

大场景高分辨率 SAR 图像中机场快速检测方法

张立平^{1),2)} 张红¹⁾ 王超¹⁾ 张波¹⁾ 杨浩^{1),2)}

¹⁾(中国科学院对地观测与数字地球科学中心,北京 100086) ²⁾(中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要 目前关于机场检测的研究已有很多,但大多以红外或可见光遥感图像为处理对象,而对合成孔径雷达(SAR)图像的处理主要集中在含有机场的小场景情况。针对大场景高分辨率 SAR 图像中机场快速检测问题,在现有检测方案的基础上提出了一种新的机场检测方法。首先对原始图像进行预处理,然后对图像进行自适应阈值分割并提取图像中的感兴趣区(ROI),最后提取 ROI 的尺寸、形状、对比度和拓扑特征并送入二叉决策树进行辨识。实验结果表明,该检测方法具有较高的准确率和较快的处理速度。

关键词 SAR 图像 机场检测 拓扑特征 欧拉数

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)07-1112-09

A Fast Method of Airport Detection in Large-scale SAR Image with High Resolution

ZHANG Liping^{1),2)}, ZHANG Hong¹⁾, WANG Chao¹⁾, ZHANG Bo¹⁾, YANG Hao^{1),2)}

¹⁾(Center for Earth Observation and Digital Earth Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086)

²⁾(Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049)

Abstract At present, there has been many researches on airport detection, but most of them are about infrared or optical images, and the research about synthetic aperture radar(SAR) images are mostly focusing on small scale instances. Aiming at large-scale SAR image with high resolution, a new method was proposed based on the existing detection scheme. Firstly, pre-process is implemented on the image. Then suspicious regions of interesting(ROI) are extracted from the pre-process result. Finally, all ROIs are identified by using four features and binary decision tree. Experiments show that the method can satisfy the request of speed with high detection accuracy.

Keywords SAR image, airport detection, topologic property, Euler number

0 引言

机场是一种重要的交通设施和军用设施,它的自动检测在飞机导航、军事侦察和精确打击等领域有着重要的实用价值。而合成孔径雷达因具有全天时、全天候工作的优点,使其成为进行机场检测的重要数据源。随着 SAR 成像技术的迅猛发展,图像分辨率越来越高,这给检测带来高质量数据的同时也大大增加了系统处理的数据量。因此,如何在大场景高分辨率 SAR 图像中快速、准确地完成机场自动

检测是本文的研究重点。

目前,国外对机场检测已进行了较为深入的研究,但由于涉及技术保密,可查阅的文献较少,已有的有文献[1-3]。其中文献[1]介绍了西欧联盟卫星中心开发的遥感图像地面目标(包括机场)的检测与识别系统,在该系统中需要操作员输入检测对象的相关知识,并干预整个检测与识别的过程,随时更正系统检测和识别的错误;文献[2]介绍了1998年法国 MICHEL 提出使用经过地理配准的多源图像(包括 ERS-1 SAR 图像和 SPOT 图像)及简单模型来检测机场,首先将图像在地理参考系统中进行配

基金项目:国家自然科学基金项目(40601058,40701108)

收稿日期:2008-12-25;改回日期:2009-05-14

第一作者简介:张立平(1980—),男。现为中国科学院对地观测与数字地球科学中心在读博士研究生。主要研究方向为 SAR 图像目标检测与识别。E-mail: zzzlp@163.com

准,然后利用地理信息确定机场的大致区域,最后使用模糊滤波器检测出机场跑道。以上方法属于国外早期的研究成果,最新的研究进展还有待进一步的报道。

相对而言,国内机场检测的研究起步较晚,但经过众多学者的不懈努力,已有多种检测方法被提出,虽然都还没达到实际应用的要求,但为今后的研究奠定了坚实的理论基础。国内具有代表性的研究有:

1) 叶斌等人针对军用机场的结构特征提出的机场检测方法,首先对图像进行分割、细化、断线修补和毛刺剔除等处理,然后利用 Hough 变换提取满足置信度的两平行直线,接着用链码搜索的方法寻找与平行直线相连的线段,最后用形态学膨胀的方法提取主辅跑道及其附属设施,并通过计算长度、宽度、面积和方向特征推算出相关信息^[4]。类似方法的研究还有文献[5-6]。这类方法以机场的主辅跑道为平行直线提取依据,因此在处理单跑道或者更加复杂的机场时适用性不强。

2) 倪林等人对机场区域变化检测研究中提出了一种确定机场区域的方法,首先利用直方图信息对图像进行分割,然后利用 Hough 变换确定跑道主干部分,最后运用两次区域生长算法获得整个机场区域^[7]。这类方法的研究还有文献[8-9]。由于图像中往往还存在其他线状地物,如公路、河流等,因此这类方法在处理具有复杂背景的机场图像时虚警较多。

3) 张会章等人提出了一个自动识别遥感图像中跑道的原型系统,首先使用边缘检测算子提取边缘图像,然后在边缘图中搜索直线段并按照一定规则进行直线拟合,之后提取平行直线并根据平行性和间距特征对该区域进行验证,最终确定机场^[10]。目前这类方法^[11-14]的研究最多,区别主要在于边缘检测方法和平行线区域验证方法不同。这类方法利用跑道边缘直线特征提取平行直线,对高分辨率图像具有较高的准确率,缺点是各直线检测算法计算量大而且对图像细节要求高,因此不适用于大场景或低分辨率图像。

4) 邓湘金等人提出了一个能够辅助遥感图像解译人员检测机场的系统,首先根据机场跑道特征建立跑道模型并在图像中搜索,然后得到多个 ROI 并对其定位,最后以人机交互方式剔除虚警^[15]。为提高该方法的适用性和自动性,文献[16-

19]做了深入的研究。其中文献[16-17]在 ROI 提取方面进行了研究,而文献[18-19]在 ROI 自动识别方面进行了研究。这类方法以机场区域的整体特征为出发点,逐步进行感兴趣区提取和感兴趣区确认,符合人们在大场景图像中观察地物的规律,并且机场整体特征与跑道边缘特征相比可以在更低的分辨率下提取,大大减少了处理的数据量。

除了以上4种具有代表性的研究方法外,还有文献[20]提出的基于数学形态学的机场检测方法以及文献[21]提出的基于骨架特征的检测方法。

综上所述,目前机场检测方法可归结为两套方案:一是提取代表机场跑道的直线特征,然后对直线及其附近目标进行判定,最后确定机场;二是提取疑似机场的 ROI,然后对 ROI 进行辨识,最终剔除虚警,确定机场。前者计算量大、对图像细节要求高,因此一般用于小场景高分辨率图像,例如在确定机场的大致区域后,在该区域内进行精确的跑道检测及重构;后者计算量相对较少,对图像细节要求较低,因此适合大场景图像中的机场检测。其主要缺点是 ROI 的提取严重依赖图像分割效果的好坏,并且对 ROI 辨识也有待进一步的研究。本文针对大场景高分辨率 SAR 图像,在后一种方案的基础上展开研究,并对其中的图像分割和 ROI 辨识做了重点研究,整个系统的检测流程如图1所示。

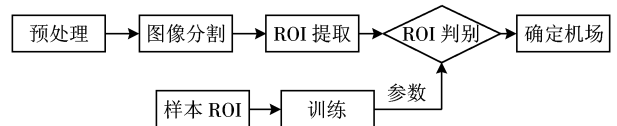


图1 机场检测流程

Fig. 1 The flow chart of airport detection

1 图像预处理

1.1 图像增强

图像增强的目的是处理图像使其更加适合后期处理的需要。本文根据大场景高分辨率 SAR 图像自身特点以及机场跑道的灰度值在直方图中的分布特点,选择直方图均衡化法进行图像增强。

对于一幅灰度图像,首先统计各灰度级 r_k 出现的概率

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad k = 0, 1, 2, \dots, 255 \quad (1)$$

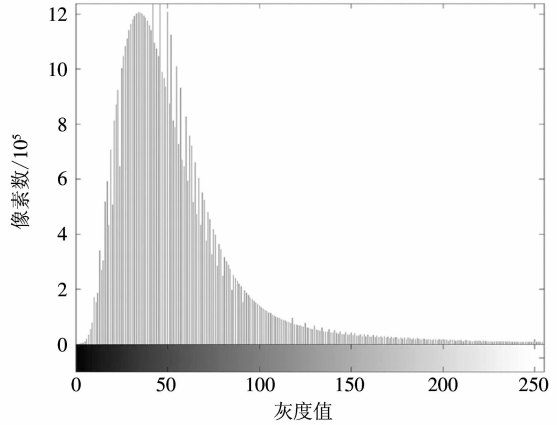
其中, n 为图像中像素的总数, n_k 为灰度级为 r_k 的像素个数。则均衡化变换公式可定义为

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} \quad (2)$$

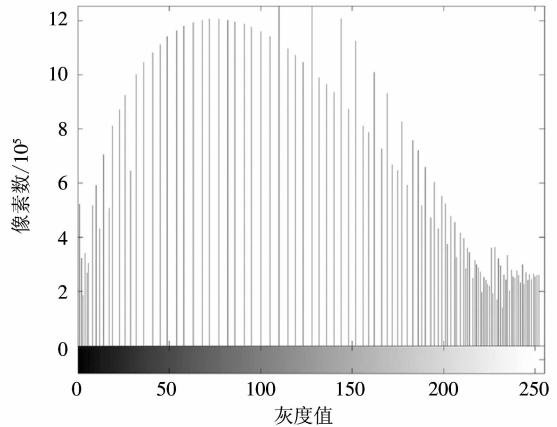
经变换, 图像直方图在整个灰度范围内会有较强的

均匀分布趋势, 即图像对比度得到有效增强(如图 2 所示, 其中 x 轴为灰度值, y 轴为像素个数, 原图像为 TerraSAR-X 3 m 分辨率数据)。

该方法的优点是图像增强过程不需要人为给定参数, 具有很好的自动性。



(a) 原图及其直方图



(b) 均衡化后图像及其直方图

图 2 直方图均衡化实例

Fig. 2 Instance of histogram equalization

1.2 图像尺度变换

根据视觉感知理论, 观察图像时通常先看到相连的纹理和灰度级相似的区域, 它们相互结合形成物体。若物体很小或对比度不高, 通常需要在较高分辨率下观察; 而如果物体很大或对比度较高, 则通常只需要较低的分辨率。由于机场区域在图像中常表现为较大尺寸, 因此符合使用较低分辨图像进行检测的条件。采用较低分辨图像进行处理带来的好处是: 数据量大幅降低, 处理速度大幅提高。本文中

的尺度变换主要涉及图像的下采样技术, 目前常用的方法有: 行—列删除法和邻域内插法。行—列删除法处理简单、速度快, 但会丢失大量图像信息, 不利于后期辨识。综合考虑, 本文选择邻域平均法进行图像尺度变换, 示意如图 3 所示。

放缩公式为

$$[\log_2(10/\Delta A)] < n \leq [\log_2(20/\Delta A)] \quad (3)$$

式中, ΔA 为图像分辨率, n 为缩放次数。

该方法的优点是在满足快处理速度的同时具有

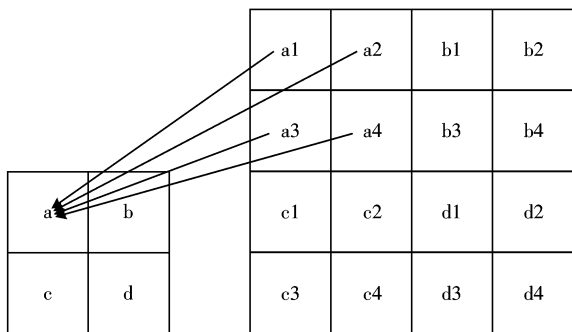


图 3 邻域平均法示意图

Fig. 3 Sketch map of neighborhood averaging

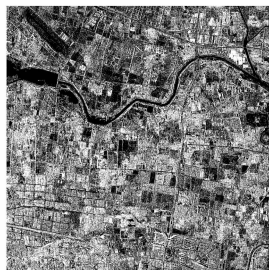
一定的信息保持能力和较好的平滑去噪作用。

2 图像分割

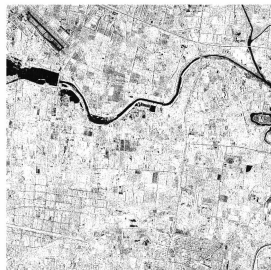
图像分割是整个系统的关键步骤,其效果的好坏将直接影响机场检测的结果。常用的分割方法有



(a) Ostu 法



(b) 改进的模糊 C-均值法



(c) 极值—峰值法



(d) 本文方法

图 4 几种方法的分割结果

Fig. 4 Segmentation results of several methods

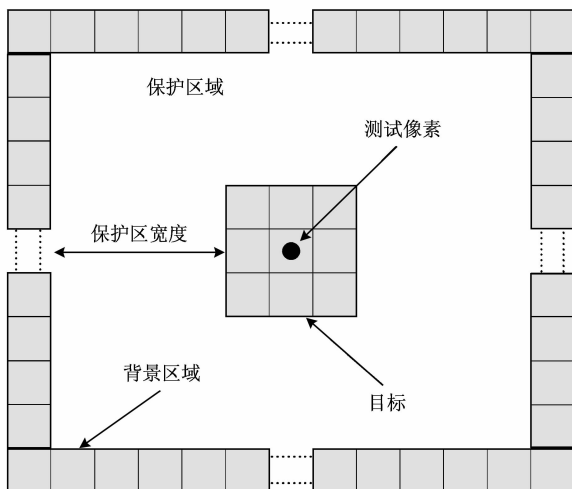


图 5 滑动窗口示意图

Fig. 5 Sketch map of slip window

Ostu 法^[17]、改进的模糊 C-均值法^[9]、极值—峰值法^[7]等。这些方法主要针对小场景图像,而在对大场景进行处理时效果如图 4 所示。其中图 4(a)和图 4(b)的分割结果偏暗,导致机场跑道和周围目标混杂在一起,不利于后期辨识特征的提取,图 4(c)的结果相对较好,但该方法在处理含有大面积海域的图像时分割效果较差,易导致机场 ROI 提取失败。

本文根据机场及其周围地物在 SAR 图像中的散射特性以及快速处理的要求,设计了一种新的自适应阈值分割算法,处理效果如图 4(d)所示。该算法基于以下事实:在 SAR 图像中机场跑道可以看成是近似光滑的表面,其回波相对较弱,常表现为暗色,而跑道周围往往是植被和建筑物,常表现为亮色,这造成图像中的跑道和周围地物呈现出很高的对比度,因此可利用这一特征进行有效分割。为减少跑道自身影响,算法采用空心滑动窗口及其快速处理方法进行对比度分析,窗口如图 5 所示。

对每个测试像素进行二元判别的规则为

$$f(x, y) = \begin{cases} 255 & \frac{\mu_T - \mu_C}{\mu_C} < \alpha_1 \text{ 且 } \mu_T < \alpha_2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中, μ_T 为像素 (x, y) 八邻域的均值, μ_C 为像素 (x, y) 周围环形区像素的均值, α_1 和 α_2 为给定门限。

为说明本文方法的适用性,选择含有机场的 2 幅小场景((a)、(b))和 2 幅大场景((c)、(d)) SAR 图像进行实验,并对文献[7,9,17]的方法进行同样实验,结果见表 1(其中 Y 代表机场 ROI 提取成功, N 代表提取失败)。由于在大场景图像中背景复杂而且机场目标相对较小,目标数据淹没在大量的背景数据中,很难得到最佳的全局阈值,因此文献[9,17]在处理大场景图像时效果较差。另外,由于大

表 1 几种分割方法的比较

Tab.1 Comparison of several segmentation methods

分割方法	小场景图像		大场景图像	
	(a)	(b)	(c)	(d)
文献[17]	Y	Y	N	N
文献[9]	Y	Y	N	N
文献[7]	Y	Y	N	Y
本文	Y	Y	Y	Y

场景图像(c)中含有大面积海域,导致直方图数据整体偏低,因此文献[7]没能有效分割。实验结果表明,本文根据对比度特征设计的自适应阈值方法避免了全局阈值的缺点,也在一定程度上克服了散射定标及背景变化对分割效果的影响,因此具有较强的适用性。

3 ROI 提取

3.1 连通区搜索

图像分割后,目标上的点仍然聚集在一起且相互连通,构成目标的区域轮廓。为了体现目标的连通性可采用连通区搜索算法将其在图像中标记出来。本文设计的搜索算法描述如下:

对给定图像自上而下、从左到右依次扫描,每个像素点 p 所属的连通区只与左、左上、上、右上 4 个点有关(如图 6 所示)。在扫描过程中,若当前点 p 的像素值为 0,则判断点 0,1,2,3 的像素值,根据其取值情况可确定 k 种情况(见表 2, k 以 16 进制表示)。当 k 为 0 时,点 p 为新连通区的开始; k 为 1 时,点 p 与 0 属同一连通区; k 为 2,5,6,9, b, c, e, f 时,点 p 与 1 属同一连通区; k 为 3,8 时,点 p 与 2 属同一连通区; k 为 4,7 时,点 p 与 3 属同一连通区; k 为 a, d 时,点 p 与 2 和 3 中连通区标号最小的点属同一连通区。根据 k 的取值,将点 p 的 label 置为其所属的连通区标号,并修改该连通区的矩形框坐标,使点 p 在框内即可(label 用来记录当前点所属连通

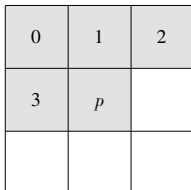


图 6 像素关系

Fig. 6 The relationship of pixels

表 2 p 为黑点时 k 取值情况

Tab.2 Possible values of k when p is a black pixel

	k															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f
0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0
1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
2	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
3	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0

区的标号)。该算法的优点是:只需扫描图像一次便可对所有像素点进行标记,并同时保存各连通区的外界矩形。

最后根据搜索结果中保存的外接矩形坐标即可方便地标记出图像中黑色连通区,再经过裁剪便可得到多个独立的疑似 ROI。

3.2 ROI 筛检

根据先验知识,机场目标具有一定的尺寸,所以为减少后续处理的负担,此时可根据尺寸筛检掉部分虚假的 ROI。筛检规则如下:

$$\begin{aligned} & \text{若 } L_{\min} < L \times \Delta A < L_{\max} \quad \text{且} \\ & W_{\min} < W \times \Delta A < W_{\max} \quad \text{且} \\ & S_{\min} < S = W \times L \times (\Delta A \times \Delta A) < S_{\max} \end{aligned}$$

则 保留 ROI;

否则 剔除。

其中, L, W, S 分别为目标外接矩形的长、宽和面积; $L_{\min}, L_{\max}, W_{\min}, W_{\max}, S_{\min}, S_{\max}$ 分别为目标实际长、宽、面积的最小和最大估计值; ΔA 为图像的分辨率。

4 ROI 辨识

经过上述步骤,图像中仍会存在许多非机场目标的 ROI,如图 7 所示,需要进一步剔除。目前,常

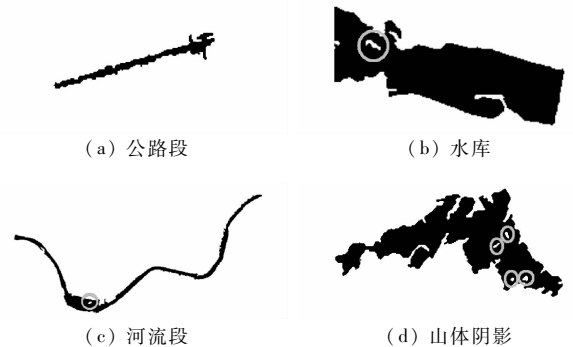


图 7 机场相似地物的拓扑结构

Fig. 7 Topology structure of the objects similar with airport

用的机场 ROI 辨识方法多以直线特征为依据,并以平行性、间距、长度等为判别准则。该方法在处理具有较低分辨率的 ROI 时准确率不高。因此本文提出利用机场的整体特征进行 ROI 辨识。

4.1 特征选择

目前,SAR 目标辨识中常用的特征有:尺寸特征、形状特征和对比度特征。目标的尺寸特征反映了目标外观上的几何大小;形状特征反映了目标在形状上的规则程度;本文对比度特征反映了目标的不同区域由于不同的散射特性呈现出的强度值差异。根据以上 3 类特征,可定义统计量如下:

1) 尺寸特征

机场区域由于跑道及其他附属设施的存在,常具有较大的面积。而且机场跑道一般在 1 000 m 以上,宽在 30 m ~ 60 m 之间,加上多跑道及附属设施的影响,机场区域仍多表现为长条状矩形区,因此可进行如下定义:

$$L = \text{Rect} \rightarrow \text{length}, W = \text{Rect} \rightarrow \text{width}$$

$$S_1 = \text{sum} \{ \text{目标的黑像素个数} \}$$

$$S_2 = \text{sum} \{ \text{目标黑色区内白像素个数} \}$$

其中,Rect 代表目标的最小外接矩形, L, W 分别代表目标的长和宽。

2) 形状特征

机场目标在图像上表现为一个较规则的形状,所以其形状复杂度较低,而其他相似地物的形状复杂度较高。因此可定义形状复杂度特征为

$$C = S_1 / P^2 \quad (5)$$

式中, S_1 为目标黑色区面积, P 为目标黑色区周长。真实目标的形状复杂度较低,因而该特征的计算较高,其他相似物体的复杂度相对较高,因而计算值较低。

3) 对比度特征

对于机场目标而言,由于跑道路面光滑,其后向散射较低,而跑道两侧的草坪区相对粗糙,后向散射较强,因而机场区域会在图像上表现出较强的对比度,可定义为

$$D = S_2 / S_1 \quad (6)$$

以上特征是进行目标辨识的通用特征,可用于机场辨识,但对于快速机场检测问题,存在各自的不足。例如尺寸特征中最小外接矩形的获得需要进行多次旋转和平移,这将消耗大量的计算时间;另外,机场目标的形状特征和对比度特征需要

对大量的像素进行统计,同样不能满足快速处理的要求。因此为达到机场快速辨识的目的,需要寻找更加简单有效的辨识特征。本文从拓扑学观点出发,提出使用拓扑特征作为主要特征进行机场辨识。

4.1.1 拓扑特征

拓扑特征是指图像在没有撕裂和连接的情况下,经拓扑变换(旋转、平移、缩放等)而保持不变的一类特征。这类特征可以有效描绘图像中的面目标(如图 8 所示),不论如何位移、旋转和放缩,图像的连通性和孔洞数都保持不变。

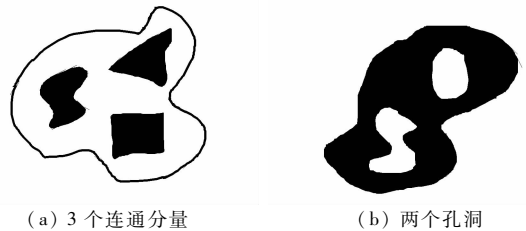


图 8 拓扑特征

Fig. 8 Topology features

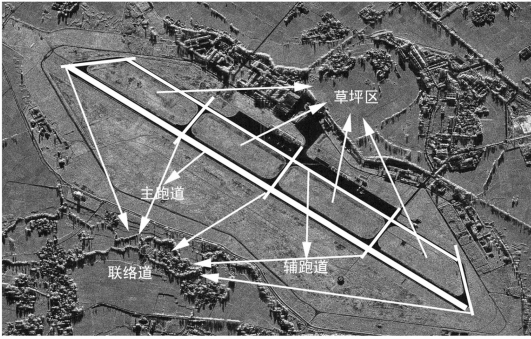
对于二值图像,可利用图像的连通性和孔洞数定义欧拉数为连通分量个数与其孔洞个数之差。用公式表示为

$$E = I - H \quad (7)$$

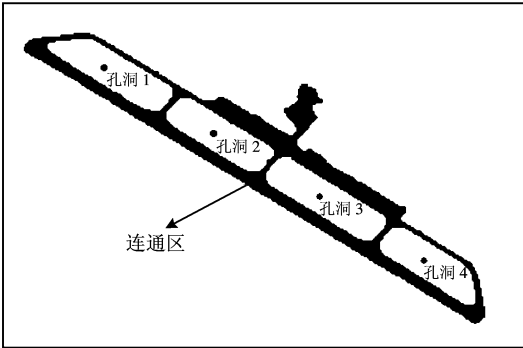
式中, I 代表连通分量数, H 代表孔洞数(孔洞被定义为以前景为边界的背景区域)。图 8 中物体的连通分量数分别为 3, 0, 而孔洞数分别为 0, 2, 按照式(7)计算其欧拉数分别为 3 和 -2。可见,根据欧拉数可以区分具有不同拓扑结构的物体,并且它不随物体的位移、旋转、放缩变化而改变,因此是一种稳定、有效的图像拓扑特征。

4.1.2 机场及其相似地物的拓扑特征分析

常见机场一般由一条较宽的主跑道和一条相对窄的辅跑道组成,主辅跑道之间由联络道连通,在主辅跑道和联络道围成的区域通常是大面积的草坪,如图 9(a) 所示。由于散射特性的不同,这几种区域在 SAR 图像呈现出不同的强度值。主辅跑道和联络道表面光滑,因此散射强度较低,在图像中形成暗色区;草坪区表面与路面相比较粗糙,因此散射强度较高,在图像中形成灰亮色区域。经图像分割后,机场区域会显现出更加明显的拓扑结构。相对机场目标,其相似地物经图像分割后的拓扑结构有着明显的不同,如图 7 所示(各黑色区域代表各物体的连



(a) 机场结构示意图



(b) 分割后的机场结构

图 9 机场的拓扑结构

Fig. 9 Topology structure of airports

通分量,而圈内的白色区域代表各物体内的孔洞)。其区别可总结如下:

- 1) 机场目标常在连通区内有多个孔洞,而非机场目标往往只有少数几个孔洞;
- 2) 机场目标的孔洞面积一般较大,而非机场目标的孔洞一般较小;
- 3) 机场目标的孔洞宽度大多近似相等;而非机场目标的孔洞大小不等、形状各异;
- 4) 机场目标的孔洞沿机场走向分布,而非机场目标的孔洞分布不均,没有规律。

根据以上总结可知,机场目标的欧拉数一般会较小,而非机场目标的欧拉数一般会相对较大,所以欧拉数特征可以有效地用于机场目标辨识。

4.1.3 欧拉数特征改进

虽然欧拉数特征可以用来区分机场及其相似地物,但简单的使用欧拉数并不能适用所有情况,例如图 9 中机场与图 7 中山体阴影的欧拉数相同,不能区分,因此需要对欧拉数特征加以改进。根据总结 2),机场目标中的孔洞一般较大,而非机场目标的孔洞一般较小,因此可以增加以下限制规则

若 面积 $S > T$,则 H 加 1;
否则 H 不变。

其中阈值 T 的选择可根据实际情况确定,一般选为 ROI 区面积的 $1/16 \sim 1/32$ 。增加限制后,对图像 7 和图像 9(b) 中的物体重新计算欧拉数分别得到 1, 1, 1, 1 和 -3。可见限制后的欧拉数特征可以有效地提高机场辨识的准确率。

4.2 特征提取

根据机场 ROI 的特点以及对上述特征统计量的分析,选择 4 个特征进行机场 ROI 辨识,4 个特征分别为

- 1) 尺寸特征 长宽比 $R = L/M$
- 2) 形状特征 形状复杂度 $C = S_1/P^2$
- 3) 对比度特征 对比度 $D = S_2/S_1$
- 4) 拓扑特征 欧拉数 $E = I - H$

4.3 辨识规则

若对图像中的每个 ROI 都提取上述 4 个特征后再进行辨识,将消耗大量计算时间。为了减少计算量,采用二叉决策树作为辨识规则,即在每层分支节点只判断 ROI 的一个特征,而在判断下一个特征时只需判断通过前一层的部分 ROI,具体过程如图 10 所示,其中阈值 $\{E, D, R, C\}$ 经训练取值为 $\{0, 0.5, 10, 0.4\}$ 。

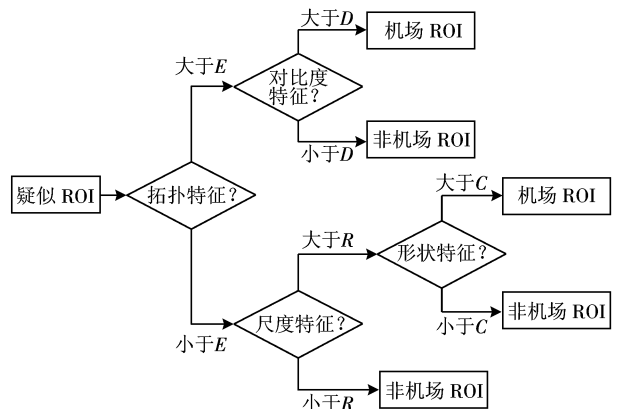
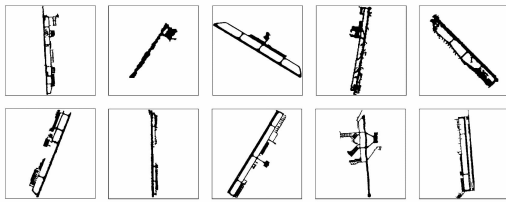


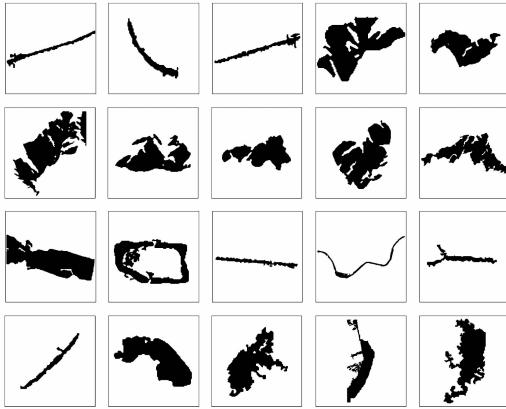
图 10 ROI 辨识规则

Fig. 10 Identification rule of ROIs

选择 10 个机场和 20 个非机场 ROI(如图 11)对传统的直线特征辨识和本文辨识方法进行对比,实验结果如表 3 所示。其中 10 个机场 ROI 包括:2 个单跑道机场,1 个多跑道机场,7 个双跑道机场;20 个非机场 ROI 中包括:4 个公路段,1 个水库,1 人工湖,8 个山体阴影,3 个河流段,3 个其他地物。



(a) 机场 ROI 切片



(b) 非机场 ROI 切片

图 11 机场和非机场 ROI 切片

Fig. 11 The ROI chips of airport and non-airport

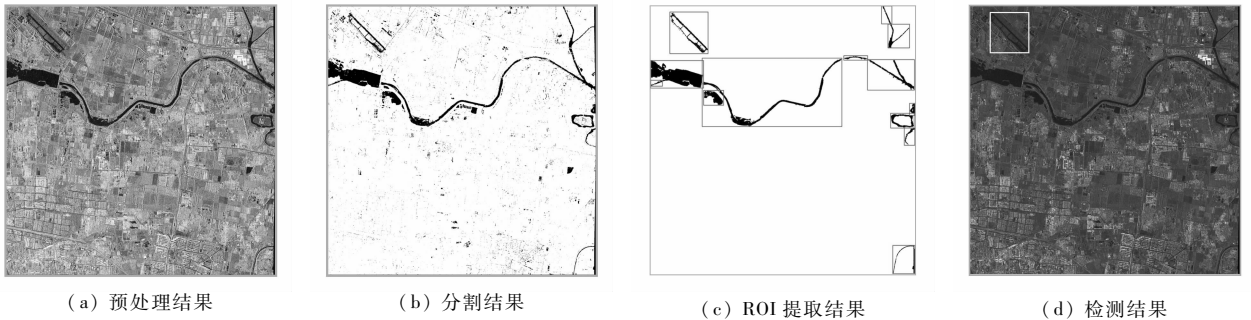


图 12 处理效果实例

Fig. 12 Instance of process results

6 结 论

针对大场景高分辨率 SAR 图像中机场的快速检测问题,采用以机场区域特征为基础的处理方法进行检测,并对其中的图像分割以及机场 ROI 辨识做了有益的研究。实验结果表明,本文设计的图像分割方法具有较强的适用性和较好的处理效果;而对疑似 ROI 辨识的研究大大提高了机场检测的准确率;最终本系统达到了较快的处理速度和较好的检测效果。目前,系统中的不足在于对公路段的辨识还不够准确,这将是下一步研究的重点。

表 3 两种方法辨识结果比较

Tab. 3 Results comparison of tow methods

	机场 ROI 辨识		非机场 ROI 辨识	
	机场个数	正确个数	非机场个数	正确个数
传统方法	10	5	20	16
本文方法	10	10	20	19

5 实验结果

利用 10 幅含有机场目标的整景 SAR 图像对本文方法进行实验,其中包括 8 幅星载图像和 2 幅机载图像。星载图像中包含 1 m 分辨率图像 3 幅、1.25 m 分辨率图像 2 幅、3 m 分辨率图像 3 幅;机载图像中包含 1 m 分辨率图像 1 幅和 0.5 m 分辨率 1 幅。整个系统以 VC6.0 为开发环境,并在双核 CPU1.68GHz、内存 1G 的 PC 机上进行测试。结果表明,10 个机场全部被检测到,伴随虚警目标 1 个,平均处理时间 40.8 s,系统处理效果实例如图 12 所示。

致谢 文中高分辨率机载 SAR 数据由中国电子科技集团公司第三十八研究所提供;星载 TerraSAR 卫星数据由中国科学院对地观测与数字地球科学中心提供;星载 Cosmo Sky-Med 卫星数据由北京同天视地空间技术公司提供,在此表示感谢。

参考文献 (References)

[1] Pasaal Druyts, Wim Mees, Dirk Borglly, et al. Sahara: semi-automatic help for aerial region analysis[C]//Proceedings of the Joint Workshop Sensors and Mapping from Space of the

- International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Germany Hannover: ISPRS, 1997, 17: 267-274.
- [2] Mielh A. Airport detection using a simple model. multi-source images and altimetry information [J]. Proceedings of SPIE, 1998, (2315): 604-615.
- [3] Hevenor. Automated Extraction of Airport Runway Patterns from Radar Imagery: United States Patent, 5335298 [P], 1994-08-02.
- [4] Ye Bin, Peng Jiaxiong. Recognition and understanding of airfield based on the structure feature [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 39 (3): 39-42. [叶斌, 彭嘉雄. 基于结构特征的军用机场识别与理解 [J]. 华中科技大学学报, 2001, 39(3): 39-42.]
- [5] Li Xiaomao, Tang Yandong, Xiao Yingjie. Automatic airport runway recognition based on multi-scale linear object enhancement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34 (6): 733-736. [李小毛, 唐延东, 肖颖杰. 多尺度现状目标的机场跑道识别 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(6): 733-736.]
- [6] Zhu Xianwei, Sun Xiangyi. Method of tracking the runway automatically in infrared image [J]. Optical Technique, 2005, 31(5): 773-775. [朱宪伟, 孙祥一. 红外图像中机场跑道的自动跟踪 [J]. 光学技术, 2005, 31(5): 773-775.]
- [7] Ni Lin, Leng Hongchao. Study on airport change detection [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2002, 17 (4): 185-191. [倪林, 冷洪超. 机场区域变化检测研究 [J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(4): 185-191.]
- [8] Pi Y M, Fan L H, Yang X B. Airport detection and runway recognition in SAR images [C] // IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium. New York: IEEE Press, 2003: 4007-4009.
- [9] Jiang Biaocho, Chen Yingying. Airport extraction of SAR image based on knowledge [J]. Computer Engineering, 2007, 33 (17): 29-30. [江标初, 陈映鹰. 基于知识的 SAR 图像机场目标提取方法 [J]. 计算机工程, 2007, 33(17): 29-30.]
- [10] Zhang Huizhang, Guo Lei. An automatic recognition system aimed on detection runway [J]. Computer Engineering, 2001, 27(12): 77-78. [张会章, 郭雷. 一个机场跑道的自动识别系统 [J]. 计算机工程, 2001, 27(12): 77-78.]
- [11] Liu D H, He L H, Lawrence Carin. Airport detection in large aerial optical imagery [C] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. New York: IEEE Press, 2004: 761-764.
- [12] Ying Long. Runway Detecting from Remote Sensing Image [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. [应龙. 遥感图像中机场跑道检测技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.]
- [13] Yang Shunliao, Lu Ling, Du Zonggang, et al. Automatic recognition of airport runways in SAR images [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2006, 30(1): 56-59. [杨顺辽, 卢凌, 杜宗岗, 等. SAR 图像中机场跑道的自动识别研究 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2006, 30(1): 56-59.]
- [14] Sun Manli. Study on Airport Detection and Battle Damage Recognition [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. [孙曼利. 基于高分辨率图像的机场区域检测和毁伤识别研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.]
- [15] Deng Xiangjin, Peng Hailiang. An airport detection method based on remote sensing imagery [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2002, 16(2): 96-99. [邓湘金, 彭海良. 一种基于遥感图像的机场检测方法 [J]. 测试技术学报, 2002, 16(2): 96-99.]
- [16] Chen Xuguang. Study on Airport Region Recognition in Satellite Remote Sensing Image [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. [陈旭光. 卫星遥感图像中机场区域的识别方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.]
- [17] Yang Weidong, Zuo Zhengrong, Zhang Tianxu. Automatic recognition of airfield runways based on hypothesis testing in SAR images [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2006, 34(2): 11-13. [杨卫东, 左峥嵘, 张天序. 基于假设检验的 SAR 图像机场跑道自动识别 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2): 11-13.]
- [18] Huang Ranxi. Technical Research of Low False Alarm Rate Airport Recognition [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. [黄冉希. 低虚警率机场识别技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.]
- [19] Zhang Tianxu, Cao Yang, Liu Jin, et al. Recognition of airfields in forward looking infrared image sequences by affine moment invariants [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2007, 35(1): 17-19. [张天序, 曹杨, 刘进, 等. 基于不变矩的红外图像机场目标识别 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(1): 17-19.]
- [20] Wu Panlong, Zhang Ke, Li Yanjun. Automatic identification algorithm of airport runway detection based on mathematical morphology [J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31(7): 21-23. [吴盘龙, 张科, 李言俊. 基于数学形态学的机场跑道自动识别方法 [J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(7): 21-23.]
- [21] Xu Gangfeng, Wang Ping, Shen Zhenkang. Recognition of main-runway of airport based on skeleton [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(6): 717-721. [徐刚峰, 王平, 沈振康. 基于骨架特征的机场跑道识别 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(6): 717-721.]