

梯度幅度法提取探地雷达图像 ROI

金 淼¹⁾ 赵永辉¹⁾ 吴健生¹⁾ 谢雄耀²⁾

¹⁾(同济大学海洋与地球科学学院,上海 200092) ²⁾(同济大学地下建筑与工程系,上海 200092)

摘 要 探地雷达图像中双曲型回波特征是识别地下管线的重要依据。根据探地雷达图像具有子波频率信息的特殊性,提出了一种基于梯度幅度的 ROI(感兴趣区域)自动提取新方法。通过优化梯度幅度图的微分取值方式,使梯度幅度图中的双曲型特征更为突出;以直方图方式分析灰度信息分布,并自动求取阈值,以该阈值对梯度幅度图进行二值化处理;在此基础上,采用连通区域算法对特征区域进行扩充分割,并根据区域面积剔除杂波区域,从而提取出探地雷达图像中双曲型回波的 ROI 区域。该方法计算速度快、准确度高,易于在实际探测中实现。

关键词 梯度幅度图 探地雷达 ROI 提取 双曲型特征

中图法分类号:TP301.6 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2009)04-0579-06

Gradient Method to Extract ROI of GPR Image

JIN Miao¹⁾, ZHAO Yong-hui¹⁾, WU Jian-sheng¹⁾, XIE Xiong-yao²⁾

¹⁾(School of Ocean & Earth Sciences, Tongji University, Shanghai 200092)

²⁾(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract The hyperbolic echo feature in Ground Penetrating Radar(GPR) image is one of the most important basis for pipelines recognition. According to the GPR image's wavelet spectrum information, this paper presents a new ROI extraction method based on GPR gradient image. First for highlighting the hyperbolic echo regions and suppressing the background region in GPR image better, we revise the differential parameter of obtaining the GPR gradient image. Then we use the histogram to get the threshold value for the binarization process to the gradient image. After the binary gradient image is expanded, the connected region detecting algorithm is selected for region division. At last, small area regions are eliminated as clutter regions. Then the hyperbolic echo regions are extracted from GPR image. This new ROI extraction method has high calculate speed and accuracy, and is easy to be realized in actual detection analysis.

Keywords gradient image, ground penetrating radar(GPR), ROI extraction, hyperbolic feature

1 引 言

探地雷达(GPR)作为一种非破坏性探测手段,已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。探地雷达图像中的目标体回波识别一直是影响探地雷达实际应用的难题,这主要是因地下介质的复杂介电

特性所致。由于目标体相对整条剖面较小,有效的反射回波信息通常集中在一部分区域,因此,提取这些感兴趣区域(ROI),是后期进行目标体定位及尺寸分析的前提。

目前判读 GPR 图像中 ROI 的方法一般是采用人工目测的方法。由于探测区域较大,数据量庞大,并且将人工判读的结果作用到图像需要一个转接步骤,导致人工判读方法效率低。同时,判读结果与判

基金项目:国家自然科学基金项目(40704023);浙江省自然科学基金项目(Y506286)

收稿日期:2007-08-29;改回日期:2008-01-22

第一作者简介:金 淼(1985~),男。上海岩土工程勘察设计院有限公司助理工程师。2008年于同济大学获固体地球物理学专业硕士学位。主要研究方向为工程地球物理。E-mail:jimmiao_king@163.com

读人员的经验有密切联系,往往会因判读人员的经验或判读技能不足,造成误判或漏判。因此,研究稳定可靠的 GPR 图像 ROI 自动提取方法技术至为关键。

目前已提出的用于 GPR 数据的 ROI 区域提取的方法主要有模板匹配法(统计方法)、时频分析以及神经网络的方法等。模板匹配法将 GPR 数据看作图像,采用数字图像处理的方法,用模板图像与 GPR 图像进行匹配,通过匹配参数将雷达图像分割成可能存在目标的区域和背景区域^[1],该方法计算速度较快,但匹配模板的选取需要很多的先验知识,因此限制了它的应用。时频分析方法是利用短时傅里叶变换或者小波变换对 GPR 数据进行分析,提取具有相近频率特征的回波区域,将其定为 ROI 区域。但是对信噪比不高的区域,特别是有相关频率的干扰的区域容易产生误判等错误,并且算法需要较长的计算时间。人工神经网络的方法虽然可以比较准确地划分出 ROI 区域,但前提是有海量的已知数据对其做训练,对训练数据的质量依赖性强,其计算速度也不能很好地适用于现场探测,需要较长的计算时间^[2-3]。

提出一种基于梯度幅度的 ROI 提取方法,运算速度较快,能适用于现场采集解释,并且算法具有良好的抗干扰性。其基本流程如图 1 所示。

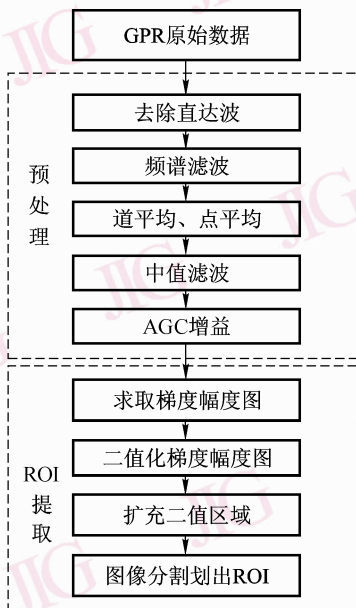


图 1 ROI 提取算法流程

Fig. 1 Frame of ROI extraction method

2 探地雷达管状目标的图像特征

探地雷达在管状目标体上方沿地面朝一定方向移动,不断向地下发射宽带子波,同时接收地下目标的反射信号,得到 2 维雷达回波图像。假设介质均匀的情况下,剖面图像中管线等小目标体的回波呈双曲型形态。

如图 2 所示,假设半径为 R 的管状目标体位于 $X = (x_0, 0, z_0)$, 天线位于点 $X_n = (x_n, 0, 0)$, 则 X_n 点接收到的信号时间为

$$t_n = \frac{2}{v} \left| \sqrt{\left(\frac{vt_0}{2} + R\right)^2 + (x_n - x_0)^2} - R \right| \quad (1)$$

式(1)就是地下管状目标体回波曲线的理论方程式,其中, v 是电磁波在地下的传播速度, x_n 和 t_n 是天线位置的 x 坐标和测得的相应时延, x_0 和 t_0 是天线在目标的垂直顶部时的坐标和测得的相应时延 ($t_0 = vz_0$), R 为目标体半径。

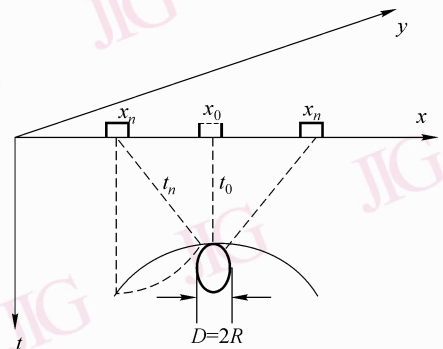


图 2 管状目标体的双曲型回波示意图

Fig. 2 Hyperbolic echo of pipeline object

式(1)只考虑了电磁波在均匀半空间介质中传播的理想情况。根据 Maxwell 扩散方程,采用时域有限差分 FDTD 方法模拟电磁波在地下介质中的传播。图 3 是模拟出的两根地下管线的 GPR 探测剖面,管线在 GPR 图像上的回波呈双曲型。

图 3 中,横坐标表示地表采集的位置,在每个位置上接收一道数据;纵坐标表示每一道的采样点,探地雷达仪器设定的时窗决定了纵坐标的总长,采样频率决定了采样点之间的时间间距。

由于地下介质的复杂性,电磁波在介质中传播的球面扩散衰减,以及随机噪声干扰等诸多因素的影响,实测剖面图像与正演模拟图像会有较大差异。

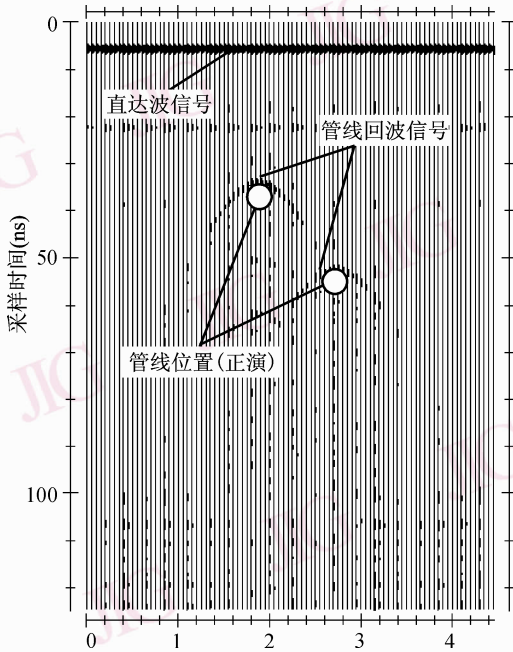


图3 正演 GPR 图像及模型示意图

Fig. 3 Model and GPR forward modeling image

必须对实测的剖面图像进行预处理,以增强图像中的双曲型回波特征^[4]。

3 目标体回波的特征增强预处理

实测的地下管状目标体的 GPR 原始剖面,其双

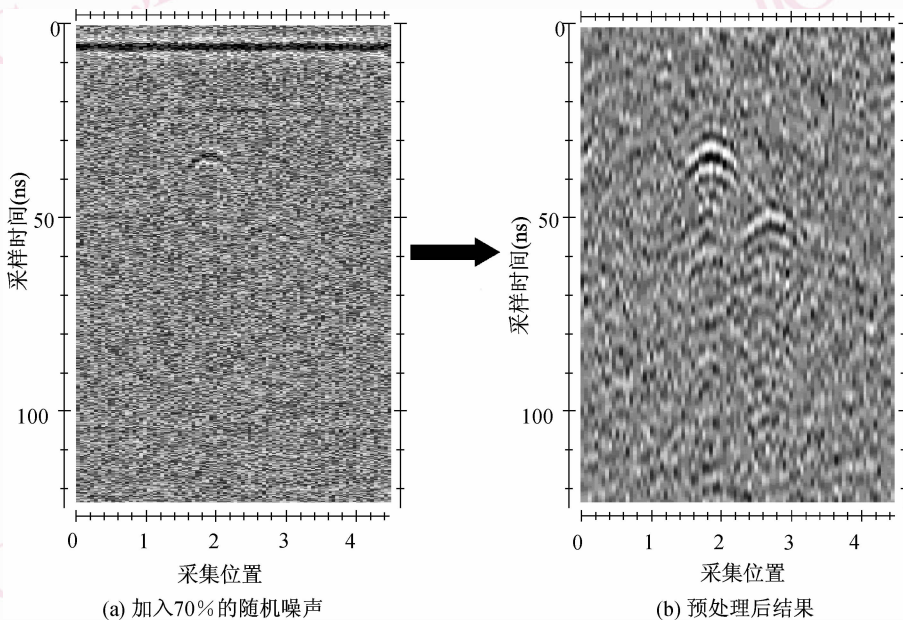


图4 GPR 图像的预处理

Fig. 4 Pre-processing of GPR image

曲型特征并不明显(图4(a)),因此需要进行一系列的预处理来增强这一特征。

在正演数据中加入 70% 的随机噪声,以模拟包含噪声信号的原始数据,按图 1 所示的步骤进行预处理,主要包括去除直达波、频谱滤波、道平均、点平均、中值滤波及 AGC (automatic gain control) 增益等。

直达波是 GPR 发射的子波没有经过地下目标体反射,直接在空气中由发射天线传播到接收天线,由于天线分离距固定,因此在每道接收到直达波的时间及形态都基本一致,在 GPR 剖面上呈直线(如图 3)。由于其能量最强,会对目标体的反射回波信号形成干扰,须消除直达波的影响。由于直达波在不同测量位置其变化很小,因此采用平均抵消法来去除直达波。

采用低通滤波,主要是为了去除高频噪声,以提高图像信噪比。而道平均为同一采样时间相邻道的信号值进行求平均运算,即同一纵坐标相邻横坐标点之间求平均;点平均为同一道相邻采样点的信号值进行求平均运算,即同一横坐标相邻纵坐标点之间求平均;点平均、道平均同中值滤波一样主要是为了压制 GPR 图像中的奇点噪声。

考虑到电磁波在地下介质中传播扩散时的衰减,还进行了 AGC 增益补偿。图 4(b)为经过上述预处理后的结果。

4 雷达图像的梯度幅度图

对于 GPR 图像 $f(x, y)$, 它在点 (x, y) 处的梯度是一个矢量, 定义为梯度矢量:

$$T(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

梯度矢量 $T(x, y)$ 有两个重要性质, 一是它指向 $f(x, y)$ 最大增加率的方向; 二是它的幅度表示 T 的方向上单位距离的 $f(x, y)$ 最大增加率。 $T(x, y)$ 的幅度定义为梯度幅度:

$$TM(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

由于处理的数据为数字图像, 因此求幅度 $TM(x, y)$ 可以通过差分运算完成, 则其数学表达式变为

$$TM(x, y) = \left| \frac{f(x, y) - f(x + \Delta x, y)}{\Delta x} \right| + \left| \frac{f(x, y) - f(x, y + \Delta y)}{\Delta y} \right| \quad (4)$$

传统的数字图像梯度幅度图求取方法只是简单的取 $\Delta x = 1$ 、 $\Delta y = 1$ (单位为像素点), 主要用于数字图像的边缘检测提取以及图像分割^[5], 也用于图像的质量评价等方面。

这样取值方法对于 GPR 图像并不理想, 求梯度幅度图的目的在于突出双曲型回波特征区域, 而双曲型区域中的点与其相邻点相差并不大, 很难与背景区域区分开。为了更好地突出双曲型回波区域, 应当优化选取 Δx 、 Δy 。

在求取梯度幅度图时, 应当尽量增大回波区域的梯度幅度值。对于 GPR 图像, 双曲回波峰值所在的位置其相邻道同一位置的点通常为背景区域或者非峰值区域, 因此取 $\Delta x = 1$ (单位为道数), 能得到较大的梯度幅度值, Δx 取太大, 回波峰值可能会与区域附近的杂波峰值作相减运算, 无法突出梯度幅度值; 对于 Δy 的选取, 应保证所选择的 Δy 使 $TM(\Delta x, \Delta y)$ 能够达到最大。GPR 图像中纵坐标为采样时间, 在子波的峰值点与其相邻的谷值相差最大, 因此取 Δy 为取 GPR 子波的一半周期长度 (探地

雷达的子波的周期 T 远远大于采样时间间隔 Δt , 因此 $T/\Delta t \gg 1$)。取 $\Delta x = 1$, $\Delta y = 0.5T/\Delta t$ 可以使求得的梯度幅度图中回波区域更突出, 相对的压制了其他背景区域, 效果如图 5 所示。

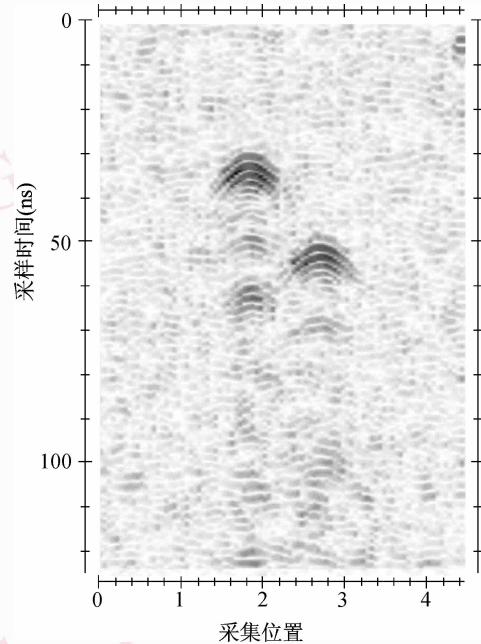


图 5 GPR 图像的梯度幅度图

Fig. 5 GPR gradient image

5 梯度幅度图的二值化处理

阈值法是图像分割的经典方法, 其基本思想是确定一个阈值, 然后每个像素和阈值进行比较, 根据比较的结果将像素点分为两类——目标或者背景, 其中阈值的确定是关键。图像处理中常用的有门限法、类别方差法等^[6-7]。本文采用的方法为基于直方图的二值化。

前面提到的几种方法一般都是用来处理普通的数字图像, 鉴于 GPR 图像还具有子波频率信息的特征, 并考虑到所选用的方法应适于实地工程勘查, 因此算法必须具有简单快速的特点。

从得到的梯度幅度图可知, 灰度虽然分布不均匀, 但由于进行了回波区域突出以及背景压制, 双曲型区域梯度幅度值比其他区域要高很多。将图 5 的梯度幅度值转换为灰度值, 求取灰度直方图进行分析。

由图 6 分析可知, GPR 图像像素点大部分靠近白色, 为背景区域, 回波区域所占的比例小, 在直方

图中段形成比较明显的分隔,前面为回波区域,后面为背景。因此制定了求取阈值的准则:从灰度 255 开始,当某个灰度的比例小于 0.02% 时(选用 0.02%,因此值处于直方图中段分隔区域,并且大量试验得出此值为灰度直方图上的临界区域,能很好地压制背景场),则定此值为二值化的阈值,大于此值的为背景点,小于此值的为 ROI 特征点。

6 二值图扩充及 ROI 区域划分

在求取梯度幅度时,尽量突出回波的峰值,而回波中间的零值区域受到了一定的压制,从而形成了图 7 所表现出的相间条状特征。因此,为便于对二值化的梯度幅度图自动化分出区域进行图像分割,有必要对峰值之间的区域进行扩充。

扩充取值同于前述求梯度幅度图的设置,每个奇点向 x 方向两边扩充 1 道, y 方向上下扩充子波的半周期长。这样就能完全填补求梯度幅度时压制的回波中间值部分。并且可以将奇点区域形成很好的连通,如图 8 所示。

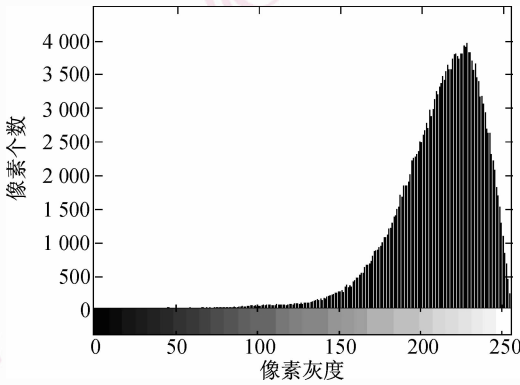


图 6 梯度幅度图的直方图

Fig. 6 Histogram of GPR gradient image

按此方法,获取的二值化结果如图 7 所示,阈值二值化处理的效果非常明显,除了小部分杂波之外,大部分噪声区域值都被划分到背景区域,双曲型回波所在的特征区域得到了很好的突出。

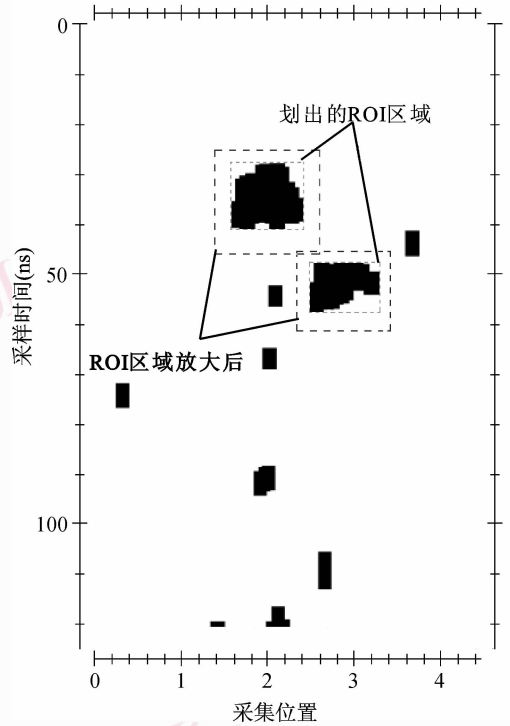


图 8 扩充后的梯度幅度二值图

Fig. 8 Binary gradient image after extended

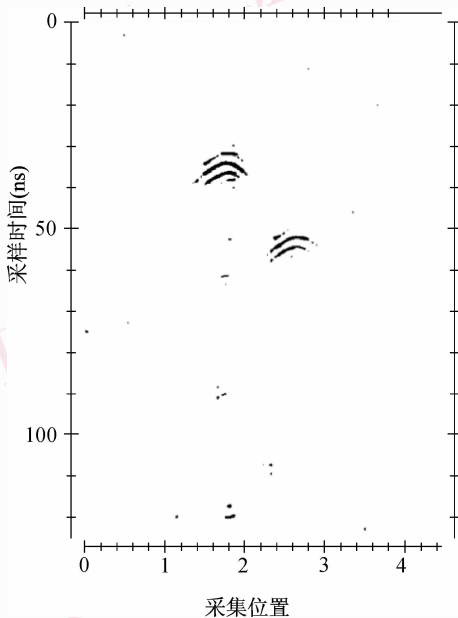


图 7 梯度幅度图二值化结果

Fig. 7 Binary gradient image

对图像进行自动分割的方法有很多,如基于形态学的方法、基于融合技术的方法、基于小波变换的分割方法等等^[8-9]。考虑到是对二值图作图像分割,并且算法的计算时间要适合工地勘查需要,因此采用了连通区域检测方法。从图像中的奇点开始寻找与其连通的奇点,连通方式选择了四连通。将连通到的点标上区域号,从奇点组里面去除,并更新区域的 4 个边界值,这样循环直至奇点并都标上区域

号,这样二值图就被划分成了若干个区域。另外,由于图上还存在一些杂波等区域,但其区域面积通常比较小,因此,给连通区域面积一个阈值门限,小面积的区域判定为杂波,作为噪声去除。图 8 中细虚线所示范围即为划分出的 ROI 区域。

在此基础上,提取出区域边界,并将 ROI 区域以外数据清除。考虑到双曲型回波的两翼区能量较弱,在进行自动划分时可能会被压制。因此,在作用到原始数据前,把得出的 ROI 区域范围做一个向四周的比例放大,以更充分地覆盖有效目标体的回波信息。图 9 为最终的管状目标体双曲型回波的自动提取结果。

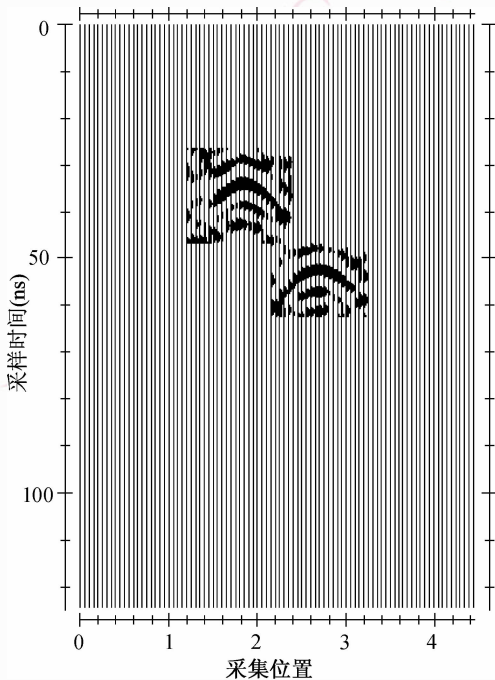


图 9 ROI 提取结果

Fig. 9 Result of ROI extraction

7 结论

充分利用 GPR 图像的数字图像特征以及 GPR 子波的频率特点,提出了一种基于梯度幅度图的提取 ROI 区域的方法,整个过程完全由计算机自动完成,并且提取方法鲁棒性高。文中的截图都是在正演数据中加入 70% 的噪声处理得出的,最后的结果将双曲型回波区域非常准确地划分出来。并且整个过程计算速度很快,示例图的数据为 90 道,每道 2 500 个采样点,计算速度基本在 10 s 左右。可以很

好地用于工地上的实时处理。

模型试算的结果表明,本文算法取得了较为理想的效果,但算法中关于梯度幅度图阈值取值、区域扩充分割方法,经及 ROI 区域放大等方面仍可做进一步的深入研究。

参考文献 (References)

- 1 Hu Jin-feng, Zhou Zheng'ou. Target detection and orientation in sub-surface penetrating radar data [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, **27**(4): 372-375. [胡进峰,周正欧. 浅地层探地雷达目标探测和定位新方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(4): 372-375.]
- 2 Francoise Lefebvre, Genevieve Berger, Pascal Laugier. Automatic detection of the boundary of the calcaneus from ultrasound parametric images using an active contour model clinical assessment [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1998, **17**(1): 45-52.
- 3 Chen De-li, Huang Chun-lin, Li Yi. An integrated method of statistical method and hough transform for GPR targets detection and location [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, **32**(9): 1468-1471. [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.]
- 4 Chen De-li, Li Yi, Huang Chun-lin. ROI extraction method of GPR images with an artificial neural network [J]. Radar Science and Technology, 2005, **3**(6): 372-377. [陈德莉,栗毅,黄春琳. 地表探测雷达图像 ROI 的人工神经网络提取方法[J]. 雷达科学与技术, 2005, **3**(6): 372-377.]
- 5 Zhang Chun-cheng. Research on Signal Processing Technology of Shallow Subsurface Ground Penetrating Radar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005. [张春城. 浅地层探地雷达中的信号处理技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2005.]
- 6 Fu Zhong-liang, Li Yong. Edge detection based on gradient histogram and variance within clusters [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, **30**(12): 1056-1058. [傅仲良,李勇. 基于梯度幅度直方图和类内方差的边缘提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, **30**(12): 1056-1058.]
- 7 Gao Yong-ying, Zhang Li, Wu Guo-wei. An algorithm for threshold based on arithmetic mean of gray value [J]. Journal of Image and Graphics, 1999, **4**(6): 524-528. [高永英,张利,吴国威. 一种基于灰度期望值的图像二值化算法[J]. 中国图象图形学报, 1999, **4**(6): 524-528.]
- 8 Xue He-ru, Ma Shuo-shi, Fei Xi-chun. Color image segmentation based on mathematical morphology and fusion [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, **11**(12): 1764-1767. [薛何儒,麻硕士,裴喜春. 一种基于数学形态学及融合技术的彩色图像分割方法[J]. 中国图象图形学报, 2006, **11**(12): 1764-1767.]
- 9 Chen Bo, Lai Jian-huang. Active contour models on image segmentation: a survey [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, **12**(1): 11-20. [陈波,赖剑煌. 用于图像分割的活动轮廓模型综述[J]. 中国图象图形学报, 2007, **12**(1): 11-20.]