

中图分类号: TP753 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)08-1483-06

论文索引信息: 安成锦, 辛玉林, 陈曾平. 基于改进 ROEWA 算子的 SAR 图像边缘检测方法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(8): 1483-1488

基于改进 ROEWA 算子的 SAR 图像边缘检测方法

安成锦, 辛玉林, 陈曾平

(国防科技大学 ATR 重点实验室, 长沙 410073)

摘要: 指数加权均值比 (ROEWA) 算子是一种较好的适用于 SAR 图像的多边缘检测算子, 然而传统方法无法准确定位边缘, 且不能计算边缘方向。改进边缘检测流程, 分析上述问题产生的原因并采用传统 ROEWA 算子保证边缘检测恒虚警, 对 ROEWA 加权后的滤波值进行差分运算保证非极值抑制的准确性。利用 Radon 变换具有较好抗干扰性和几何解析性的性质, 提出基于 Radon 变换计算边缘方向。针对实测 SAR 图像的实验结果表明, 该方法边缘检测及边缘方向计算性能较好。

关键词: 合成孔径雷达; 边缘检测; 指数加权均值比; 边缘定位; 边缘方向

Edge detection algorithm for SAR image based on improved ROEWA

An Chengjin, Xin Yulin, Chen Zengping

(ATR Key Lab., National University of Defense Technology, Changsha 410073 China)

Abstract: Ratio of exponentially weighted average (ROEWA) operator is an multi-edge detector suitable for SAR images. The detector which is unable to compute the edge direction, cannot get the exact edge position. The reasons for these problems are analyzed and the flow chart of edge detection is modified in this paper. The constant false alarm rate (CFAR) character is retained by the traditional operator and the accuracy of non maxima suppression (NMS) is improved by the difference operator. Then Radon transform is carried out to get the edge direction for its excellent geometrical analysis and noise immunity properties, and by this way, the line connection is facilitated. The experiment results based on the SAR images show that the performance of the improved algorithm is robust and efficient.

Keywords: SAR; edge detection; ratio of exponentially weighted average; edge localization; edge direction

0 引言

图像边缘通常对应于图像强度或纹理产生变化的区域, 是描述目标结构最为基础的一类特征, 广泛应用于线性特征提取、目标识别与特征匹配。由于 SAR 噪声是乘性的, 使得经典的边缘检测算子如 Canny 算子、零交叉算子等基于加性噪声的差分算子检测效果不佳, 在高亮度区域的检测虚警率高于

低亮度区域。

经过 20 多年的研究, 研究学者已提出多种针对 SAR 图像边缘检测的方法, 主要分为 4 类^[1]: 基于单边缘模型的方法^[2-4]、基于多边缘模型的方法^[5]、多分辨率方法^[6]和其他新方法^[7-8]。其中, 小波等多尺度边缘检测算子主要对原始图像进行多层小波分解, 提取出不同尺度的边缘信息, 通过多尺度边缘融合, 实现 SAR 图像边缘检测。小波本质上是一种梯度算子, 在使用这类方法时往往要考虑信号局部特性, 引入如自适应维纳滤波等滤波方法, 并且小波

收稿日期: 2010-02-09; 修回日期: 2010-05-07

基金项目: “十一五” 部委级预研项目 (513010501)。

第一作者简介: 安成锦 (1982—), 女, 讲师。2010 年于国防科技大学获信息与通信工程博士学位, 主要研究方向为 SAR 图像理解与解译。E-mail: anchengjin@gmail.com。

基选取的不同对边缘检测结果的影响很大,工程实用性有限。文献[7-8]等提出的新方法在检测效果上甚至略优于经典 SAR 边缘检测算法,但是计算方法相对比较复杂,运算量及硬件资源占用较大,在工程实践中的应用受到限制。

基于单边缘模型的方法主要包括 Bovik 等人^[2]提出的基于均值比的阶跃边缘检测算子和 Geiling 等人^[4]提出的基于比值的线边缘检测算子。上述算子一般采用固定尺寸的局部窗口进行检测,在检测窗口较大时窗口内很可能包含多条边缘,这样就与单边缘模型假设相矛盾。针对单边缘模型的局限性,Fjørtoft 等人^[5]提出了多边缘模型,并采用一种基于线性最小均方误差的指数滤波器估计像素均值,进而提出一种新的边缘检测算子——指数加权均值比 (ROEWA) 算子。该算子具有 CFAR 特性,虚假边缘少,解决了单边缘模型的局限性,非常适用于检测各种人造目标。然而经典 ROEWA 算子只能得到边缘强度,无法准确定位边缘且不能计算边缘方向。对于 SAR 图像理解与解译而言,边缘方向是很重要的一类特征,在曲线连接与图像匹配中都需要用到边缘方向。

Fjørtoft 等人^[5]采用分水岭分割的方法进行边缘定位,然而由于噪声等的影响,边缘强度图像上往往存在许多局部的汇水盆地,进而造成许多虚假边缘,影响后续处理。

Radon 变换巧妙的运用直线与点之间的对偶关系,将线段的提取问题转化为像素点的计数问题,具有较好的全局性和抗噪性,是线基元提取常用的方法之一^[9],但 Radon 变换运算量一般很大。Radon 变换优秀的抗噪性可以成为一种计算边缘方向的思路。

改进传统边缘检测的流程,在保持检测结果不变的前提下减少了运算量;对 ROEWA 算子的滤波结果进行差分运算,实现准确的边缘定位;采用 Radon 变换计算边缘方向,更好地适用于后续的曲线连接。实测 SAR 图像证明了改进方法的有效性。

1 算法流程

图像边缘检测通常采用 Canny 提出的流程^[10-12]:首先,检测边缘强度,然后依据边缘强度对所有像素点进行非极值抑制得到疑似边缘点,最后,采用磁滞门限的方法提取边缘点。磁滞门限的具体

步骤为:1) 设定边缘点数目占图像总像素数目 N 的比例为 $Hratio$,然后在边缘强度图像的直方图中从低强度值开始逐步累加像素点数目,当累加数目达到 $N \cdot (1 - Hratio)$ 时,把对应的边缘强度值作为高阈值 HTh ;2) 低阈值为高阈值乘上一定的比例因子,即低阈值 $LTh = HTh \cdot Tratio$;3) 将边缘强度大于高阈值的疑似边缘点作为强边缘点。如果疑似边缘点的强度介于高阈值与低阈值之间,且与强边缘点相连通,该点也被当做边缘点。

上述边缘检测流程对所有像素点进行非极值抑制,观察发现边缘强度小于 LTh 的像素点不可能是边缘点,就边缘检测来说没有必要对其进行非极值抑制。考虑到只有边缘强度不小于 LTh 的像素点才有可能边缘点,提出边缘检测的改进流程:得出边缘强度后先计算高、低阈值,仅对强度不小于 LTh 的像素点进行非极值抑制得到疑似边缘点,然后将强度大于 HTh 的疑似边缘点作为强边缘点,如果剩下的疑似边缘点与强边缘点连通,也将其作为边缘点,最后计算边缘方向,得到边缘图(如图 1)。

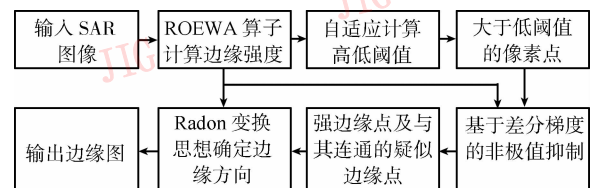


图 1 改进的边缘检测流程图

Fig. 1 Modified flow chart of the edge detection

假设边缘强度不小于 LTh 的像素点数目占总像素数目的比例为 $Lratio$ ($Lratio > Hratio$),则提出的边缘检测改进流程在保持检测结果相同的前提下,使非极值抑制的运算量减少了 $1 - Lratio$ 。由于非极值抑制需要对所有像素根据边缘方向进行两次内插操作,运算量较大,因此,提出的边缘检测改进流程在工程实践中有一定意义。

2 利用改进 ROEWA 算子检测边缘点

2.1 ROEWA 算子基本原理

为了克服单边缘模型的局限性,Fjørtoft 等人^[5]提出多边缘模型,并在此基础上设计了一种基于线性最小均方误差的指数平滑滤波器,并利用此滤波器估计的均值进行边缘检测。1 维情况下,该滤波

器为

$$f(x) = Ce^{-\alpha|x|} \quad (1)$$

式中 α 为滤波系数, C 为归一化常数。可将其扩展到 2 维空间 $f_{2-D}(x, y) = f(x)f(y)$ 。文献[13]指出,在离散状态下,滤波器 f 可通过一组因果、非因果的递归滤波器 f_1 、 f_2 实现。经推导:

$$f_1(n) = ae_1(n) + bf_1(n - 1) \quad (2)$$

$$n = 1, \dots, N$$

$$f_2(n) = ae_2(n) + bf_2(n + 1) \quad (3)$$

$$n = N, \dots, 1$$

式中 e_1 、 e_2 为滤波器的输入, $b = e^{-\alpha}$, $a = 1 - b$ 。

利用该滤波器进行均值估计, Fjortoft 等人提出一种新的基于比值的边缘检测算子——ROEWA 检测算子。指数加权均值 \bar{u}_1 、 \bar{u}_2 为无偏估计, 文献[5]在附录中证明了它们的方差与原始图像的方差成正比, 因此 ROEWA 算子具有 CFAR 特性。定义比值为

$$R = \max\left\{\frac{\bar{u}_1}{\bar{u}_2}, \frac{\bar{u}_2}{\bar{u}_1}\right\} \quad (4)$$

以水平方向为例介绍如何利用 ROEWA 算子计算边缘强度。首先采用 1 维滤波器 f 对图像每列进行加权, 再分别利用因果滤波器和非因果滤波器对加权后的图像每行进行滤波, 获得 \bar{u}_{x1} 和 \bar{u}_{x2} :

$$\bar{u}_{x1}(x, y) = f_1(x) * (f(y) \cdot Z(x, y)) \quad (5)$$

$$\bar{u}_{x2}(x, y) = f_2(x) * (f(y) \cdot Z(x, y)) \quad (6)$$

式中 $f(y) = \frac{1}{(1+b)}f_1(y) + \frac{b}{(1+b)}f_2(y+1)$,

* 表示对行加权, \cdot 表示对列加权。

将 \bar{u}_{x1} 和 \bar{u}_{x2} 代入式(4)可以得出水平方向的边缘强度 $R_x(x, y)$ 。同理可以得出垂直方向的边缘强度。与光学图像计算边缘强度的方法相同, 得到最终的边缘强度:

$$R_{2-D}(x, y) = \sqrt{R_x^2(x, y) + R_y^2(x, y)} \quad (7)$$

2.2 改进的边缘定位算法

Canny 等人^[14]提出通过非极值抑制实现边缘定位, 如图 2 所示, 首先依据当前点的边缘方向(在光学图像里为梯度方向)及其邻域像素的边缘强度, 得到内插值 P_1 、 P_2 。如果当前像素点的边缘强度不小于两个内插值, 则认为当前点为边缘点, 否则舍去。

文献[10]直接利用 ROEWA 算子得到的边缘强度进行非极值抑制, 但是实验结果表明, 这种方法无法准确定位边缘。这是因为一方面比值代替了差

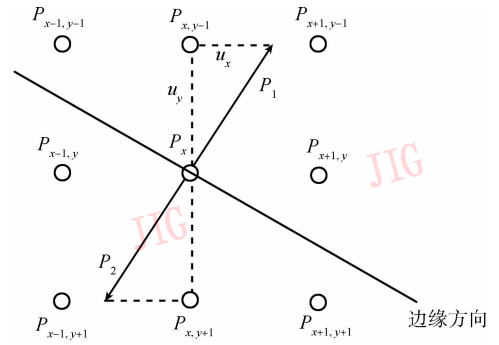


图 2 非极值抑制示意图

Fig. 2 Illustration of non maxima suppression

分, 不再符合梯度的定义, 无法得到准确的边缘方向; 另一方面从式(2)(3)可以看出递归滤波的结果除了相邻像素外还包含像素点本身, 滤波结果不适用于插值处理。

考虑将 ROEWA 算子与 Canny 算子结合起来, 提出一种改进的边缘定位算法: 对 ROEWA 算子的滤波值 \bar{u}_{x1} 、 \bar{u}_{x2} 、 \bar{u}_{y1} 、 \bar{u}_{y2} 进行进一步处理得到两个方向的滤波值 \bar{u}_x 、 \bar{u}_y , 然后利用 Canny 算子中的 2 维 Gaussian 函数得到两个方向的梯度, 使边缘强度符合梯度定义, 最后采用经典非极值抑制方法获得准确的边缘定位。其中:

$$\bar{u}_x(x, y) = \frac{1}{1+b}\bar{u}_{x1}(x, y) + \frac{b}{1+b}\bar{u}_{x2}(x+1, y) \quad (8)$$

$$\bar{u}_y(x, y) = \frac{1}{1+b}\bar{u}_{y1}(x, y) + \frac{b}{1+b}\bar{u}_{y2}(x, y+1) \quad (9)$$

之所以采用 \bar{u}_x 、 \bar{u}_y 而非原始图像计算梯度的原因是经过指数滤波器平滑后的信号抗噪性更好^[13]。

3 利用 Radon 变换计算边缘方向

第 2.2 节采用差分的方法得到两个方向的梯度 dx 、 dy , 直观的想法是根据 $\theta = \arctan(dy/dx)$ 得到边缘方向。然而这种方法仅利用单个像素梯度计算边缘方向, 受噪声影响较大, 容易造成后续的相位编组出现漏连接。

针对 ROEWA 算子边缘方向计算的相关文献较少, 文献[10]分析了直接利用 ROEWA 算子的边缘强度计算边缘方向存在的问题, 并提出采用方位选

择性较好的 Gabor 滤波器计算边缘方向。

$$g_{\theta}(x, y) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x - \mu_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y - \mu_y)^2}{\sigma_y^2} \right] \right\} \cdot \cos[2\pi v(x \cos \theta + y \sin \theta)] \quad (10)$$

式中 θ 表示 Gabor 函数的波动方向, σ_x^2 、 σ_y^2 表示尺度, μ_x 、 μ_y 描述了 Gabor 函数的中心位置。

然而 Gabor 函数包含多个参数, 实验结果表明, 不同尺度参数的 Gabor 函数得到的边缘方向不一致, 且同一尺度参数很难适用于不同来源的 SAR 图像; 再加上 Gabor 函数需要采用较大的窗口实现抗噪性(一般为 11×11), 运算量非常大, 很难将其应用到实时自动边缘方向计算场合。

Radon 变换将 (x, y) 图像平面上的一条直线 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ 映射成 RT 空间的一个点 (ρ, θ) 。连续图像的 Radon 变换定义为

$$H(\rho, \theta) = \iint_D (f(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy) \quad (11)$$

式中 D 为检测区域, $f(x, y)$ 为图像的灰度值, δ 为狄拉克函数, ρ 为 (x, y) 平面的原点到直线的距离, θ 为 (x, y) 平面的原点到直线的垂线与 x 轴的夹角。

计算边缘方向的目的是为了更好地进行边缘连接, 考虑将边缘方向计算与像素局部边缘连接结合起来, 根据包含当前像素点在内的线性特征局部区域的走向获得边缘方向。由于考虑了局部区域的多个边缘点的边缘强度, 边缘方向计算受噪声影响较小, 更适用于相位编组。在实际应用中, 由于计算的是通过检测窗口中心的边缘方向, 那么第 i 个方向上对应的投影值为

$$H(\theta_i) = \sum_x \sum_y R(x, y) \delta(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) - \frac{(w-1)}{2} \leq x, y \leq \frac{(w-1)}{2} \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

式中 w 为检测窗口尺寸, $R(x, y)$ 为式(7)得到的边缘点的边缘强度, 一般情况下 $n = 4$, 也就是将 θ 等分为 4 个方向, 分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 。可以看出 $H(\theta_i)$ 最大值对应的角度代表了边缘方向, 对每个边缘点计算其最大投影值所对应的 θ_i , 可以得到每个边缘点的方向。由于仅计算通过边缘点的 4 个方向的投影值, 且每个方向投影值计算相当于对数目等于检测窗口尺寸的边缘强度求和, 因此提出的利用 Radon 变换计算边缘方向的

算法运算量很小。

4 实验结果及分析

一般采用仿真图像验证边缘检测算法的定位性能。采用文献[15]的方法在图 3(a) (理想边缘为一条条直线, 图像中亮区与暗区的灰度比值为 4) 中加入方差为 1 的相干斑噪声, 得到(b)所示的待检测 SAR 图像。在相同检测门限情况下传统 ROEWA 算子(基于比值进行非极值抑制)、改进 ROEWA 算子(基于差分结果进行非极值抑制)的边缘定位结果如(c)(d)所示。可以看出, 由于相干斑噪声的影响两种算子得到的边缘点都略有断裂和偏移。比较(c)(d)中方框区域 1、2、3 发现传统 ROEWA 算子的边缘断裂情况比改进 ROEWA 算子严重。实验结果证明, 提出的改进 ROEWA 算子在边缘定位方面的优越性。

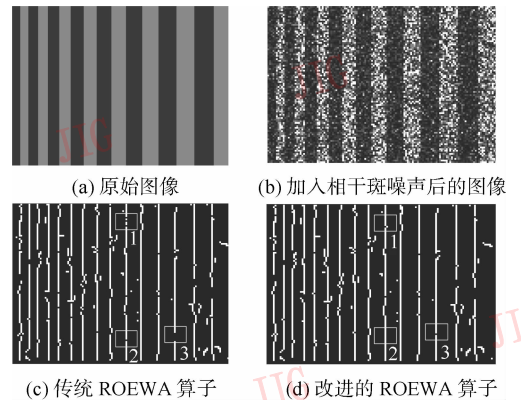


图 3 边缘定位性能对比

Fig. 3 Comparison of edge localization results

以图 4(a) 所示的分辨率为 3 m 的一幅 RadarSat-2 图像为例比较边缘方向计算结果。图 4(b) 为采用本文提出的改进边缘定位算法得到的边缘点。考虑水平、垂直、 45° 和 135° 4 个边缘方向, 令 Gabor 函数的 μ_x 、 μ_y 为 0, 尺度分别为 2.5、5, 得到两组边缘方向计算结果。为了更清楚的比较不同尺度参数对边缘方向计算的影响, 放大两组计算结果中的同一区域(图 4(b) 中的虚框区域 1), 结果如图 4(c)(d) 所示。从图中可以清楚地看出在其他条件相同的情况下, 不同尺度参数的 Gabor 函数得到的边缘方向不同, 因此 Gabor 函数计算边缘方向稳健性不高。

采用 5×5 的检测窗口, 提出的基于 Radon 变换

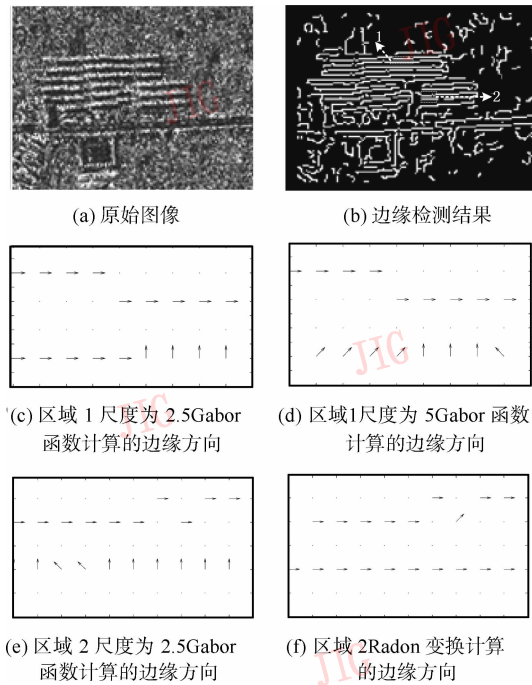


图4 边缘方向计算结果对比

Fig. 4 Comparison of edge direction results

计算边缘方向算法对图 4(b) 中的虚框区域 2 的计算结果如图 4(f) 所示。理论上,区域 2 中绝大多数像素点边缘方向为水平方向,在图 4(f) 中所示的边缘方向是正确的,观察其他区域的边缘方向计算结果可以得出相同的结论。而在图 4(e) 中所示的结果中很多边缘点的方向却为垂直、 135° 方向,这显然不正确。两组实验结果证明了本文方法在边缘定位与边缘方向计算方面的优越性。

图 5 给出了另一组实验结果,(a) 中的场景主要是城市街区。实验结果对比同样证明了本文方法的优越性。

5 结 论

分析常用的边缘检测流程,提出仅对边缘强度不小于低阈值的像素点进行非极值抑制,在保持相同检测结果的前提下降低了运算量。同时分析基于比值的边缘强度不适用于边缘定位的原因,提出利用 ROEWA 算子滤波后的差分运算结果提高边缘定位性能。将边缘方向计算与像素局部边缘连接结合起来,利用 Radon 变换优秀的抗干扰性和几何解析性进行边缘检测,该方法参数设置简单,可以提高边缘方向计算的稳健性和准确度。实验结果表明,与

传统 ROEWA 算子相比,改进的边缘检测方法检测性能具有一定的优越性,更适用于 SAR 图像线性特征自动提取。

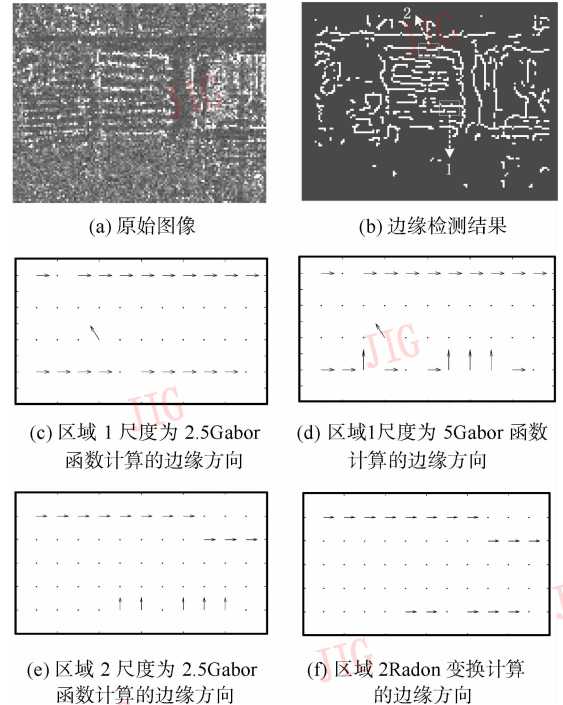


图5 实验结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental results

参考文献 (References)

- [1] Zhao Lingjun, Jia Chengli, Kuang Gangyao. Overview of edge detection in SAR images[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(12):2042-2049. [赵凌君,贾承丽,匡纲要. SAR 图像边缘检测方法综述[J]. 中国图象图形学报,2007,12(12):2042-2049.]
- [2] Bovik A C. On detecting edges in speckle imagery[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1988,36(10):1618-1627.
- [3] Touzi R, Lopes A, Bousquet P. A statistical and geometrical edge detector for SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 26(6):764-773.
- [4] Geling G, Jonescu D. An edge detection operator for SAR images [C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada,1993:707-709.
- [5] Fjørtoft R, Lopès A, Marthon P, et al. An optimal multiedge detector for SAR image segmentation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998,36(3):793-802.

- [6] Dai M, Peng C, Chan A K, et al. Bayesian wavelet shrinkage with edge detection for SAR image despeckling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1642-1648.
- [7] Tourneret J Y, Doisy M, Lavielle M. Bayesian off-line detection of multiple change-points corrupted by multiplicative noise: application to SAR image edge detection [J]. Signal Processing, 2003, 83(9): 1871-1887.
- [8] Wang Min, Yuan Shuyuan. A hybrid genetic algorithm-based edge detection method for SAR image [C] // IEEE International Radar Conference. Piscataway New Jersey, USA: IEEE Press, 2005: 503-506.
- [9] Jia Chengli. The Research of Extraction of Roads and Airport for SAR imagery [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. [贾承丽. SAR 图像道路和机场提取方法研究 [博士论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.]
- [10] Jia Chengli, Kuang Gangyao. An improved edge detection algorithm for SAR images [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(2): 379-382. [贾承丽, 匡纲要. 一种改进的 SAR 图像边缘检测方法 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 379-382.]
- [11] Canny J F. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1986, 8(11): 679-698.
- [12] Milan S, Vaclav H, Roger B. Image Processing, Analysis, and Machine Vision [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2003: 60-62. [艾海舟, 武勃等译. 图像处理、分析与机器视觉 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 60-62.]
- [13] Shen J, Castan S. An optimum linear operator for step edge detection [J]. Graph Models Image Processing, 1992, 54(2): 112-133.
- [14] Canny J F. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [15] Dimou A, Jager G, Frangos P. Adaptive edge enhancement in SAR images training on the data vs. training on simulated data [C] // Proceedings of International Conference on Image Processing. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press, 2001: 493-496.