)扫描时, 天线位置 x 与目标回波时延 t 在 X - T 平面上满足双曲线方程)

3 检测方法

3.1 互相关方法提取回波双曲线

对于工作在自由空间的雷达, 利用收发信号的相关性构建的相关接收机是一种非常有效的目标检测手段。在相关接收机中, 目标回波信号模型可以表示为

$$y(t) = as(t - \tau) + w(t) \quad (2)$$

其中, $s(t - \tau)$ 是发射信号 $s(t)$ 时延 τ 后的信号, a 是信号幅度衰减因子, $w(t)$ 是高斯白噪声。对发射信号和接收信号作互相关运算:

$$r(t) = \sum_u y(u)s(u-t) \quad (3)$$

根据最大似然估计准则, 时延估计为

$$\hat{\tau} = \arg \max r(t) \quad (4)$$

相关接收机的判决表达式为

$$\left. \begin{array}{l} r(\hat{\tau}) > \gamma, \text{ 存在目标} \\ r(\hat{\tau}) < \gamma, \text{ 没有目标} \end{array} \right\} \quad (5)$$

其中 γ 是根据所要求的虚警率而确定的阈值。

然而在 GPR 目标检测中, 因为式(2)中的目标回波信号模型不再成立, 所以相关接收机不再有效。由于地下介质的作用, GPR 目标回波的波形发生了严重的畸变, 收发信号之间的相关性条件无法得到满足, 从而无法构建相关接收机。

在通常的 GPR 应用中, 空间采样间隔(也就是相邻 A-scan 间的水平距离)比较小, 相邻 A-scan 中来自同一目标的回波在波形上的畸变可以忽略。因此可以认为相邻 A-scan 中同一目标的回波具有很强的相关性, 于是可以建立和式(2)相似的相关信号模型:

$$A_n(t) = aA_{n-1}(t - \Delta\tau_n) + w(t), \quad n = 2, 3, \dots \quad (6)$$

其中, $A_n(t)$ 表示第 n 条 A-scan 中的目标回波, a 是信号幅度衰减因子, $\Delta\tau_n$ 是 $A_n(t)$ 相对于 $A_{n-1}(t)$ 的目标回波时延, $w(t)$ 表示噪声干扰。设 $A_n(t)$ 中目标回波时延为 τ_n , 则

$$\Delta\tau_n = \tau_n - \tau_{n-1}, \quad n = 2, 3, \dots \quad (7)$$

本文基于式(6)的相关信号模型用互相关的方法实现 B-scan 中目标回波双曲线的提取。对第 n 条 A-scan 和第 $n-1$ 条 A-scan 作互相关运算:

$$R_n(t) = \sum_u A_n(u)A_{n-1}(u-t) \quad (8)$$

对于经预处理抑制了直达波的回波数据,可以采取与(4)式相同的方式估计相对回波时延 $\Delta\tau_n$:

$$\Delta\tau_n = \arg \max R_n(t) \quad (9)$$

于是第 n 条 A-scan 中目标回波时延 τ_n 则可以递归计算得到

$$\tau_n = \begin{cases} \tau_1, & n = 1 \\ \tau_1 + \sum_{k=2}^n \Delta\tau_k, & n > 1 \end{cases} \quad (10)$$

记第 n 条 A-scan 对应的水平位置为 x_n , 则 (x_n, τ_n) 即为目标回波双曲线。

但目标回波双曲线 (x_n, τ_n) 的提取还存在两个问题: 其一是如何求取式(10)中初值 τ_1 , 其二是如何处理实际信号中由于噪声干扰导致相对回波时延 $\Delta\tau_n$ 估计不准。

式(10)中初值 τ_1 是一个无法用互相关方法确定的未知量, 直接求取存在困难。不妨任取初值为 τ'_1 , 即

$$\tau'_n = \begin{cases} \tau'_1, & n = 1 \\ \tau'_1 + \sum_{k=2}^n \Delta\tau_k, & n > 1 \end{cases} \quad (11)$$

令 $\Delta\tau_1 = \tau_1 - \tau'_1$, 则有

$$\tau'_n = \tau_n - \Delta\tau_1, \quad n = 1, 2, \dots \quad (12)$$

于是仍意初值条件下提取的双曲线 (x_n, τ'_n) 等价于 $(x_n, \tau_n - \Delta\tau_1)$, 即 (x_n, τ'_n) 是 (x_n, τ_n) 沿 T 方向平移 $\Delta\tau_1$ 后的结果。这也就说明, 通过拟合 (x_n, τ'_n) 估计出的双曲线顶点坐标为 $(x_0, t_0 - \Delta\tau_1)$, 离心率为 $v/2$ 。因此, 不论初值 τ_1 取何值, 用本文方法提取的双曲线都能估计出目标回波双曲线的 2 个参数 x_0

和 v 。在实际应用中直接取 $\tau_1 = 0$ 即可。图 2 所示的实验结果说明了本文方法提取的曲线和目标回波双曲线的关系。其中, 图 2(a)是一个含有目标回波双曲线的仿真 B-scan 切片; 图 2(b)即是用本文方法提取的曲线, 直接取 $\tau_1 = 0$; 图 2(c)则是在 B-scan 中将提取的曲线与目标回波双曲线进行叠加的结果, 叠加时提取的曲线沿着纵坐标方向平移以使得提取的双曲线与目标回波双曲线的顶点重合。可以发现本文提取的曲线与目标回波双曲线相比, 除在纵坐标方向上有平移外, 并没有其它差别。

在实际应用中 GPR 回波数据会受到噪声的污染。根据 GPR 目标回波的双曲线模型可知, 目标回波越偏离双曲线的顶点位置其能量越低, 从而信噪比越低。而在信噪比很低的 A-scan 中相对回波时延 $\Delta\tau_n$ 的估计非常不可靠, 这将导致在所提取曲线的左右两端出现随机起伏点。图 3 所示的实验说明了在噪声干扰下本文方法提取回波双曲线的情况, 其中, 图 3(a)是加有噪声的 B-scan 仿真切片, 图 3(b)是用本文方法提取的回波双曲线, 图 3(c)同样是提取的曲线在纵坐标方向平移后与目标回波双曲线在 B-scan 中的叠加结果。曲线提取结果显示所提取曲线的左右两端出现了随机起伏, 但从叠加结果则可以发现所提取曲线的中间主体部分仍与目标回波双曲线吻合很好。这是因为本文的曲线提取是一个递归的过程, 左端的起伏点和初值 τ_1 一样仅仅影响曲线在垂直方向上的位移, 而右端的起伏点则对曲线位置没有影响。因此在噪声干扰下, 通过拟合所提取曲线的中间主体部分仍可估计出目标回波双曲线的 2 个参数 x_0 和 v 。

综上所述, 用本文互相关方法提取的曲线可以用于估计目标回波双曲线模型的 2 个参数 x_0 和 v 。为了减少计算量, 在进行式(8)中的互相关运算时, 相关长度可以取得较小。这是因为相邻 A-scan 中目

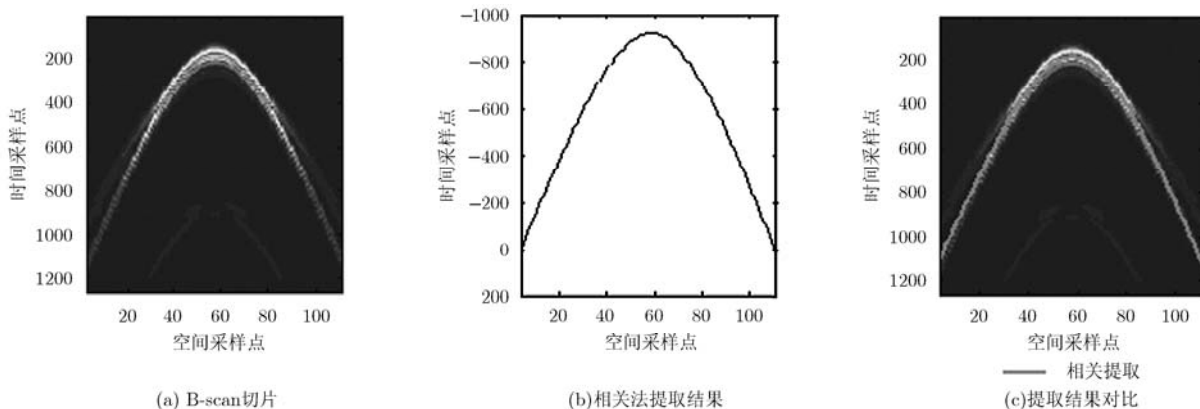


图2 本文方法提取的曲线与目标回波双曲线的关系

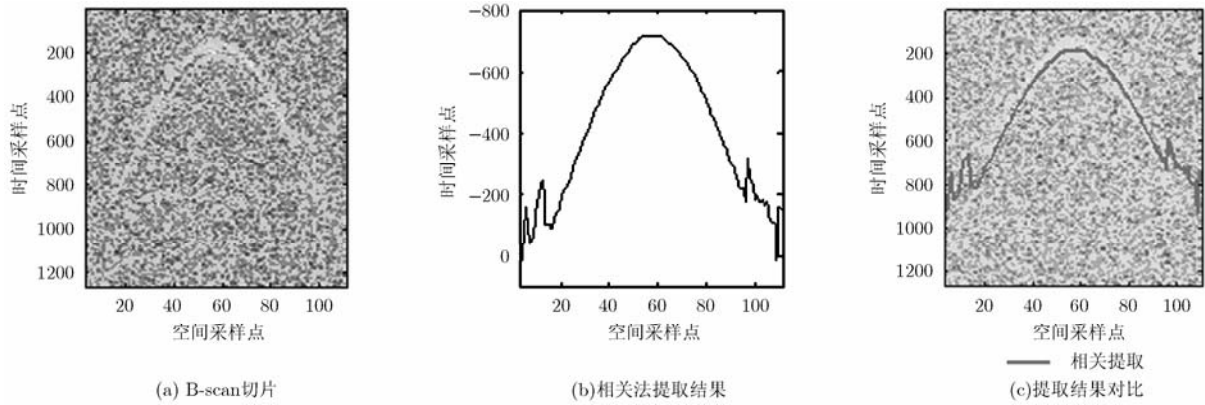


图 3 噪声干扰下本文方法提取的曲线与目标回波双曲线的关系

标回波时延相差不大，在长的相关长度下计算互相关值没有意义。

3.2 能量加权拟合双曲线

本文互相关方法所提取的曲线经过拟合即可实现目标回波双曲线模型参数的估计。将式(1)中的标准双曲线方程重写为如下的二次函数形式：

$$g(x) = t^2 = p_0 + p_1x + p_2x^2 \quad (13)$$

其中

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0^2 + 4x_0^2/v^2 \\ -8x_0/v^2 \\ 4/v^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

此时回波双曲线的拟合成为典型的二次曲线拟合问题，用最小二乘方法即可实现。由拟合结果即可求得双曲线模型的 2 个参数 x_0 和 v ，而求得的 t_0 没有意义。

在理想无噪情况下，直接拟合相关法提取的曲线即可实现双曲线模型参数的估计。但实际中回波数据不可避免会受到噪声的干扰，此时所提取的曲线两端将出现随机起伏的现象，不能直接拟合。图 4 给出了对图 3(c)中所提取曲线直接拟合的结果，可以发现曲线两端的随机起伏点干扰了拟合过程，

拟合结果偏离了所提取曲线的中间主体部分。因此在拟合前需要去除两端的随机起伏点，但自适应地去除会比较困难，本文通过能量加权的方法来自适应地抑制随机起伏点对曲线拟合的影响。

其实在用互相关法提取双曲线 (x_n, τ_n) 的同时，得到了一条 3 维曲线 $(x_n, \tau_n, R_n(\Delta\tau_n))$ ，其中 $R_n(\Delta\tau_n)$ 即为点 (x_n, τ_n) 处的互相关值。由于目标回波越偏离双曲线的顶点其能量越低，那么当点 (x_n, τ_n) 越偏离曲线顶点 (x_0, t_0) 时 $R_n(\Delta\tau_n)$ 也就越小。图 5 是图 3(c)中的曲线与对应的互相关值形成的 3 维曲线，从图中可以看出曲线两端随机起伏点的互相关值远小于中间主体部分。因此本文将 $R_n(\Delta\tau_n)$ 作为点 (x_n, τ_n) 的权值，对提取的曲线进行加权拟合。由于权值很小，随机起伏点对拟合结果的影响将受到抑制。图 4 给出了对图 3(c)中所提取曲线的能量加权拟合结果，结果显示曲线的中间主体部分得到了很好的拟合，从而可以正确估计出回波双曲线模型的 2 个参数 x_0 和 v 。在整个能量加权拟合过程没有涉及到参数调整，可自适应地完成。

3.3 1 维 Hough 变换检测与定位目标

Hough 变换是一种有效的检测和解析曲线的方法，具有定位精度高、抗噪声和杂波干扰能力强的

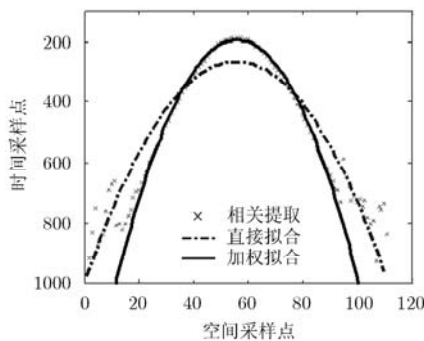


图 4 双曲线拟合结果

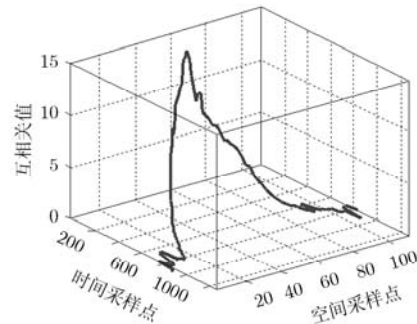


图 5 本文方法提取的 3 维回波双曲线

优点,常被用于 GPR 目标回波双曲线的检测。经典的 Hough 变换需要对图像做边缘检测及二值化处理,但在 GPR 的 2 维回波图像中,有效的边缘检测难以进行,所以常采用直接累加的方法来实现 Hough 变换良好的聚焦效果^[9]。

传统基于 Hough 变换的目标检测方法直接对 2 维回波数据 B-scan 做 Hough 变换来检测目标回波双曲线。记 B-scan 为 $B(x, t)$, 目标回波双曲线为 $C_{v, x_0, t_0}(x, t)$, 对 $B(x, t)$ 做累加实现 Hough 变换:

$$H(\tilde{v}, \tilde{x}_0, \tilde{t}_0) = \sum_{(x, t)} B(x, t), \quad (x, t) \in C_{\tilde{v}, \tilde{x}_0, \tilde{t}_0}(x, t) \quad (15)$$

其中 $(\tilde{v}, \tilde{x}_0, \tilde{t}_0)$ 即为双曲线 $C_{v, x_0, t_0}(x, t)$ 的 3 维参数空间。当 Hough 变换结果 $H(\tilde{v}, \tilde{x}_0, \tilde{t}_0)$ 出现陡峭的“尖峰”时表明存在双曲线 $C_{v, x_0, t_0}(x, t)$ 。通过检测 $H(\tilde{v}, \tilde{x}_0, \tilde{t}_0)$ 的峰值即可实现目标检测,而目标定位则可通过确定曲线的参数来完成。

$$(v, x_0, t_0) = \arg \max_{\tilde{v}, \tilde{x}_0, \tilde{t}_0} |H(\tilde{v}, \tilde{x}_0, \tilde{t}_0)| \quad (16)$$

从式(15)可以看到,直接对 B-scan 做 Hough 变换需要在双曲线的 3 维参数空间 $(\tilde{v}, \tilde{x}_0, \tilde{t}_0)$ 中进行,计算量大。从 Hough 变换结果 $H(\tilde{v}, \tilde{x}_0, \tilde{t}_0)$ 中检测峰值也要面对参数空间维数的问题。因此实际应用中,传统基于 Hough 变换的目标检测方法将面临计算效率的问题。

在本文中,通过用互相关的方法提取双曲线,并经能量加权拟合后已经估计出目标回波双曲线模型的 2 个参数 x_0 和 v , 因此 Hough 变换只需要在 1 维参数空间中进行。

$$H(\tilde{t}_0) = \sum_{(x, t)} B(x, t), \quad (x, t) \in C_{v, x_0, \tilde{t}_0}(x, t) \quad (17)$$

同样,当 $H(\tilde{t}_0)$ 中出现陡峭的“尖峰”时表明存在目标回波双曲线 $C_{v, x_0, \tilde{t}_0}(x, t)$ 。检测 $H(\tilde{t}_0)$ 的尖峰即可实现 GPR 目标的检测,而目标定位只需最终确定参数 t_0 即可。

$$t_0 = \arg \max_{\tilde{t}_0} |H(\tilde{t}_0)| \quad (18)$$

由于 Hough 变换以及峰值检测均是在 1 维参数空间中进行,相比传统基于 Hough 变换的目标检测方法,本文算法的计算量将明显降低。

3.4 算法流程

在 GPR 目标检测前,需要进行预处理抑制直达波。由收发天线间的直耦波和地面反射波组成的直达波能量非常强,会掩盖目标回波,严重影响目标的检测。但由于要考虑不同的天线间距、天线高度以及地面类型等多种情况,使得直达波的抑制又是一个非常复杂的问题。本文采用基于 $F-k$ 滤波器的方法^[10]对 GPR 回波数据进行预处理,抑制直达波。

该方法能够有效处理非平坦表面和浅表层的直达波,而且参数调整简单,可用 FFT 快速实现。

包括预处理,本文提出的 GPR 目标检测算法共 4 个步骤,其流程如图 6 所示。

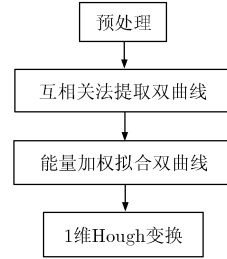


图6 本文算法流程图

4 实验结果与分析

本文用 Radar Eye 系统采集的回波数据来测试算法的性能。Radar Eye 是由国防科学技术大学遥感信息处理实验室研制的脉冲 GPR 系统。图 7 是 Radar Eye 工作时的照片,系统包括雷达主机和天线两大组件。Radar Eye 可以发射不同中心频率的脉冲,以及挂载不同型号的天线。实验中,雷达发射中心频率 1 GHz 的高斯微分脉冲信号,脉冲宽度约 1 ns,采用一对空气匹配的加载 TEM 喇叭天线收发信号。实验场景如图 8 所示,干燥的沙坑中埋有不同的金属小目标。采集数据时,天线底部距离沙坑上表面 4 cm,沿水平方向均匀扫描地下目标。实验共采集了 6 组回波数据,如图 9(a)–图 9(f)所示。分别用本文算法和传统基于 Hough 变换的方法进行目标检测。算法用 Matlab 语言编程实现,运算计算机处理器为主频 3.06 GHz 的 Pentium® 4 CPU。

如图 9 所示,传统基于 Hough 变换的方法若检测到目标,则在 B-scan 数据中直接标出目标所在位置。为便于观察对比,本文算法若检测到目标,则在 B-scan 中绘出最终确定的目标回波双曲线图形,双曲线的顶点即为目标位置。实验结果显示,本文方法和传统基于 Hough 变换的方法都成功的从 6 组

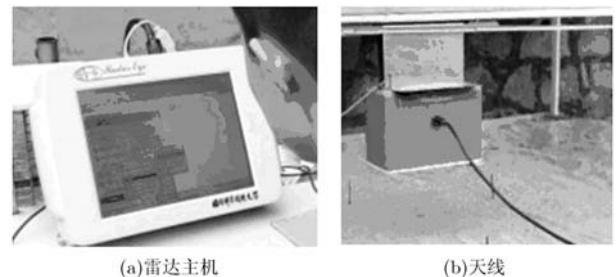


图7 Radar Eye 系统

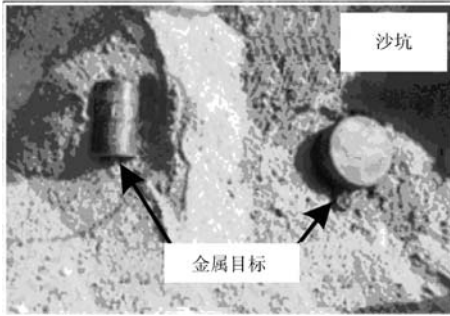


图8 实验场景

实测数据中检测出目标，且本文方法确定的目标回波双曲线的顶点与传统方法的定位结果非常接近，说明两种方法在定位性能上相当。

表 1 列出了实验中两种算法的运算时间。传统方法中对 B-scan 直接做 Hough 变换时，不考虑目标位置的先验信息，将 B-scan 的空间采样点作为参数 x_0 的取值范围，将 B-scan 的时间采样点作为参数 t_0 的取值范围，根据干沙的介电常数范围取参数 v 的采样点数为 100。而在本文方法的 1 维 Hough 变换中，同样将 B-scan 的时间采样点作为参数 t_0 的取值范围。由运算时间可知，本文方法所需的计算时间只相当于传统方法的 1.5% 左右，足以表明本文算法在计算效率上的优势。

本文算法在计算效率上的优势还可以从理论上进行证明。设 B-scan 数据大小为 $M \times N$ ，其中 M 和 N 分别为回波的时间采样点数和空间采样点数，且

经预处理后抑制了直达波。传统基于 Hough 变换的方法的计算量主要来自于直接对 B-scan 数据做 Hough 变换。对 B-scan 直接 Hough 变换时，设参数 v, x_0 和 t_0 的采样点数分别为 N_v, N_{x_0} 和 N_{t_0} ，在没有目标位置先验知识的情况下 $N_{x_0} = N, N_{t_0} = M$ ，而 N_v 需要根据地下介质的先验知识来设定。那么对 B-scan 数据做 Hough 变换需要的乘法和加法次数都为 $O(M \times N^2 \times N_v)$ 。本文方法的计算量主要来自互相关计算、曲线拟合和 1 维 Hough 变换 3 个步骤。在互相关计算中，设相关长度为 L ，则需要的乘法和加法次数都为 $O(M \times N \times L)$ 。但由于实际中只需要计算很短的相关长度，因此互相关计算的计算量实为 $O(M \times N)$ 。在曲线拟合中，样本数据点长度为 N ，用最小二乘法拟合含 3 个未知参数的曲线需要的乘法和加法次数都为 $O(N)$ 。而 1 维 Hough 变换需要的乘法和加法次数都为 $O(M \times N)$ 。表 2 综合对比了两种算法的计算量分析结果，传统方法的计算量与 $M \times N^2 \times N_v$ 成比例，而本文方法的运算量只与 $M \times N$ 成比例，因此本文方法的计算效率要远高于传统方法。虽然根据目标位置的先验知识可以缩小传统方法中 Hough 变换参数 x_0 和 t_0 的搜索范围，但同样也可以减少本文方法中互相关计算和 1 维 Hough 变换的计算量。

在实际应用中，地下介质要比实验场景复杂，杂波干扰的问题更加突出，本文算法的性能将有所下降。为了进一步提高本文算法的实用性，在数据

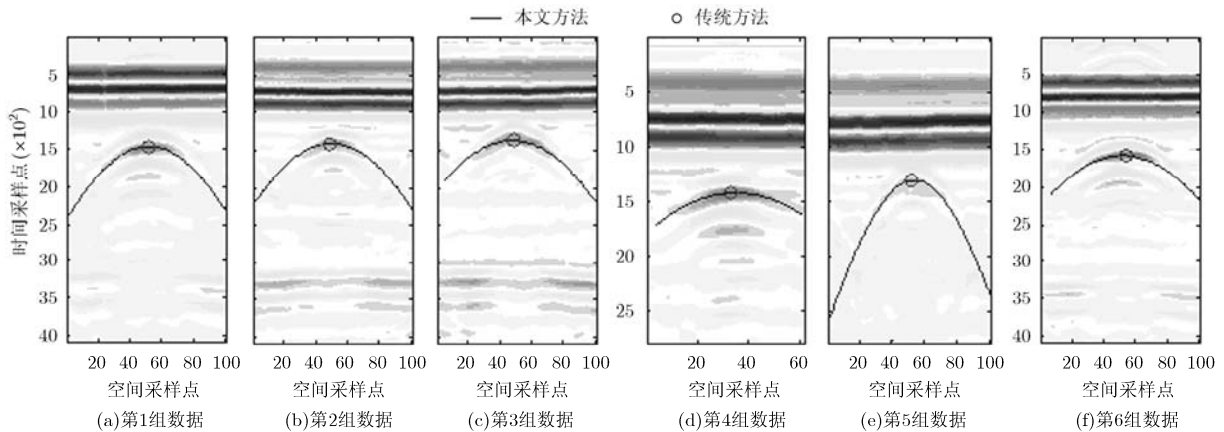


图9 实测数据检测结果

表1 算法运算时间

实验数据	数据编号	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
	数据大小	4096×100	4096×100	4096×100	2800×60	2800×100	4096×100
运算时间(s)	传统方法	60.54	52.71	52.25	36.73	41.44	60.22
	本文方法	0.78	0.77	0.80	0.46	0.55	0.79

表2 算法计算量分析

方法	乘法次数	加法次数
传统基于 Hough 变换的方法	$O(M \times N^2 \times N_v)$	$O(M \times N^2 \times N_v)$
互相关计算	$O(M \times N)$	$O(M \times N)$
曲线拟合	$O(N)$	$O(N)$
1 维 Hough 变换	$O(M \times N)$	$O(M \times N)$
总计算量	$O(M \times N) + O(N)$	$O(M \times N) + O(N)$

预处理阶段可以进行 ROI(Region Of Interest)的提取。ROI 的提取能有效抑制杂波干扰, 提高后续目标检测步骤的效率。关于 GPR 回波数据的 ROI 提取已有一些研究成果, 如加窗统计法^[9], 该方法基于 GPR 1 维回波数据的统计模型可以从海量数据中实现快速高效的 ROI 提取。此外 ROI 的提取还能将存在多个目标的 B-scan 分割成单个目标的切片, 方便本文算法提取目标。

5 结束语

基于目标回波能量空间分布实现 GPR 地下目标检测是一种有效的方法。本文根据 GPR 目标回波能量空间分布的双曲线模型, 利用相邻 A-scan 中目标回波的相关性和 Hough 变换提出了一种 GPR 目标检测算法, 可以实现地下目标的快速检测和定位。实测数据的实验结果表明本文方法在目标检测与定位性能上与传统基于 Hough 变换的方法相当, 但计算时间只有传统方法的 1.5%左右, 计算量的理论分析结果证明了这一计算效率上的优势。

参 考 文 献

- [1] Jol H M. Ground Penetrating Radar Theory and Applications [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2009: 462-469.
- [2] Jin T and Zhou Z. Ultrawideband synthetic aperture radar landmine detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3561-3573.
- [3] Daniels D J. A review of landmine detection using GPR[C]. European Radar Conference, Amsterdam, 2008: 280-283.
- [4] Soldovieri F, Solimene R, Monte L L, *et al.* Sparse reconstruction from GPR data with applications to rebar detection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(3): 1070-1079.
- [5] Carlotto M J. Detecting buried mines in ground penetrating radar using a Hough transform approach[C]. *Battlespace Digitization and Network-Centric Warfare II*, Orlando, 2002: 251-261.
- [6] Simi A, Bracciali S, and Manacorda G. Hough transform based automatic pipe detection for array GPR: algorithm development and on-site tests[C]. *IEEE Radar Conference*, Rome, 2008: 1-6.
- [7] Wang Z W, Zhou M, Slabaugh G G, *et al.* Automatic detection of bridge deck condition from ground penetrating radar images[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, 8(3): 633-640.
- [8] Yoldemir A B and Sezgin M. A least squares approach to buried object detection using ground penetrating radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(6): 1337-1341.
- [9] 陈德莉, 黄春琳, 粟毅. 用统计方法和 Hough 变换进行 GPR 目标检测定位[J]. *电子学报*, 2004, 32(9): 1468-1471.
Chen De-li, Huang Chun-lin, and Su Yi. An integrated method of statistical method and Hough transform for GPR targets detection and location[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2004, 32(9): 1468-1471.
- [10] Hayashi N and Sato M. *F-k* filter designs to suppress direct waves for bistatic ground penetrating radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1433-1444.

王 建: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为遥感信息处理.

李 禹: 男, 1975 年生, 副教授, 研究领域为遥感信息处理.

粟 毅: 男, 1961 年生, 教授, 研究领域包括超宽带雷达系统、信号与信息处理、遥感信息处理.