

# 地下管线探测回波中目标双曲线的快速拟合方法<sup>①</sup>

夏 锋, 黄廷磊, 刘邵华

(桂林电子科技大学 计算机科学与工程学院, 桂林 541004)

**摘 要:** 本文所提出的 GPR 目标双曲线识别方法包含两个步骤: 首先对 GPR 回波图像进行边缘检测, 然后用模板匹配算法提取出感兴趣的数据; 进而根据图像中目标回波的双曲线特征, 对提取出的数据采用改进的 Hough 变换检测目标双曲线, 去除虚假目标并实现目标双曲线参数的精确提取. 实测数据检测结果表明: 该方法能快速拟合出回波中目标双曲线的多个参数并将其成功地将其恢复出来.

**关键词:** 地质雷达; 模板匹配; Hough 变换; 双曲线拟合; 钢筋及管道识别

## A Rapid Method of Fitting out Targets Hyperbola of Underground Pipeline Prospecting Image

XIA Feng, HUANG Ting-Lei, LIU Shao-Hua

(School of Computer Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The detection and recognition method of GPR targets hyperbola presented in this paper has two steps. First, the GPR image edge was detected, then template matching algorithm is used to identify out the pixels of hyperbola; Second, according to the hyperbola feature of GPR B-scan data, a modified Hough transform is used to detect the hyperbola from the data that being matched before, aims to get rid of the false target's hyperbola and recognize the parameters accurately. The method had been employed to find and fit targets hyperbola from GPR data. The results evaluated from real data show that all parameters of targets hyperbola are fitted fast and correctly.

**Key words:** GPR; template matching; hough transform; hyperbolic fitting; rebar and pipeline recognition

### 1 引言

随着我国高速公路建设的飞速发展, 公路检测面临着日益繁重的任务. 地质雷达作为一种高分辨探测技术, 可以对浅层地质结构和地下目标体进行非破坏性探测, 又因其轻便、快捷、准确等特点, 现已成为路桥质量检测和维护的首选方法<sup>[1]</sup>. 由于地下介质不均匀, 以及多种干扰因素产生的杂波噪声造成了 GPR 数据的自动目标检测异常困难. 目前常用的目标识别方法有: 最小二乘法、Hough 算法、BP 算法、遗传算法等. 本文通过对雷达回波图像特征的分析, 将模板匹配和 Hough 算法结合达到快速检测路桥钢筋目标双曲线的目的, 为以后建模反演目标提供准确信息.

### 2 管道或钢筋等目标 GPR 图像的特点

地质雷达多利用高频电磁波超宽频窄脉冲向地下

发送电波并接收目标体反射波的方式工作, 是探测地下目标或介质分布的一种重要的勘探地球物理方法<sup>[2]</sup>. 图 1 为在路桥或地下管线探测时, 常采用的剖面法示意图<sup>[3]</sup>, 显示了 GPR 移动产生双曲线的原理以及圆柱体目标半径  $R$  和双曲线的关系.

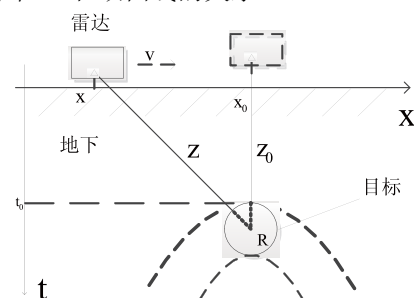


图 1 目标与雷达之间的几何关系

假设雷达收发天线共置, 雷达在地面沿水平方向

<sup>①</sup> 收稿时间:2012-10-14;收到修改稿时间:2012-12-11

移动探测,若发射和接收的信号均为理想的窄脉冲,则在形成的二维地下剖面图像中,钢筋或管道等圆柱体目标回波应表现为一理想上凸双曲线形状<sup>[4]</sup>,双曲线的各个参数和地下介质及目标有着直接的关系<sup>[5]</sup>:

$$\frac{(y-y_0)^2}{a^2} - \frac{(x-x_0)^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

其中,  $(x_0, y_0)$  为双曲线的中心,  $(a, b)$  分别为其实、虚轴的一半. 图 2 显示的是一钢筋回波数据及图像化的显示,进一步地挖掘目标对象的信息需要提取双曲线的各个参数.

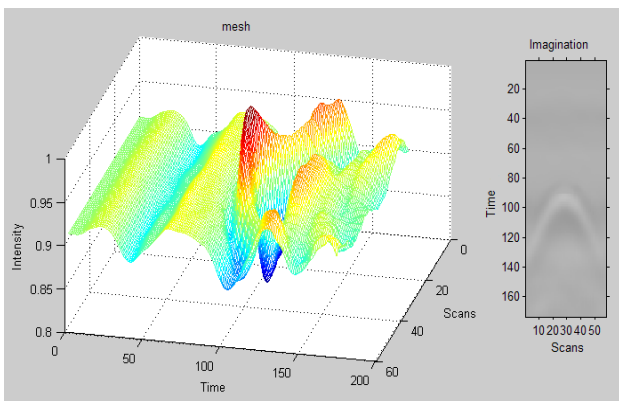


图 2 钢筋回波中的双曲线及图像化显示

原始 GPR 数据范围很大,为了利用图像处理领域中的方法,需要先归一化处理,图 2 中可以看出图像化之后形成的两条清晰的双曲线,准确提取图像中双曲的参数是反演目标信息的基础.

### 3 目标检测算法

本文提出的从大量回波数据中自动检测双曲线并提取目标双曲线特征信息的算法包含四个处理过程:预处理;图像化形成二值边缘图;模板匹配检测出具有双曲线特征的点的坐标;Hough 变换拟合直线和双曲线.

#### 3.1 模板匹配算法提取双曲线的各点坐标

双曲线信号最显著的特征是关于顶点左右对称以及在顶点两边单调下降.可用此特点搜寻感兴趣区域得到顶点信息,顶点确定后,采用目标回波峰值跟踪法<sup>[6]</sup>分别向顶点的左右两边搜寻双曲线的其它部分.由于未计算对称度,只对符合双曲线特征的顶点进行统计,会有少数伪顶点被选中,在进一步搜寻双曲线时,要对双曲线的两翼强度设定一个下限阈值,并且

要保证双曲线的拟合度小于误差阈值时,才认为是真双曲线.

#### 3.2 Hough 变换拟合直线

Hough 变换(Hough Transform)是一种使用基于模型的控制策略在图像全局范围内组织数据的方法,它需要为选择的一类目标建立一个精确的参数化方程,之后将数据从图像空间变换到定义的参数空间,在参数空间累积的结果作为原始空间是否存在该目标的证据.该方法的一个突出优点是检测结果具有鲁棒性,即对数据的缺失和噪声不是非常敏感<sup>[7]</sup>,缺点在于其计算量较大,实时性不强.

Hough 变换检测直线时,直线  $y = kx + y_0$  可表示成如下极坐标方程:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

其中:  $\theta \in [0, 2\pi]$ , 为自变量,  $x$  表示极径与轴的夹角;  $\rho \in [0, R/2]$ , 表示原点与直线的距离,为因变量,  $R = \sqrt{M^2 + N^2}$ ,  $M, N$  分别是图像高度和宽度;待求的两个参数可表示为:  $\begin{cases} k = -\cot \theta \\ y_0 = \rho / \sin \theta \end{cases}$ .

这里先用 Hough 算法检测地质雷达回波中的直达波,经二值边缘化后形成水平直线,通过对此直线的提取,可以计算出地质雷达天线距离地面的高度,为反演目标的埋深做铺垫.针对本论文中的特殊应用,对水平直线有  $\theta = \pi/2$ , 则有:  $\begin{cases} k = 0, k \text{ 为常数, 只} \\ y_0 = \rho \end{cases}$

有  $\rho$  是待求量,故按照 Hough 算法要求,只需对  $\rho$  进行投票.根据投票结果  $H(0, \rho_j)$ , 选取最符合双曲线特征的  $\rho_j$ .

Hough 变换计算公式为:

$$H(0, \rho_j) = \sum_{\rho_j=Y_{M_1}}^{Y_{M_2}} \sum_{i=1}^N I(i, \rho_j) O(i, \rho_j) \quad (3)$$

其中  $I$  为二值化后的数据,  $I(i, j) = \begin{cases} 1, |S(i, j)| \geq \sigma \\ 0, |S(i, j)| < \sigma \end{cases}$ ,  $S$  为地质雷达采集的数据,  $O$  为 1 行  $N$  列的全 1 矩阵,  $(Y_{M_1}, Y_{M_2})$  为直线的取值范围.由于天线参数设置不同,地下介质、目标深度等因素不同,使得归一化后的 GPR 图像的灰度直方图仍在很大范围内变化,阈值  $\sigma$  只能根据具体的情况设定.这里对单道扫描数据做差分运算,由于在波峰波谷处曲线导数为 0,只要找出差分后的图像中相异的点即可描绘出边缘,定义  $I(i, j) = \begin{cases} 1, |S(i, j) - S(i, j-1)| \geq \sigma_0 \\ 0, |S(i, j) - S(i, j-1)| < \sigma_0 \end{cases}$ ,  $\sigma_0$  控制边沿的生

成, 通过差分运算, 去除图像中与环境相关的背景数据, 只保留图像中变化的有用信息, 这样与复杂环境的相关性变小, 使得复杂的阈值确定问题大大简化, 实验结果也证明了此边沿检测的良好性能。

通过选取两个得票最多的值即可确定直线的方程, 这两条直线即为直达波所形成:

$$J(y_{1,2}) = \max_{j \in (M_1, M_2)} H(0, \rho_j) \quad (4)$$

### 3.3 目标双曲线的拟合

按照传统的 Hough 变换算法, 拟合双曲线时, 式(1)中有 4 个未知参数  $(x_0, y_0, a, b)$ , 参数空间为一四维空间<sup>[8]</sup>, 显然, 无论从计算速度还是存储空间来说都不能达到设备现场处理的实时性的要求. 本文从双曲线定义出发, 在模板匹配的基础上通过变换只对一个参数投票<sup>[9]</sup>, 完成对双曲线方程的拟合, 可有效地减小计算量。

路桥钢筋回波中的上凸双曲线中心被移到  $(x_0, y_0)$ , 则双曲线的顶点纵坐标为与之和. 由式(1)可得到:

$$b = a \sqrt{\frac{(x - x_0)^2}{(y - y_0)^2 - a^2}} \quad (5)$$

对未知的参数  $a$  在一定范围内投票<sup>[10]</sup>, 得到一系列的  $a_j$  以及与之对应的  $y_{0j}$ , 从而求的对应的参数  $b_j$ , 得到一簇双曲线, 在这些双曲线中, 选取与匹配出的双曲线点集最接近的双曲线方程, 定义误差函数如下:

$$e_i(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}, a_i, b_i, x_0, y_0) = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ji} - \hat{y}_j)^2 \quad (6)$$

其中,  $\hat{y}_j$  是实际检测出的符合双曲线特征的第  $j$  点的纵坐标.  $y_{ji}$  为第  $i$  次拟合得到的双曲线的第  $j$  点的纵坐标, 即:

$$y_{ji} = y_{0i} + a_i \sqrt{\frac{(x_j - x_0)^2}{b_i^2} + 1} \quad (7)$$

在所有  $e_i$  中, 挑选出最小的, 且满足判决式(8)才认为此双曲线成立:

$$J(x_0, y_0, a_i, b_j) = \min_i e_i < T_p \quad (8)$$

### 3.4 算法步骤

(1) 对原始 GPR 数据图像化, 并进行边缘检测, 获得二值边缘图像。

(2) 对纵坐标在 1/4 以内的数据投票, 票数最多的值即为直达波所到达的时间。

(3) 遍历 1/4 到 1/2 范围内所有点, 根据目标回波

峰值跟踪法统计符合双曲线特征的顶点, 保存所有符合要求的顶点入队列。

(4) 清零所有参数列表, 取出一个队列中的顶点, 若已全部处理完, 则退出。

(5) 匹配双曲线的左支, 要求左侧点比当前点纵坐标相等或更低. 为增强鲁棒性, 防止过早因断点或干扰中断匹配, 这里放宽匹配规则: 同行中断点数不超过 2 个, 若超过 2 个则向下匹配, 同列或左列向下空缺点数不超过 3 个, 否则结束左支匹配. 同理匹配右侧的双曲线分支, 将此点集  $Q$  保存至数组  $S$ 。

(6) 若  $S$  内点集  $Q$  的点数小于下限强度阈值  $T_i$ , 则此顶点为伪顶点, 丢弃并跳转至(4), 否则执行(7)。

(7) 对  $a$  在(1,50)范围内, 步进 0.5 进行投票, 根据公式(5)求出对应的参数  $y_0$  和  $b$ 。

(8) 根据参数  $a, b, x_0, y_0$  和公式(7), 求出对应的  $y_{ji}$ , 再根据公式(6)求出误差, 若误差小于阈值  $T_p$ , 则保存此误差值, 至(9), 否则转至(4)。

(9) 在保存的所有误差中找出最小的误差值, 对应的各参数即为最接近检测的双曲线点集, 认为该双曲线即为所求. 转至(4), 重新拟合下一个顶点, 直到所有点集运算完。

该方法实际上是将 4 维的投票空间降到 1 维来达到实时性要求. 若图像中待检测的图像点个数为  $n$ , 参数空间每个坐标的取值范围为  $N$ , 符合双曲线特征的点个数为  $m$  ( $m \ll n$ ), 调整双曲线的开合程度使其与匹配的数据误差最小, 该算法计算复杂度为  $O(mN)$ , 远远小于普通的 Hough 变换检测双曲线的计算量  $O(nN^4)$ , 从而大大提高了计算效率, 满足实时性计算要求。

## 4 对实测数据的处理及分析

本文处理两组 SIR 雷达在路桥上采集的实测数据, 900MHz 天线, 每秒采样 100 道数据, 每道 512 采样点, 每采样点 16bits, 时窗 30.0nS, 最大测深 1.8m, 混凝土介电常数为 6.25F/m. 采集的数据经 Matlab R2010a 读入编程处理, 图像化后如图 3(a)所示, 横轴为扫描线, 纵轴为采样点. 所有处理均在一台 CPU 为 Pentium(R) Dual-Core E5700, 2GB 内存的 PC 机上执行。

### 4.1 图像化及边缘检测

图 3 为第一组采集到的数据处理的中间结果, 图 3(a)显示直接得到的 GPR 图像对比率很低, 对其进行

图像增强后能直观的观察反射波形状(实际应用中可不用对其增强显示也能拟合出双曲线), 然后再用 canny 算子进行边缘检测, 得到二值化后的 GPR 图像, 如下图 3(c).

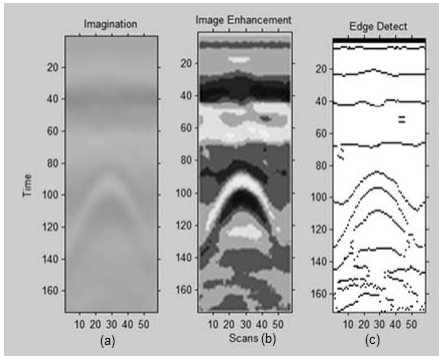


图 3 GPR 图像化、增强以及边缘提取

由于所用天线频率较高, 屏蔽性好, 干扰较小, 增强后的图像可以看到钢筋反射回波形成两条双曲线, 且线条清晰连续, 较为理想, 有利于模板匹配双曲线. 这里根据所使用的天线及现场环境, 设定下限强度阈值  $T_i = 20$ , 上限拟合度阈值  $T_p = 1.0$ , 满足这两个阈值才能认为是有效的双曲线.

### 4.2 直线及双曲线的拟合

由于路桥检测时, 雷达天线与地面的距离不变, 接收到直达波的时间固定, 通过边缘检测二值化后是一条水平直线, 通过 3.2 介绍的方法, 规定  $y_0$  范围为:  $M / 20$  到  $M / 3.5$ ,  $M$  为图像高度. 本例中, Hough 检测结果如图 4(a)所示, 前两个横坐标最大值分别出现在 23 和 40 处, 即为直达波的波峰与波谷到达接收天线的时, 再根据电波在空气中传播的速度, 系统接收与发送电波之间的延时以及反射和接收天线之间的距离即可确定天线距离地面的高度.

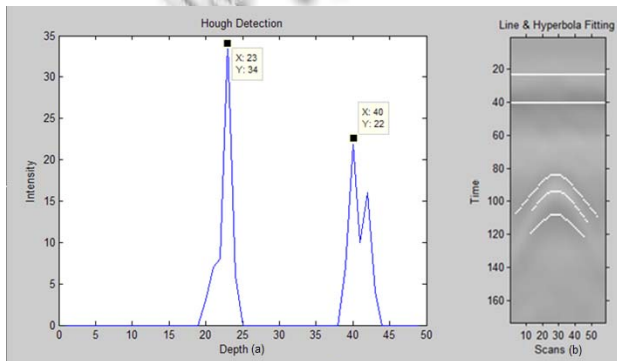


图 4 Hough 变换对  $y_0$  的投票及双曲线拟合的结果

通过 3.3 介绍的方法, 可以拟合出地下目标反射的三条双曲线. 从图 4(b)和表 2 中可以看出, 前两条双曲线离地面近, 信号强度较大, 模板匹配出的双曲线像素多且拟合误差小于 1.0, 符合双曲线特征. 第二条曲线由于电磁波传输的距离远, 开口要小于第一条, 符合双曲线的焦点越远, 开口越小的规律. 其中最下面一条距离远, 强度最小, 拟合误差会相对较大, 参考价值不大. 详细数据见表 2 和 3.

对多个目标的情况下, 此方法仍能快速识别并拟合出双曲线, 图 5 和 6 是对多个目标双曲线拟合的结果.

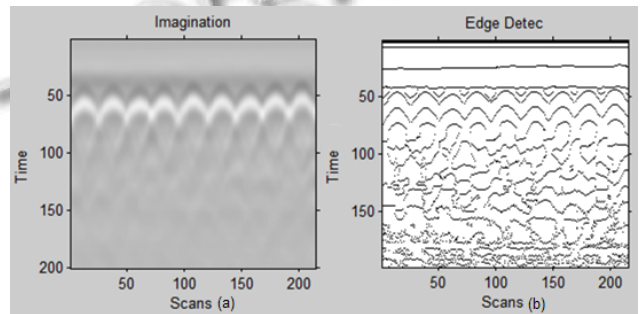


图 5 多目标 GPR 图像化及边缘提取

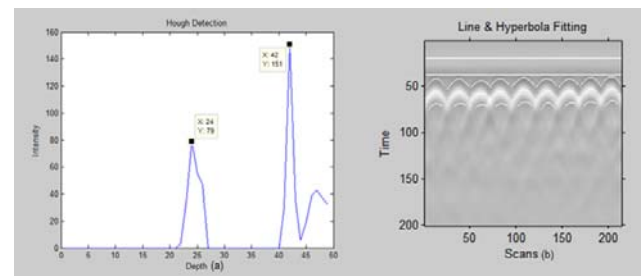


图 6 Hough 变换对  $y_0$  投票结果及双曲线拟合结果

通过图 6 可以看出, 拟合的双曲线和原目标反射回波非常吻合, 通过表 3 中的数据也能看出, 双曲线匹配强度均大于 20, 均方差均在 0.9 以内, 符合双曲线的特征, 对 9 个目标的拟合用时也只在 0.1 秒以内, 满足实时计算的要求, 如果不对第三条双曲线拟合, 所用时间还会进一步减少.

表 1 实测 GPR 数据的直线目标检测与定位结果

组	第一条直线坐标	第二条直线坐标
单目标直线拟合结果:	(23, 34)	(40, 22)
多目标直线拟合结果:	(24, 79)	(42, 151)

确定顶点及中心坐标后, 即可求出双曲线的方程. 表 3 中只给出第一个双曲线的结果, 但在计算时间时仍包括对第二和第三条双曲线的拟合所用的时间, 所

统计用时只包括对参数提取的时间,不包括绘图所用的时间。

从表 2 表 3 给出的拟合出详细结果中可以看出:

(一) 双曲线渐近线的斜率  $\tan \omega = b/a$ , 实测数据中纵轴单位时间为  $30/512nS$ , 横轴单位为  $1/100m$ , 这里需要归一化, 则表 3 中求出  $\tan \omega = b/a * 512/30/100 = 0.1198m/nS$ , 与电磁波在混凝土中的传播速度  $v = c/\sqrt{\epsilon_r} = 0.12m/nS$  相吻合, 可利用此参数计算介质介电常数  $\epsilon_r = (c/v)^2 = 6.24F/m$ . 相对于其他双曲线拟合方法, 本文提出的方法单位 CPU 频率上的用时最短。

(二) 第一组数据第一条双曲线顶点为 84, 电磁波在混凝土中传播时间为  $(84 - 23) * 30/512 = 3.57nS$ , 则钢筋埋深为  $H = t/2 * v = 0.214m$ , 此钢筋的埋深为 22cm, 平均误差为 2.7%. 同理第二组钢筋平均埋深为 7.8cm, 实际埋深约在 8cm 处, 误差为 2.5%, 其误差已经控制在非常小的范围内。

表 2 实测 GPR 数据的单目标双曲线检测与拟合结果

顶点	中心	a	b	方差	用时(S)
(28,84)	(28,75)	9	6.82	0.912	0.004293
(28,94)	(28.5,45.5)	48.5	17.98	0.822	0.002724
(28,108)	(28.5,102.5)	5.5	5.0082	0.896	0.004762
				共	0.022312
:					

表 3 实测 GPR 数据的多目标双曲线检测与拟合结果

第二组	顶点	中心 a	b	方差	用时(S)
(14,46)	(14,35.5)	10.5	6.0652	0.1349	0.00425
(38,46)	(38.5,39)	7	5.1731	0.1984	0.005642
(62,48)	(62.5,43)	5	4.5488	0.3128	0.001877
(83,46)	(83.5,37)	12	7.3839	0.1477	0.002456
(109,45)	(109,37)	8	6.1379	0.2348	0.002861
(133,46)	(133,37.5)	8.5	6.1382	0.3679	0.006046
(158,46)	(158.5,37)	9	6.1395	0.2586	0.003021
(181,45)	(181,36.5)	8.5	6.1385	0.2262	0.006359
(204,44)	(204,36.5)	7.5	5.6427	0.2429	0.004408
				共:	0.074472

## 5 结论

通过以上分析及实测数据处理结果可见, 所述基于双曲线的对称特性和回波峰值跟踪法的匹配算法能比统计方法更快速地匹配出符合双曲线特征的点, 其中和图像边沿检测的方法相结合, 减少了模板匹配的

计算量, 最后通过改进的 Hough 变换拟合出双曲线的各项参数, 与传统的 Hough 提取双曲线的方法比较, 本文方法大大减少了计算量和存储空间, 提高了检测速度. 该方法可用于路桥钢筋回波检测或地下管线探测, 也可用于其它工程技术领域检测双曲线. 本文的工作仅限于检测和恢复出了双曲线的各参数并做了初步的解释, 而把其他解释工作(利用双曲线的各参数分析出管道物体的粗细、材质, 以及其中的填充物等信息)留作下一步研究。

## 参考文献

- 1 钟羽中, 吴仁彪, 刘家学. 基于 GPR 的机场跑道钢筋回波检测与抑制. 信号处理, 2011, 27(10): 1509-1514.
- 2 Adrian Neal. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth-Science Reviews, 2004, 1(66): 261-330.
- 3 S. Shihab, W. Al-Nuaimy. Radius estimation for cylindrical objects detected by ground penetrating radar. Subsurface Sensing Technologies and Applications, 2005, 6(2): 151-166.
- 4 Thorkild B. Hansen, Peter M. Johansen. Inversion scheme for ground penetrating radar that takes into account the planar Air-Soil interface. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 2000, 38(1): 496-506.
- 5 廉飞宇, 李青. 探地雷达图中地下管径尺寸的 SVM 识别方法. 信息与电子工程, 2011, 8(9): 403-408.
- 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. 电波科学学报, 2008, 23(1): 124-128.
- 7 Ali Cafer Gurbuz, James H. Clellan, Waymond R. Scott Jr. Compressive sensing of underground structures using GPR. Digital Signal Processing, 2012, 22: 66-73.
- 8 陈德莉, 黄春琳, 粟毅. 用统计方法和 Hough 变换进行 GPR 目标检测与定位. 电子学报, 2004, 9(32): 1468-1471.
- 9 祝建中. 利用长轴估计的椭圆检测方法. 计算机系统应用, 2009, 12: 79-82.
- 10 Carey M. Rappaport. Accurate determination of underground GPR wavefront and B-Scan shape from above-ground point sources. IEEE transaction on geoscience and remote sensing, 2007, 45(8): 2429-2434.