

基于融合边缘检测的SAR图像线性特征提取算法

安成锦 杜琳琳 王卫华 陈曾平
(国防科技大学 ATR 重点实验室 长沙 410073)

摘要: 该文基于合成孔径雷达(SAR)图像低信噪比的特点,设计了一种基于融合边缘检测的线性特征提取算法。首先采用融合Canny算子及ROA算子得到边缘点,然后利用Radon变换得出线基元,最后根据启发式连接的思想连接了由于噪声引起的直线断裂。实测SAR图像的实验结果表明,该文提出的线性特征提取方法能够准确描述SAR图像的线性结构,可应用于自动目标识别和景象匹配等方面。

关键词: 合成孔径雷达; 相干斑噪声; 边缘检测; 线基元提取; 启发式连接

中图分类号: TP753

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1279-04

Linear Feature Extraction for SAR Image Based on Fused Edge Detector

An Cheng-jin Du Lin-lin Wang Wei-hua Chen Zeng-ping
(ATR Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A linear feature extraction algorithm for Synthetic Aperture Radar (SAR) image is proposed, which is based on the low signal-to-noise quality of SAR image. Firstly, a new edge detector, which fuses the Canny operator and Ratio Of Average (ROA) operator, is used to get the edge points. Then, radon transform is carried out to get the primitive line segments. Finally, the broken lines due to speckle noise are connected by means of the heuristic link idea. The experiment results which are based on the SAR images show, the proposed algorithm can describe the linear characteristic of SAR images precisely, and it can be used for SAR auto target recognition and scene matching.

Key words: SAR; Speckle noise; Edge detection; Primitive line segment extraction; Heuristic link

1 引言

在各种空间和航空图像传感器中,合成孔径雷达(SAR)具有全天候工作特性,并且有一定的穿透能力。SAR技术已广泛的应用于地质、植物、气象、资源调查、战场侦察等各个学科领域。其中,道路网、机场跑道等大型组合线性目标的特征提取,在军事和民用上都有重要的意义。

SAR图像与光学图像的成像机理不同,SAR图像反映了地物对电磁波的后向散射特性。固有的相干斑噪声使得SAR图像呈现强噪声现象。因此,有必要针对SAR图像的特点,设计相应的线性特征提取方法。

SAR图像线性特征提取方法通常包含3个步骤:首先对SAR图像进行滤波等预处理;然后对像素邻域进行检测将边缘点与背景区分开,称为边缘检测;最后将以像素为单位的边缘点连接成直线并描述其线结构,称为边缘编组。

边缘检测是像素级运算。在光学图像的边缘检测中,通常采用Canny^[1]或零交叉等梯度算子。其中,Canny算子有较好的边缘定位能力,运算量适中,但针对的是加性噪声模型。而SAR图像的噪声为近似服从Gamma分布的乘性噪声,

因此,差分梯度算子对于SAR图像来说不再是恒虚警的^[2]。

Touzi等人提出,均值比率(Ratio Of Average, ROA)算子在Gamma分布的相干斑中具有恒虚警的特性^[3],然而ROA算子边缘定位能力差,不能直接用于线性特征自动提取中的边缘检测。

边缘编组一般分为两步:线基元提取和线基元连接。线基元提取一般有以下几种方法:相位编组^[4]、基于模板的线基元提取、Radon变换^[5]等。从线基元的提取率、正确性、提取品质等来看,Radon变换的提取性能最好^[6],而且Radon变换无需利用边缘点的方向信息,克服了低分辨率SAR图像边缘方向定位不准的问题^[7]。线基元提取后的直线图往往存在缺损和偏差,为此需要将断裂的线基元连接起来。

本文选取Frost算法对图像进行滤波预处理,在去除斑点噪声和保持边缘信息之间进行了折衷。基于Canny算子和ROA算子,提出了一种新的边缘检测算法,该算法在保持恒虚警的同时有较好的边缘定位能力。利用改进的Radon方法进行直线支持集提取并采用最小二乘方法对直线支持集进行拟合,得到了线基元。最后,针对Radon变换提取的线基元的特性,基于启发式连接的思想^[8]提出一种稳健的线基元连接算法,进一步完善了提取的直线特征。实验证明,新的直线提取方法较好地描述了SAR图像中的线性特征。

具体的流程如图1所示。

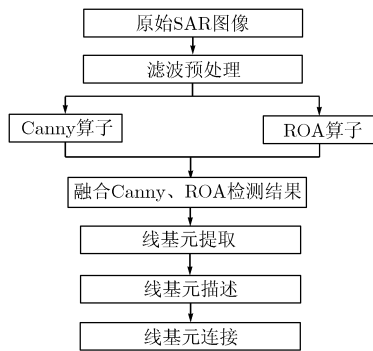


图1 线性特征提取流程图

2 SAR图像边缘检测

在进行边缘检测前，对图像进行滤波处理是必要的，尤其对相干斑影响严重的SAR图像更是如此。常用的SAR滤波方法主要有Lee滤波、Frost滤波、中值滤波、高斯滤波等。比较发现Frost算法保持边缘能力较强。为了得到质量较高的直线特征，本文采用经典Frost滤波算法进行滤波预处理。

2.1 基于Canny算子的SAR图像边缘检测

Canny算子在灰度图像处理中得到了广泛的应用。其算法流程如图2所示。



图2 Canny算法流程图

Canny算子具有定位能力强、对单一边缘唯一对应等优点。但是Canny算子是针对加性噪声模型的，对于SAR图像不具有恒虚警的特性，在高亮度区域边缘检测虚警率高于低亮度区域^[2]。因此，须对Canny算子加以改进，才能适用于新环境。

2.2 基于ROA算子的SAR图像边缘检测

Turzi等人在文献[3]中证明了ROA算子在SAR图像中边缘检测是恒虚警的，这对保持边缘检测的稳健性很有利。ROA算子的邻域不宜过大，因为大的邻域只能检测出那些比较宽的边缘而且运算量很大。通常ROA算子考虑 5×5 邻域，考察8个边缘方向，如图3所示。

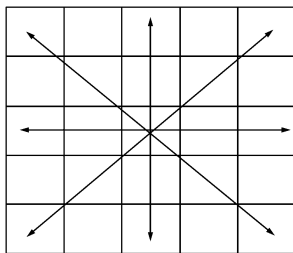


图3 ROA算子的边缘方向

由于ROA算子只考虑了8个边缘方向，如果一条直线恰好介于两个方向之间，会出现断裂的情况。而且ROA算子边缘定位能力较差，所以ROA算子也不能直接应用于线性特征提取。

2.3 组合两种算子的边缘检测算法

为了使边缘检测算子具有恒虚警特性，并且具有边缘定位能力准、抗断裂性好的特点，可在实现恒虚警的基础上实现高精度边缘定位。根据上述思想，本文提取了一种新的融合边缘检测算子。

首先采用ROA算子进行边缘检测，达到检测恒虚警的要求。ROA算子边缘定位能力较弱，但是真实边缘一般在ROA算子检测结果附近。所以，可以将ROA算子的检测结果进行一定的膨胀，利用Canny算子对膨胀后的结果进行二次检测。

膨胀是在二值图像中“加长”或“变粗”的操作。这种特殊的方式和变粗的程度由一个称为结构元素的集合控制。A被B膨胀，记为 $A \oplus B$ ，定义为

$$A \oplus B = \left\{ z \left| \left(\hat{B} \right)_z \cap A \neq \emptyset \right. \right\} \quad (1)$$

由于Canny算子边缘定位能力准、抗断裂性好，因此二次检测的结果不仅具有一定的恒虚警特性，而且边缘定位能力准、抗断裂性好。同时，Canny算子的二次检测是在ROA检测结果的邻域内进行的，所以运算量增加很少，利于工程实现。

3 基于点启发式连接思想的线基元连接

由于SAR图像中存在相干斑噪声，常常使得长直线断裂成几段。为了得到完整的线性特征，需要将断裂的直线段连接起来。这一过程称为线基元连接。线基元连接建立在提取较完整的线基元基础上。

SAR图像信噪比低、相干斑强，一般不能得出边缘点的准确方向。本文采用具有一定几何解析性的算法将边缘点聚集成直线支持集，然后对直线支持集进行拟合实现线基元提取。Radon变换具有明了的几何解析性、一定的抗干扰能力和易于并行处理等优点，而且，与Hough变换相比，Radon变换计算量小、不需要太大存储空间^[6]。所以，本文采用Radon变换实现直线支持集提取^[5]。

启发式连接一般是图的边缘跟踪。边缘图上有边缘处都为节点，边缘的幅度和相位为节点的状态，连接操作是搜索图中有最小损失路径的节点集。最小损失的定义与所用的适应度函数有关，也与具体的任务有关。不仅要考虑现有节点与下一候选节点的关系，还要考虑它与现有节点连接的上一节点的情况^[9]。

本文采用启发式连接的思想将断裂的线基元连接起来。首先设计适合Radon变换的适应度函数，然后将线基元看作边缘点(即节点)，将线基元的端点坐标、斜率等信息作为节点的状态，利用适应度函数将具有最小损失路径的节点连接起来。具体实现流程如图4所示。

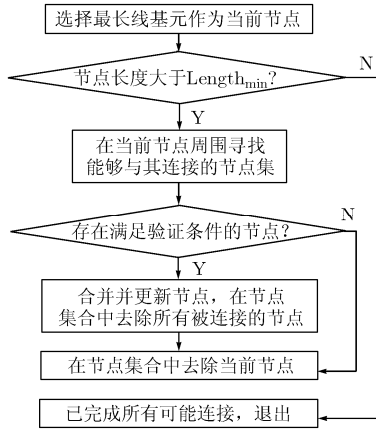


图4 采用点启发式连接思想的线基元连接流程

按照SAR图像线段共线准则设计适应度函数。判断两条线段是否可以连接需要满足以下标准:

(1)邻近性^[10] 如图5(a)所示,设线1和线2的长度分别为 l_1 和 l_2 , 端点间的最短距离为 $dist_1$, 线1为当前节点, 则邻近性的概率密度函数定义为

$$P(dist_1) = \begin{cases} 1 - \frac{dist_1}{l_2}, & dist_1 \leq l_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

(2)共向性^[10] 如图5(b)所示,共向性可以定义为两直线所夹的锐角 θ 的函数:

$$C(\theta) = \begin{cases} 1 - \theta \times 10 / \pi, & \theta \in [0, \frac{\pi}{10}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

(3)重叠性 如图5(c)所示,重叠性的概率密度函数定义为

$$o(dist_2) = \begin{cases} 0, & \theta = \pi / 2 \\ \frac{dist_2}{l_2 \cos \theta}, & \theta \neq \pi / 2 \end{cases} \quad (4)$$

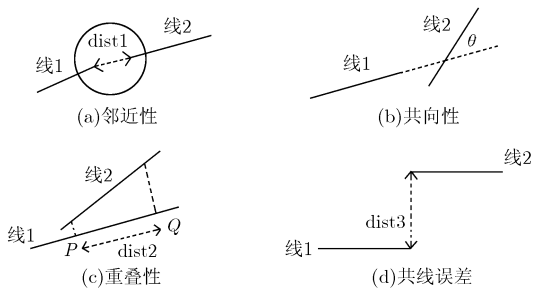


图5 线段共线示意图

(4)共线误差 在线段连接中,需要考虑平行线间的垂线长,这一需求在机场跑道目标中尤为明显^[6]。如图6所示,线3和线4属于线1,线5和线6属于线2,线1和线2互相平行。由于线6比线4长,且两条线段距离较近,若不考虑共线误差,会发生线3和线6连接的情况,产生误连接。

共线误差定义为

$$m(dist_3) = \begin{cases} 1 - dist_3/5, & dist_3 < 5 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

文献[11,12]分别采用不同方法实现道路、机场目标的线基元连接,适应度函数没有考虑线基元平行的问题。本文共线误差的提出,使得同一适应度函数不仅适用于道路目标的线基元连接,而且适用于平行线较多的场景,对机场目标的线基元连接也有较好的适用性,解决了算法通用性问题。

设计适应度函数是由上述4个因素构成的。

$$f_{ij} = \alpha \max(P_{ij}, o_{ij}) + \beta \theta_{ij} + \gamma m_{ij} \quad (6)$$

在进行线基元提取时,由于相干斑噪声等的影响,同一条线段有可能断裂成比较重叠的两小段,如图7所示。因此,本文取邻近性和重叠性的最大值作为两节点距离关系的度量以准确反映其相互位置关系。式(6)中 α , β , γ 为各种度量的影响因子,可根据实际情况设置。

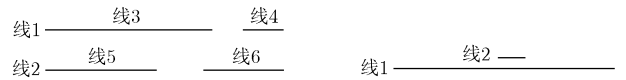


图6 断裂平行线示意图

图7 两线段比较重叠示意图

4 实验结果及分析

图8为一张低信噪比SAR图像,主要是由农田、道路及一些建筑物组成。在图像左下部分是比较平坦的农田,其余部分是建筑物和宽窄不一的道路。图9是用Canny算子进行边缘检测的结果,边缘定位能力强、断裂少,反映了原图的基本特征,但是农田部分的虚警很大,道路部分虚警较小,正如前面分析的那样,在SAR图像中,Canny算子不能保持恒虚警,不利于后续处理。图10是由ROA算子得到的边缘点,在不同地区中的虚警点基本相同,但是,该算子边缘定位能力弱,且断裂较多。这是由于ROA算子边缘方向量化造成的。图11是由本文提出的融合算子进行边缘检测得到的结果,可以看出保留了原图的基本结构,保持了恒虚警特性,同时边缘定位能力强,但是部分道路还是存在边缘断裂的情况,这是由于道路相交引起的。

采用改进的Radon变换提取线基元,结果如图12所示。图11中的主要线结构被提取出来,杂散点得到了抑制,但是主要直线还是存在断裂的情况。利用本文设计的适用度函数

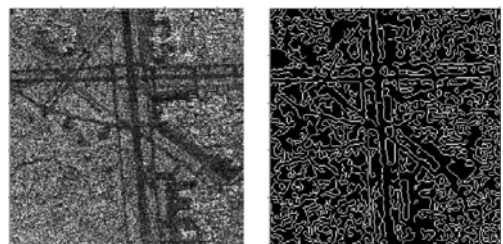


图8 原始SAR图像

图9 Canny算子边缘检测结果



图10 ROA算子边缘检测结果 图11 融合算子边缘检测结果

将线基元连接成长线，滤除短线段，得到最终的直线特征，结果如图13所示。从图13可以看出，许多断裂的线基元已经连上，没有出现误连接的情况；原始SAR图像中主要的长直线都被提取出来，直线特征图准确地定位了原图中的主要线性结构。因此，本文提出的适应度函数不仅准确有效，而且适应性较好。

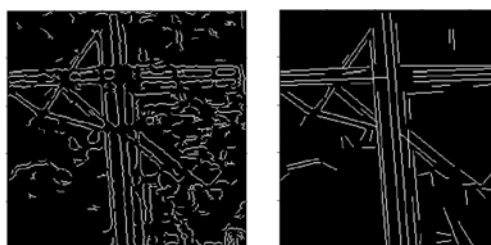


图12 基于Radon的
线基元提取结果

图13 本文方法
得到的直线特征

5 结束语

本文针对低信噪比SAR图像的特点，设计了一种新的适于工程实现的线性特征提取方法。提出了采用融合Canny算子和ROA算子的边缘检测算法，实现了检测恒虚警并克服了直线断裂，检测算法有较高的边缘定位能力。利用Radon变换提取线基元，无需考虑边缘方向，克服了低信噪比带来的边缘方向定位不准的问题。基于点的启发式连接思想，定义了基于Radon变换的适应度函数，实现了线基元的可靠连接。提取的线性特征准确描述了SAR图像的线性结构，得到的线性特征可用于自动目标识别和景象匹配等方面。

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] 王程, 王润生. SAR图像直线提取[J]. *电子学报*, 2003, 23(3): 816-820.
Wang Cheng and Wang Run-sheng. Line extraction for SAR image[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 23(3): 816-820.
- [3] Touzi R, Lopes A, and 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] Burns B. Extracting straight lines[J]. *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell*, 1986, PAMI-8(4): 425-455.
- [5] Cardoso L A. Computer aided recognition of man-made structures in Aerial photographs[C]. Naval Postgraduate School, Monterey, USA, 1999.
- [6] 贾承丽. SAR图像道路和机场提取方法研究[D]. [博士学位], 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
Jia Cheng-li. The research of extraction of roads and airport for SAR imagery[D]. [Ph.D.dissertation], Changsha: National university of defense technology, 2006.
- [7] Costa R C S and Medeiros F N S. Linear features detection in SAR images for urban analysis[C]. XV Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, Brazil ce fortaleza, 2002: 401.
- [8] Dai Yuanshun, Xie Min, and Wang Xiaolong. A heuristic algorithm for reliability modeling and analysis of grid systems[J]. *IEEE Trans. on Systems*, 2007, 37(3): 189-200.
- [9] 王润生. 图像理解[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998: 69-73.
Wang Run-sheng. Computer Comprehension[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1998: 69-73.
- [10] 贾承丽, 赵凌君, 吴其昌, 匡纲要. 基于遗传算法的SAR图像道路网检测方法[J]. *计算机学报*, 2007, 30(7): 1186-1194.
Jia Cheng-li, Zhao Ling-jun, Wu Qi-chang, and Kuang Gang-yao. Automatic extraction of road network from SAR imagery based on genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(7): 1186-1194.
- [11] 贾承丽, 周晓光, 计科峰, 匡纲要. 复杂SAR场景中机场跑道的提取[J]. *信号处理*, 2007, 23(3): 374-378.
Jia Cheng-li, Zhou Xiao-guang, Ji Ke-feng, and Kuang Gang-yao. Extraction of runways in complex synthetic aperture radar images[J]. *Signal Processing*, 2007, 23(3): 374-378.

安成锦: 女, 1982年生, 博士生, 从事SAR图像解译、景象匹配等方面的研究。

杜琳琳: 女, 1981年生, 博士生, 从事雷达成像、电磁散射建模等方面研究。

王卫华: 男, 1980年生, 讲师, 从事信号处理、目标识别及专业处理系统等方面研究。

陈曾平: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 主要从事目标识别、雷达信号处理等方面研究。