

SAR 图像直线提取

王 程, 王润生

(国防科技大学 ATR 国防科技重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘 要: 针对合成孔径雷达(SAR)图像中相干斑的统计特性, 设计了对应的直线提取算法. 首先组合运用 Canny 算子和 Ratio 算子得到边缘点及其边缘方向, 然后根据边缘方向一致性原理得到初始直线图; 最后, 通过高层编组方法连接由于噪声引起的直线缺损. 本文提出的边缘检测方法克服了边缘方向量化带来的直线断裂, 并且具有恒虚警的特性. 高层编组过程通过对初始直线图的分析确定可能扩展的直线区域, 之后在原始图像中进行统计证实, 得到完整的直线图. 直线提取算法在 X 波段机载 SAR 图像上进行了试验, 得到了满意的效果. 提取的直线图可以用于遥感图像矢量化、自动目标识别等方面.

关键词: 合成孔径雷达; 图像处理; 相干斑噪声; 直线提取; 边缘检测; 高层编组

中图分类号: TN919. 8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 06-0816-05

Line Extraction for SAR Image

WANG Cheng, WANG Runsheng

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

Abstract: A line extraction algorithm for synthetic aperture radar (SAR) image is presented. The algorithm is designed for the statistical characteristics of the speckle in SAR image. Three steps are involved. Firstly, a new edge detector, which combines the Canny operator and Ratio operator, is used to get the edge points and their directions, then the edge points are grouped based on the edge direction consistency to form the initial lines. Finally, the broken lines due to speckle noise are connected by the high level grouping. The proposed new edge operator is CFAR and prevents the line from cleaving. The high level grouping step analyses the initial lines, finds out the possible areas for expanding lines, and verifies the possible areas by statistical hypothesis determination. The line extraction algorithm is tested on the X-band airborne SAR images. The extracted line graph can be used for SAR image vectorization and comprehension etc.

Key words: SAR; image processing; speckle; line extraction; edge detection; high level grouping

1 引言

在各种空间和航空图像传感器中, 合成孔径雷达(SAR)具有分辨率高, 全天候工作等特性. SAR 的广泛应用对 SAR 图像的自动或半自动处理提出了需求. SAR 的成像机理与普通的光学图像传感器不同. SAR 图像记录的是地物对电磁波的后向散射. 固有的相干斑现象使 SAR 图像呈现为强噪声的形式. 因此 SAR 图像处理有别于光学图像处理. 图像特征提取是自动和半自动图像处理的基础, 其中, 线类型特征的提取特别引人注目. 直线是视觉感知的重要线索. 图像的直线图描述大大简化了图像的表达, 又能很好的符合人类视觉. 直线特征在图像配准、图像矢量化、遥感地理以及自动目标识别中都被广泛用. 本文的目的就是针对 SAR 图像的特点, 设计相应的直线提取算法.

在过去的 20 年中, 发展了一些直线提取方法. 通常包含

两个步骤: 首先, 通过对像素邻域的检测将边缘点与背景区分开; 然后通过全局的组合在较大尺度上将要检测的结构提取出来. 这两个步骤分别称为边缘检测和边缘编组.

边缘检测是像素级运算. 在光学图像的直线提取中常用的是 Sobel 或 Canny^[1] 等算子. 其中, Canny 算子对噪声有一定的抑制作用, 提取的边缘方向信息准确, 运算量适中; 但是, 针对的是加性高斯噪声模型. SAR 图像的相干斑的统计分布近似服从 Gamma 分布^[2], 不同于光学图像中的加性高斯噪声. 在 SAR 图像中 Canny 算子的边缘检测不是恒虚警的(见第 2 节). Touzi 等人^[3] 提出, Ratio 算子在 Gamma 分布的相干斑中具有恒虚警的特性, 然而 Ratio 算子只能提供大致的边缘方向, 不能直接用于直线提取中的边缘检测.

至今已经提出了多种边缘编组方案, 包括 Hough 变换法^[4], 层次编组法, 相位编组法^[5] 等. 其中由 Burns 等人首先提出的相位编组算法利用了边缘方向作为低层特征, 是一种

比较稳定的直线提取算法。

边缘编组初步得到的直线图往往存在缺损和偏差,为此出现了一些直线提取的后处理方法,主要包括动态规划方法^[6],最小熵方法^[7],基于 Bayesian 框架的方法^[8]等。这些方法都是通过分析已经得到直线集,对直线图进行连接和延拓。

本文首先讨论了 Ratio 算子与 Canny 算子边缘检测,并在此基础上提出新的边缘检测算子。新算子在检测上具有恒虚警特性,同时提供准确的边缘方向信息。利用相位编组法对检测出的边缘进行编组,得到初步的直线图。然后,针对 SAR 图像的统计特点,提出高层编组方法进一步完善提取的直线图。高层编组方法先分析直线间的相互关系,得到可能扩展的直线区域,之后通过统计假设检验对候选区进行筛选,得到最终的直线图。与以往的直线图后处理方法不同的是,本文的高层编组方法把原始图像中像元的统计信息和从已知的直线集中获取的信息结合,指导直线图的连接和延拓,降低了虚警率。实验证明,新的直线提取方法较好的描述了 SAR 图像中的结构信息。

2 初步直线提取的思路

初步的直线提取是建立在相位一致原理^[5]之上的,利用直线覆盖区的像素点的边缘方向一致性来确定直线。下图就以简单的角形灰度图像为例作说明。如图 1 中所示,算法为两个步骤:

(1)对图像进行边缘检测,并计算出对应的边缘方向(图 1(b))。以往的边缘检测针对的是加性高斯噪声,不适于 SAR 图像。

(2)边缘编组。将量化后的边缘方向值相同,且相互连通的像素点连接成各自的集合,形成直线支持集(图 1(c))。边缘编组可以抽象为图像标记问题:将图像中相邻且具有等价属性的像素点标记为相同的编号,不相通的集合编号不同。这里等价定义为边缘方向相近。最后由直线支持集拟合出对应的直线。(图 1(d))



图 1 (a)原始灰度图;(b)梯度相位;(c)相位编组;(d)直线拟合

本文使用我们在文献[9]中提出的快速算法完成边缘编组。

3 SAR 图像边缘检测

SAR 图像反映的是被观察地物的雷达波反射强度,图像中存在着大量的相干斑,其统计分布不同于光学图像中的加性高斯噪声。因此以往针对加性高斯噪声的边缘检测方法并不适用于 SAR 图像,这也是 SAR 图像直线提取与普通光学图像直线提取的重要区别之一。

3.1.1 SAR 图像相干斑的统计特性

在 SAR 的强度图像中,每一个成像单元都包括了许多的

反射点;从这些反射点返回的回波信号的相位是随机的。回波间相位的叠加(相干)导致了相干斑噪声。Goodman^[10],Ula2 by^[11]等给出了相干斑噪声的一阶统计模型。对于图像的观察值 I,当 $\langle I \rangle = R$ 和 $V(I) = R^2 = R^2/L$ 时,条件概率密度函数为:

$$p(I| R) = \frac{L^L}{\#(L)R^L} \exp(-\frac{I}{R}) I^{L-1} \quad (1)$$

也就是说在理想值为 R 的情况下观察值服从 2L 个自由度的 χ^2 分布。在一定的条件下可以将相干斑其近似为乘性噪声^[10]:

$$I(x, y) = A \# R(x, y) \# n(x, y) \quad (2)$$

其中 I(x, y) 为观察得到的 SAR 图像中的像素值; R(x, y) 为实际的地物的 RCS; n(x, y) 为一个高斯噪声,均值为 1; A 为常数。

3.1.2 基于 Canny 算子的 SAR 图像边缘检测

Canny 算子^[11]在灰度图像处理中得到广泛的应用。其表达式近似于高斯函数的一阶导数。设 G(x, y) 为二维高斯函数,对图像 f(x, y),由 Canny 算子得到的

$$\text{边缘强度为: } C(x, y) = | \nabla G * f(x, y) | \quad (3)$$

$$\text{边缘方向为: } n = \nabla G * f(x, y) / | \nabla G * f(x, y) | \quad (4)$$

Canny 算子具有信噪比高,定位性能好,对单一边缘仅有唯一相应等特点。遗憾的是 Canny 算子是在加性高斯噪声模型上得到的,在 SAR 图像中不具有恒虚警的特性,在高亮度区域边缘检测虚警率将高于低亮度区域(证明见附录 I,这里虚警率(Pfa)定义为,在没有边缘的平坦区域中的像素被检测为边缘的概率)。因此 Canny 算子不能用于 SAR 图像边缘检测。

3.1.3 基于 Ratio 算子的 SAR 图像边缘检测

对于关心点 P,用过 P 的一条直线 L 将 P 的邻域划分为面积相同的两个区域,两个区域的均值的比值记为 R_L (规定 $R_L \geq 1$)。不同斜率的直线得到不同的划分,Ratio 算子的输出如下:

$$\text{边缘强度: } R = \max_L (R_L) \quad (5)$$

边缘方向: 对应的 L 的法向。

Tauzi 等人^[3]证明了 Ratio 算子边缘检测是恒虚警的,即在高亮度区域边缘检测虚警率等同于低亮度区域边缘检测虚警率。

Ratio 算子的邻域不宜太大,因为大的邻域将只能检测出那些比较宽的边缘。通常 Ratio 算子使用 5 @ 5 邻域,考察主要的 8 个边缘方向(如图 2 所示)。Ratio 算子得到的边缘方向是 8 个方向之一,这些方向是固定的。如果图像中一条直线正好

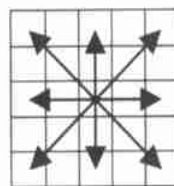


图 2 Ratio 算子的边缘方向



图 3 原始 SAR 图像



图 4 由 Ratio 算子得到的直线图

介于两个方向之间(如图 3 所示),直线上的点的边缘方向将不能一致,这会使直线出现断裂的现象(如图 4 所示).

克服量化断裂问题的有效方法是重叠量化(overlapping),这一方法首先由 Burns^[8]提出.其基本思想是将每一个边缘点得到的方向在两种划分下量化,两种划分相差量化单位的一半.例如一个划分是[(0b, 4b), (4b, 9b), (9b, 13b), , , (31b, 6b)];另一个划分是[(221b, 671b), (671b, 1121b), (1121b, 1571b), , , (3371b, 221b)].每个划分赋予边缘点一个方向值,并将其包含在一个直线支持区中(定义见第 2 节).一个边缘点 E 在每种划分下都对应一个直线支持区;最大的那个支持区对应的边缘方向量化值被赋给 E.重叠量化要求原始的边缘方向比较细致. Ratio 算子只能提高大致的边缘方向,无法重叠量化.因此, Ratio 算子也不能直接用在直线提取中.

3.1.4 组合两种算子的边缘检测方法

为了使边缘算子应具有恒虚警性,同时又要得到边缘的准确方向.我们将边缘检测中的检测与边缘方向的计算分开,以达到以上要求.

边缘算子是否具有恒虚警特性,是由边缘强度决定的.因此在新算子中我们用 Ratio 算子计算边缘强度.

在 SAR 图像的统计模型下,对于同一灰度结构,如果叠加上不同的灰度偏置, Canny 算子得到的不同的边缘方向;然而,只有把 Canny 算子在空间上不相邻且灰度差异较大的两个区域上进行对比时,这种细微的差异才会显现出来.在本文的直线提取框架中,关心的是相邻像素的边缘方向一致性,相邻像素的边缘方向间的关系不会受到 Canny 算子这一缺陷的影响.因此 Canny 算子得到的边缘方向是可以用于边缘编组的. Canny 算子的边缘方向实质上反映了在抑制噪声后图像的灰度梯度方向,这也符合人类视觉的感受;它能提供比较精确的边缘方向,可以满足重叠量化的需要.在新算子中我们用 Canny 算子计算边缘方向.新的算子描述为:

$$\text{边缘强度: } R = \text{Max}_L(R_L) \quad (6)$$

$$\text{边缘方向: } n = \text{arg} \{ \text{G}^* f(x, y) / | \text{G}^* f(x, y) | \} \quad (7)$$

式(6)、(7)中的符号,分别与式(4)、(5)中的定义相同.新算子保证了边缘提取的恒虚警,又能应用重叠量化克服量化带来的直线断裂问题.

4 高层编组

通过边缘检测得到了边缘点以及对应的边缘方向.根据第 2 节中的边缘编组方法,将边缘方向相同且相连的边缘点聚集成直线支持集.对直线支持集进行拟合就得到初始直线.对通常的光学图像,这样得到的直线已经可以达到要求;然而,在 SAR 图像中由于相干斑噪声的存在,常常使得长直线断裂成几段.这种由噪声引起的断裂有别于第 3 节中由于边缘方向量化导致的断裂,需要进一步克服.由相干斑噪声引起的直线断裂主要有以下两种情况:

(1) 在图像中直线两侧区域的对比度原本是较高的,由于噪声的存在,使局部区域的对比度下降,以至于得到的边缘幅度低于门限,导致该段直线的缺失.

(2) 对边缘方向的影响.在初步编组中边缘的方向是形成直线支持区的重要线索.虽然第 3 节提出的边缘检测方法具有一定的抗噪能力,但是得到的边缘方向仍然有可能由于噪声的污染而偏离,导致直线的断裂.

以往的直线提取的后处理方法^[6~8]都是从已经得到直线图中搜索信息,按照一定的原则对直线图进行连接和延拓;在许多情况下得到的连接和延拓实际上在原始 SAR 图像中并不存在.为了克服这个问题,我们在处理中引入基于原始图像信息的统计假设检验,对候选的拓展直线进行筛选.整个高层编组方法包括两个步骤:首先,分析已经得到的初始直线图,找出有可能扩展的直线区域;然后,通过假设检验对这些区域进行筛选.

4.1.1 选定可能扩展的直线区域

已经得到的直线集记为 $S, S = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_N\}$, N 为直线的数量. S 中的每个元素包含若干属性,包括端点位置、对应区域的边缘方向、对比度、宽度和直线两侧的灰度值等.可能扩展的直线区域集记为 $F, F = \{f_0, f_1, f_2, \dots, f_M\}$. F 是通过连接 S 中的直线对得到的.选定 F 的过程就是选定 S 中有可能连接的直线对的过程.可能被连接的直线对应该具有以下的特点:

- (1) 两条直线端点之间距离应该小,即近似于首尾相接;
- (2) 两条直线之间的夹角应该小;

由此定义 S 中任意直线对 (s_i, s_j) 的连接强度为:

$$C_{ij} = \begin{cases} w_0 \# d_{ij} + w_1 \# a_{ij}, & d_{ij} < T_d, a_{ij} < T_a \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

其中 d_{ij} 为 s_i 与 s_j 的端点间最小距离; a_{ij} 为 s_i 与 s_j 的边缘方向的夹角; w_0, w_1 为加权系数. T_d 是可以容忍的最大直线间距离, T_a 是可以容忍的直线边缘方向的最大夹角.

利用 C_{ij} 选择可能扩展的直线区域,并对 S 中的直线对按照连接强度进行排序.在实际中可以每次先选取连接强度最强的直线区域参加下一步的假设检验.

4.1.2 直线区域的假设检验

直线区域假设检验的目的是验证直线区域 f 中是否包含了直线.如图 5 所示, f 是直线对 (s_1, s_2) 的连接区域, s_1 和 s_2 的直线支持区为 A_1, A_2 .由于相干斑噪声的存在, f 中的对比度低于 A_1 和 A_2 , f 中的边缘方向与 A_1, A_2 的边缘方向有差异.



图 5 已知直线和候选直线区域

记在 A_1 中 s_1 两侧的灰度均值为 m_{11}, m_{12} ; A_2 中 s_2 两侧的灰度均值为 m_{21}, m_{22} .记 f 中连接 s_1 和 s_2 的直线段为 s_f ; s_f 两侧像素的灰度值分别为 $\{g_{1i} | i = 0, 1, 2, \dots, n_1\}$ 和 $\{g_{2i} | i = 0, 1, 2, \dots, n_2\}$, n_1 和 n_2 是两个区域的像素数.

f 的两端有 s_1 和 s_2 ,且 f 是一个狭长区域.如果在 s_f 位置上存在直线, s_f 两侧区域的灰度也应与 s_1 和 s_2 两侧区域的灰度均值相近.如果 s_f 位置不存在直线时, s_f 两侧区域的灰度均值应该接近, f 中的灰度分布均匀.由此,建立判定直线区

域 f 中是否包含直线 s_f 的二元假设:

$$H_0: \begin{cases} g_{1i} = m_1, i = 0, 1, \dots, n_1 \\ g_{2j} = m_2, j = 0, 1, \dots, n_2 \end{cases}; \text{其中, } \begin{cases} m_1 = (m_{11} + m_{21}) / 2 \\ m_2 = (m_{12} + m_{22}) / 2 \end{cases} \quad (9)$$

$H_1: g_{1i} = g_{2j} = C$, 其中 $i = 0, 1, \dots, n_1, j = 0, 1, \dots, n_2, C$ 为常数, 是 f 中的灰度均值.

建立判定的似然比: $K = \frac{p(f|H_0)}{p(f|H_1)}$; 当 $K > 1$ 时判定 H_0 成立, 否则 H_1 成立.

忽略相干斑在像素间的相关性得到:

$$P(f|H_k) = \prod_{i=0,1,\dots,n_1} p(g_{1i}|H_k) \prod_{j=0,1,\dots,n_2} p(g_{2j}|H_k), \quad k = 0, 1 \quad (10)$$

由式(1)中的相干斑统计特性得到:

$$p(g_{1i}|H_0) = G(m_1, g_{1i}); p(g_{2j}|H_0) = G(m_2, g_{2j});$$

$$p(g_{1i}|H_1) = G(C, g_{1i}); p(g_{2j}|H_1) = G(C, g_{2j});$$

其中 $G(R, I) = \frac{L^L}{\#(L)R^L} \exp(-\frac{LI}{R}) I^{L-1}$; L 为 SAR 图像的多视数.

代入似然比得到

$$K = \frac{\exp[(\frac{1}{C} - \frac{1}{m_1})\# \sum_i g_{1i} + (\frac{1}{C} - \frac{1}{m_2})\# \sum_j g_{2j}]}{m_1^{L\#} m_2^{L\#} / C^{L(n_1+n_2)}};$$

求对数得到

$$\ln K = \frac{\ln(K)}{L} = (\frac{1}{C} - \frac{1}{m_1})\# \sum_i g_{1i} + (\frac{1}{C} - \frac{1}{m_2})\# \sum_j g_{2j} + K \quad (11)$$

其中, $K = (n_1 + n_2) \ln C - n_2 \ln m_1 - n_1 \ln m_2$

当 $\ln K > 0$ 时判定 H_0 成立, 否则 H_1 成立.

在噪声较强时, f 可能出现断裂; 此时从断裂处沿直线将

f 分为若干个子区间, 然后对各个子区间分别使用以上的判决.

5 实验结果及分析

我们分别用 Canny 算子, Ratio 算子以及第 4 节中提出的组合算子进行边缘检测, 结合边缘编组框架和高层编组框架, 从 SAR 图像中提取直线. 直线提取的结果如下.

图 6 是一张 X 波段机载 SAR 图像, 主要是由农田和道路以及一些建筑物组成. 在图像的上半部, 有几块农田, 右侧的农田比左侧的亮; 在图像上部的正中是一片树林; 在图像的中间, 有一条左右横贯图像的主要道路; 下部是一些建筑和其他复杂纹理.

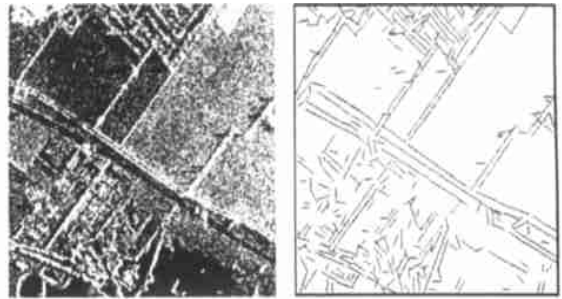


图 6 原始的 SAR 图 图 7 本文方法最终得到的直线图 (已经滤除短直线)

图 8 是用 Canny 算子进行边缘检测得到的直线图, 反映了原图的基本结构, 但是正如第 3 节中证明的那样, 在高亮度的平滑区域(右上方的农田)得到的虚警直线比低亮度的平滑区域(左上方的农田)要多.



图 8 用 Canny 算子得到的直线图



图 9 用 Ratio 算子得到的直线图



图 10 新算子得到的直线图

图 9 是由 Ratio 算子得到的直线图, 在不同亮度的平滑区域中的虚警直线基本相同. 但是, 在图像的中间左右横贯整个区域的主要道路分裂成为许多短小的直线; 这是因为这条道路的走向正好与一个边缘方向量化分界线一致造成的.

图 10 是由本文提出的组合算子进行边缘检测得到的直线图, 可以看到直线图保留了原图的各种结构. 保持了恒虚警的特性, 同时克服了由于边缘方向量化带来的直线断裂问题. 但是道路等处的长直线还是存在着断裂的情况.

图 7 是在图 10 结果的基础上经过高层编组之后得到的直线图, 也是本文方法的最终结果. 在图 10 中的许多断裂已经连接上, 所有主要的长直线都被提取出来, 直线图准确的描述了原图的主要结构.

表 1 中比较了 Canny 算子 Ratio 算子和组合算子在直线提取中的性能. 其中的边缘密度系数 (Edge Density Coefficient - EDC) 反映了算子的虚警性能. EDC 是这样得到的: 首先选取图像中亮度不同的两块平滑区域 (左上部较暗的农田和

右上较亮的农田),用统一门限分别在两个区域中提取边缘点;统计两块区域中的边缘密度 D (边缘点个数 / 面积);EDC 为亮区域的边缘点密度与暗区域的边缘密度的比值.由于选取的区域的平滑性近似,所以算子是衡虚警率时 EDC 的值应该接近 1,即在两块区域中得到的边缘密度接近.从表中可以看到, Canny 算子的 EDC 明显大于 1,说明 Canny 算子在亮区域的边缘检测率高于暗区域,不是衡虚警.而组合算子与 Ratio 算子的 EDC 都接近 1,接近衡虚警.(实际上组合算子的检测是依赖 Ratio 算子完成的,因此两个算子的 EDC 相等).这些结果与前面的理论分析相吻合.

从表 1 中的长度大于 20 的长直线的数量统计可以看出,在未编组的情况下组合算子得到的长直线明显高于 Ratio 算子,这是因为 Ratio 算子的方向量化粗糙导致了直线断裂.经过编组后组合算子和 Canny 算子得到的长直线数量接近,这显示出高层编组的效果.

表 1 直线提取性能的比较

	Canny 算子	Ratio 算子	组合算子
EDC(边缘密度系数)	21.20	11.15	11.15
编组前长直线数量(长度 > 20)	61	24	49
编组后长直线数量(长度 > 20)	70	58	67

6 结论

本文针对 SAR 图像的特点,设计了直线提取算法.提出了组合使用 Canny 算子和 Ratio 算子进行边缘检测,克服了边缘方向量化带来的直线断裂;直线提取算法在不同亮度的平滑区域中具有相同的虚警率.提出了新的高层编组框架,基于直线间相互关系和统计假设检验对直线图进行完善.提取的直线图准确描述了 SAR 图像中的各种结构,可以用于遥感图像矢量化、自动目标识别等方面.

附录

命题 Canny 算子在 SAR 图像中的边缘检测不具有恒虚警的特性.这里虚警率 (Pfa) 定义为,在没有边缘的平坦区域中的像素被检测为边缘的概率.

证明 SAR 图像的相干斑噪声模型 $I(x, y) = A \# R(x, y) \# n(x, y)$. 在无边缘的平坦区域中 $R(x, y) \leq R_0$, 此时 $I_0(x, y) = A \# R_0 \# n(x, y)$. Canny 算子得到的边缘强度为:

$$D = | \nabla G^* I_0(x, y) | = | R_0 (\nabla G^* (A \# n(x, y))) |$$

令 $d = | \nabla G^* (A \# n(x, y)) |$, 对于给定的门限 T , 虚警率 $Pfa(T)$ 为:

$$Pfa(T) = \text{Prob}(D > T) = \text{Prob}(d > T / R_0)$$

$n(x, y)$ 为高斯噪声, $P(d)$ 不随 R_0 变化. 因此 $\text{Prob}(D > T)$ 为 R_0 的单调递增函数, 即 Canny 算子在高灰度区域的边

缘检测虚警率高于低灰度区域,不具有恒虚警特性.

参考文献:

- [1] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1986, 8(11): 679- 698.
- [2] Dainty J. Laser Speckle and Related Phenomena (Vol. 9) [M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1975.
- [3] Touzi R, Lopes A, Bousquet P. A statistical and geometrical edge detector for SAR images [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(6): 764- 773.
- [4] Skingley J, Rye A. The Hough transform applied to SAR images for thin line detection [J]. Pattern Recognit Lett, 1987, 6(3): 61- 67.
- [5] Burns B. Extracting straight lines [J]. IEEE Trans Patt Anal Machine Intell, 1986, PAM28(4): 425- 455.
- [6] Merlet N, Zerubia J. New prospects in line detection by dynamic programming [J]. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1996, 18(4): 426- 431.
- [7] Geman D, Jedynak B. An active testing model for tracking roads in satellite images [J]. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1996, 18(5): 1- 14.
- [8] Tupin F. Detection of linear features in SAR images: application to road network extraction [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(2): 434- 453.
- [9] 王程, 文贡坚, 王润生. 宽带图像信号的直线提取[J]. 计算机学报, 2002, 25(7): 753- 758.
- [10] Tur M, Chin K.C, Goodman J.W. When is speckle noise multiplicative [J]. Applied Optics, 1982, 21(7): 1157- 1159.
- [11] Ulaby F, Kouyate F, Brisco B, Williams L. Textural information in SAR images [J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 1986, GE24: 235- 245.

作者简介:



王程 男, 1975 年 7 月出生于湖南长沙, 博士生, 现就读于国防科技大学电子科学与技术学院 ATR 国防科技重点实验室, 研究兴趣包括图像理解与融合.



王润生 男, 1941 年 8 月出生于江苏扬州, 国防科技大学电子科学与技术学院教授, 博士生导师, 研究兴趣包括图像分析、理解与信息融合.