

# 基于模板搜索的高分辨率 SAR 图像机场提取方法

杨浩,张红,王超,张波,张立平

(中国科学院对地观测与数字地球科学中心,北京 100086)

**摘要:**针对高分辨率 SAR 图像机场提取问题,设计了以尺度变换、边缘检测、短线提取、短线连接、平行线提取和验证识别等流程的机场提取方案,并针对机场跑道特点在短线提取和短线连接两个关键步骤上提出了新的算法。直线提取利用了边缘线的结构特征,将边缘曲线看成三种线基元的组合,能从边缘图像中快速拟合出短直线。短线连接提出了一种基于模板搜索的直线连接方法,将短直线连接问题转化为在模板参数空间里搜索峰值的问题。实验表明,本文方法简单快速可行。

**关键词:**SAR 图像;机场提取;直线提取;直线连接

**doi:**10.3969/j.issn.1000-3177.2010.02

**中图分类号:**TP751      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-3177(2010)107-

## 1 引言

SAR 图像的目标检测是国内外普遍关注的研究热点,而机场作为一种大型人造目标,无论是从民用还是军事上来讲,研究其检测和识别都具有重要意义。而随着目前图像分辨率不断提高,从高分辨率 SAR 图像中快速准确地提取出机场成为一个富有挑战性的问题:即如何判断某幅图像是否含有机场以及准确定位机场跑道,进而提取出机场相关信息。

机场跑道是机场存在的最显著标志,它在高分辨率 SAR 图像中有较为明显的特征:一般呈较暗的长矩形形状,且表面灰度连续均匀,与背景相差大,每条跑道的两边缘线构成一对平行线。目前,国内外关于机场跑道检测的方法大致可分为两种:一种是基于数据驱动的自下而上的检测<sup>[1~5]</sup>,另一种是基于知识驱动的自上而下的检测<sup>[6~10]</sup>。前一种方案以机场跑道的直线特征为出发点,先进行边缘检测,然后再通过直线拟合、连接等寻找长直线;后一种方案以机场的区域灰度特征(呈连续均匀的狭长区域)为出发点,先采用各种分割方法对图像进行有利于获得完整机场连通区域的分割,得到二值图像,然后经过轮廓提取<sup>[3]</sup>或细化<sup>[6]</sup>等处理,再提取直线得到跑道。

可以发现,两种方案都涉及到直线的提取和连接,可见如何更好地进行直线的提取和连接是检测机场跑道的关键问题。目前针对该问题,大部分方法最终都转化到利用 Hough 变换提取直线:在分割后的二值图像<sup>[6~9]</sup>或者在边缘提取<sup>[4]</sup>后的边缘图上进行 Hough 变换。低分辨率时,跑道在图像上可视为一条狭长线,Hough 变换可以取得较好的效果,但对于高分辨率 SAR 图像,机场跑道宽度明显,直接采用 Hough 变换不能准确得到跑道,即使是在边缘图上进行 Hough 变换提取直线,由于边缘线为单像素宽度以及极坐标参数离散性的限制,易造成直线的漏检和误检,且随着参数精度的提高计算量大幅增加。

针对上述问题,本文以从复杂场景的高分辨率 SAR 图像中快速准确提取机场为目标,设计了以尺度变换、边缘检测、短线提取、短线筛选、短线连接、平行线提取和验证识别等流程的机场提取方案,在短线提取和短线连接两个重要步骤提出了的新算法。

## 2 机场提取方法

我们先以机场跑道的平行线特征为切入点,再对提取出的结果进行识别验证,进而判断其是否为机场。

收稿日期:2009-02-23      修订日期:2009-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(40601058,40701108,40871191)。

作者简介:杨浩(1983~),男。主要研究方向:SAR 图像处理、目标检测。

E-mail: younghow@163.com

## 2.1 图像尺度变换

根据视觉感知理论,细节越少,抽象出简单特征越容易。本文针对的是高分辨率 SAR 图像,边缘纹理细节丰富,干扰过多,容易淹没直线的整体特性,对识别直线特征不利,而在低分辨率尺度下跑道线直线特征表现更为明显。同时,在低尺度下处理图像将大大减少计算量。所以我们可以处理图像之前,先进行尺度变换以降低图像分辨率。图像尺度变换主要涉及图像的采样技术,本文采用邻域平均法。这样处理同时相当于对 SAR 图像进行了多视处理,去除了斑点噪声。分辨率降低的比例一般以降低后的图像机场跑道的宽度为 10 像素点~20 像素点为宜。此外,若图像质量太差,还需要进行图像平滑滤波等处理。

## 2.2 边缘提取

边缘提取的好坏对后续结果有很重要的影响。SAR 图像不同于光学影像,图像受到强烈相干斑噪声的影响,图像信噪比较低,经典的边缘检测算子(Canny 算子,零交叉算子,拉普拉斯算子等)直接用于 SAR 图像的边缘检测难以取得很理想的效果。考虑到跑道是一种阶跃型边缘的特点,本文采用了近几年涌现出的一种新的边缘检测算法:ROEWA 边缘检测算法<sup>[1]</sup>,它具有 CFAR 特性,并且边缘定位准,虚假边缘少,抗断裂性好等优点,非常适用于检测大型人造目标。

通过 ROEWA 算子检测后得到边缘强度,再经过迟滞门限,非极值抑制,细化等步骤就可得到边缘线。此外,为了除去干扰,减少计算量,我们滤除长度小于一定阈值的线。

## 2.3 短线提取

边缘检测后得到以像素为单位的边缘点只反映图像的局部变化,而直线描述形式简洁,可以反映边缘的整体特性,所以有必要将边缘点连接组织成直线,有利于高层次的处理。常见的直线提取算法有 Hough(或 Radon)变换,相位编组,链码跟踪,启发式搜索等,本文利用边缘线的结构特征,提出一种快速的基于线基元的直线提取方法。

分析上面经过细化后的边缘线,可发现这些线都由三种基本线基元组成:水平线基元,垂直线基元和不确定线基元。如图 1,(a)为最短的水平线基元,(b)为最短的垂直线基元,(c)为不确定线基元。一条短直线可由这三种线基元按照下面的规则组合得到:

①只有相同类型的线基元可以组合在一起。

②相同类型的线基元之间可以由若干个不确定线基元连接。

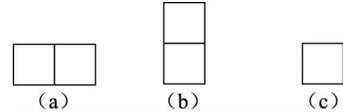


图 1 三种线基元

如图 2 所示线基元组合成一条直线。可以发现,按照这种规则组合成的线只存在两个方向:线基元方向(水平或垂直)和线基元连接方向(对角线方向)。要提取出图像中的短直线,在连接过程中只需要搜索这两个方向。线基元方向和连接方向是在搜索初就确定。

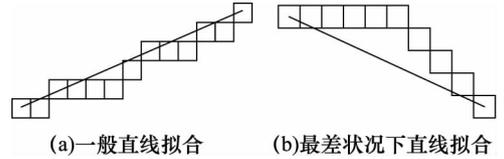


图 2

具体来讲,首先寻找可以作为直线起始点的点,将八邻域周围只存在一个边缘点的边缘点视为起始点。然后从直线起始点开始搜索下一个可连接点,先在线基元方向搜索,然后在连接方向搜索,直到在这两方向上都找不到可连接的点,则完成一条短直线的搜索。这样完成所有短直线的搜索,每一条直线可表示为:

$$seg_i = (x_1, y_1, x_2, y_2, \rho, \theta, l) \quad (1)$$

其中, $seg_i$ 为以 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ 为端点的短线段, $\rho$ 为原点到直线的距离, $\theta$ 为原点到该直线的垂线与 $x$ 轴的夹角, $l$ 为线段长度 $l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ 。记短线段集合为:

$$S = \{seg_1, seg_2, \dots, seg_n\} \quad (2)$$

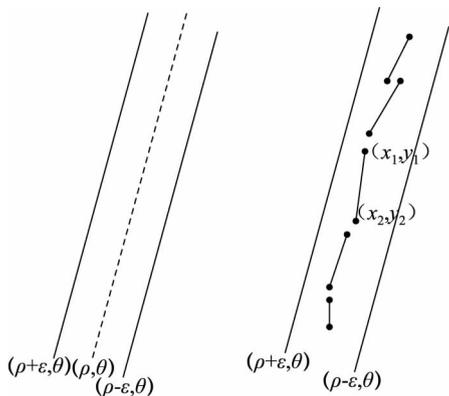
实验表明,大部分情况下,直接连接首尾两点形成的线段就能较好的拟合按这种规则组合成的边缘线。但是有时也会出现图 2(b)所示的情况。此时,比较首末点直线距离 $l$ 和它们的像素长度 $l' = m_1 + \sqrt{2}m_2$ (其中 $m_1$ 为方向为基元方向的像素个数, $m_2$ 为方向为连接方向的像素个数),若 $|l - l'| > \lambda$ ( $\lambda$ 为阈值),将直线从中点处分裂成两条直线。该方法避免了用最小二乘拟合直线的计算,整个算法只是邻域搜索和标记过程,计算内容不多。

## 2.4 短线筛选

由于机场周围场景复杂,经过上述步骤后短直线很多,且错综复杂,如果直接在这样的结果中寻找长直线,不仅计算非常耗时,而且很难得到满意的结

果。我们可以首先粗略估计出跑道的主导方向，滤除非主导方向短线，缩小处理范围。由于每条短线段都记录了极坐标 $(\rho, \theta)$ ，考察所有长度超过一定阈值的短线段，将它们对应的 $\theta$ 值重新量化，量化步长为0.1弧度，得到 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ ，统计 $\theta_i$ 方向出现的短线段的长度的总和，并检测峰值，记此时峰值对应的方向 $\theta_{max}$ 。峰值即意味着 $\theta_{max}$ 方向出现了占主导优势的直线，由于跑道是图像中较占优势的直线，所以跑道方向必然为某个峰值对应的方向。

### 2.5 短线连接



(a) 模板示意图 (b) 落在模板里的短线段

图 3

短直线连接是机场跑道提取的关键一步，也是机场跑道提取的难点。从边缘图提取出短直线段后，还需要将这些短直线连接成更长的直线。这是因为，由于成像时传感器的振动、噪声的影响、周围目标干扰以及前面步骤造成失真等因素，机场跑道边缘形成的长直线会断裂成一些短线段(如图3(b)两平行线之间的短线段)，这些短线段方向基本相同、距离相差不大。所以如何从这些破碎的短线段中恢复出长直线，是这一步要解决的关键问题。一般方法是根据同向性、接近性等共线判断条件进行短线连接<sup>[2,12]</sup>，或者如文献[1]中将线的连接问题转化为极坐标空间点的聚类分析问题。但前者对于复杂的线段，共线判断条件以及可连接性的度量难以确定，且容易造成误连接，后者要构造相似性测度函数，算法设计复杂，实现难度较大。本文提出了一种基于模板搜索的直线连接算法。

构造一个由如图3(a)的两条平行直线组成的具有一定宽度和方向的模板。经过前面的步骤，一些方向大致相同的短线段可以落在某一方向的模板内，如图3(b)。当模板宽度足够小时，我们有理由认为落在该模板内的短线段由一条长直线断裂而成，即可以连接成一条长直线，用 $(\rho, \theta)$ 来表示连接

成的直线。由于机场跑道边线是图像中比较占优势的直线，所以在图像空间中旋转和平移模板，当模板包含的短线段的总长度为峰值时，则该模板对应的长直线很有可能为跑道边线。

Hough变换是图像处理上用来识别一些图像特征的技术，它的基本思想是利用点线的对偶性，图像空间中共线的点对应在参数空间里相交的线，它的变换方程为：

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (3)$$

其中 $\rho$ 为图像空间某点(该点对应于新参数空间坐标原点)到直线的距离， $\theta$ 为图像空间此点到直线的垂线与 $x$ 轴的夹角。图像空间 $(x, y)$ 中一条直线对应着参数空间 $(\rho, \theta)$ 中的一点。所以模板的两条平行直线可以表示为 $(\rho + \epsilon, \theta)$ 和 $(\rho - \epsilon, \theta)$ 两点， $(\rho, \theta)$ 对应着两直线的中间线如图3(a)中的虚线， $2\epsilon$ 为模板的宽度，当宽度固定时，一个模板就可用 $(\rho, \theta)$ 来表示。

这样在图像空间中平移和旋转模板对应着在参数空间 $(\rho, \theta)$ 里变化。本文将短线段连接成长直线的问题转化为在模板空间 $(\rho, \theta)$ 里搜索峰值的问题。

这里涉及到判断线段是否在模板内的问题。对于某一条短线段，不难发现，若两 endpoints  $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ 都在某一模板 $(\rho_0, \theta_0)$ 内，则此短线段落在模板内。而对于某点 $(x, y)$ ，考虑 $\rho' = x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0$ ，则 $(\rho', \theta_0)$ 表示一条方向为 $\theta_0$ ，过点 $(x, y)$ 的直线，若 $|\rho' - \rho_0| \leq \epsilon$ ，则该直线在 $(\rho_0, \theta_0)$ 模板内，也即点 $(x, y)$ 在模板内。所以通过这样的方法，可以依次判断出图像中所有短线段是否在某一模板内。

本文首先用该方法确定跑道方向，取模板宽度稍大于跑道宽度，在模板空间里搜索最大值，由于跑道构成的一对平行线必然在边缘图中占优，则此时最大值对应方向可认为是主跑道方向。然后再在该方向搜索单直线，此时取模板宽度为较小值，在模板空间搜索 $n$ 个最大值可找出 $n$ 条平行的直线，统计得到的每条直线的累积长度，长度近似相等的两条平行线构成候选跑道边线。

### 2.6 验证识别

上述仅利用了跑道的平行线特征，为了进一步与跑道类似的高速公路、河流等其他虚警区分开来，我们还利用机场的其他特征进行验证识别：尺寸特征、跑道的灰度连续性、主辅跑道平行特征、联络道等特征。

尺寸特征：机场跑道长度一般在1km~5km之间，宽度在30m~60m之间。找出的两条平行线之

间取一点作为种子点,进行区域生长,将其结果向平行直线投影,可得到跑道长度  $L$ ,两条直线的  $\rho$  值之差即为宽度  $W$ 。则要求满足:

$$\begin{cases} L_{min} < L \times r < L_{max} \\ W_{min} < W \times r < W_{max} \end{cases} \quad (4)$$

其中  $L_{min}$ 、 $L_{max}$ 、 $W_{min}$ 、 $W_{max}$  分别为跑道实际长、宽; $r$  为图像的分辨率。

灰度连续性特征:统计两条平行线所夹的区域,若此区域 90% 的点灰度值大致相同,且小于一个较小的阈值,与背景灰度差别较大,则其很可能为跑道。

辅跑道和联络道:若能检测到其他与主跑道平行的跑道,且在两条跑道之间还能检测到联络道,则进一步证明此区域是机场。联络道可以描述为:联络道为一区域,区域内任意一点同时满足:

- ①与区域内其他点连通;
- ②与跑道 1 区域连通;
- ③与跑道 2 区域连通。

据此,我们先获得通过区域生长得到的机场连通区域,则两条跑道之间的存在的连通区域可认为是联络道,对该区域像素进行聚类分析,可得到联络道数目,联络道数目应不小于 2。

尺寸特征置信度为  $C_a$ ,满足时为 1,否则为 0.5,灰度连续性特征置信度为  $C_b$ ,满足时为 1,否则为 0.6,联络道特征置信度为  $C_c$ ,满足条件时为 1,否则 0.8。总置信度  $C = C_a C_b C_c > C_0$  时判定为所提取的为跑道, $C_0$  为总置信度阈值。

### 3 实验结果与对比分析

本文在 1G 内存,2.2G 主频,Matlab 平台下,对 7 幅含有机场目标,5 幅含疑似机场目标的高分辨率 SAR 图像进行了实验。结果 5 幅含疑似机场目标的图像皆被判别为非机场图像,7 幅含机场目标图像被正确判别,并被提取出了跑道位置、方向、长宽等信息。图 4 为其中一幅图像各个步骤的提取结果图。表 1 为 7 幅机场影像信息、各步骤处理时间和比较算法的计算时间,表 2 为 7 幅机场影像主跑道提取结果,其中跑道方向和位置用极坐标表示,实际长度和宽度为 Google Earth 上量得。可以看到,本提取出跑道长宽与实际长宽相差不大,跑道位置和方向也比较准确。

此外,对于短线提取步骤,本文算法与相位编组进行了对比实验,所用时间如表 1,可以看到相位编组时间是本文算法的 3 倍以上,而且这还不包括相位编组之前计算边缘方向的时间,因为 ROEWA 不

能得到边缘方向,必须首先得到边缘方向(本文采用 Gabor 滤波器计算)。

在短线连接时,本文算法只需判断短线的两个端点,计算量大幅减少,相比文献[1],不用进行复杂的相似性测度计算,简单易行,相比文献[2,12],不需要进行复杂的共线性判断。另外,为了与传统的 Hough 变换提取机场跑道对比,图 4(e)给出了边缘提取后再进行 Hough 变换提取的结果,量化精度为  $\Delta\rho=1$ , $\Delta\theta=1^\circ$ ,可以看到跑道直线漏检。同时表 1 亦给出了 Hough 变换提取直线的的时间,本文短线提取和短线连接两步时间之和作为对比,对 7 幅图像皆为 Hough 变换提取时间的一半以下。

所以从时间和效果上来看,本文的机场提取方案快速可行。

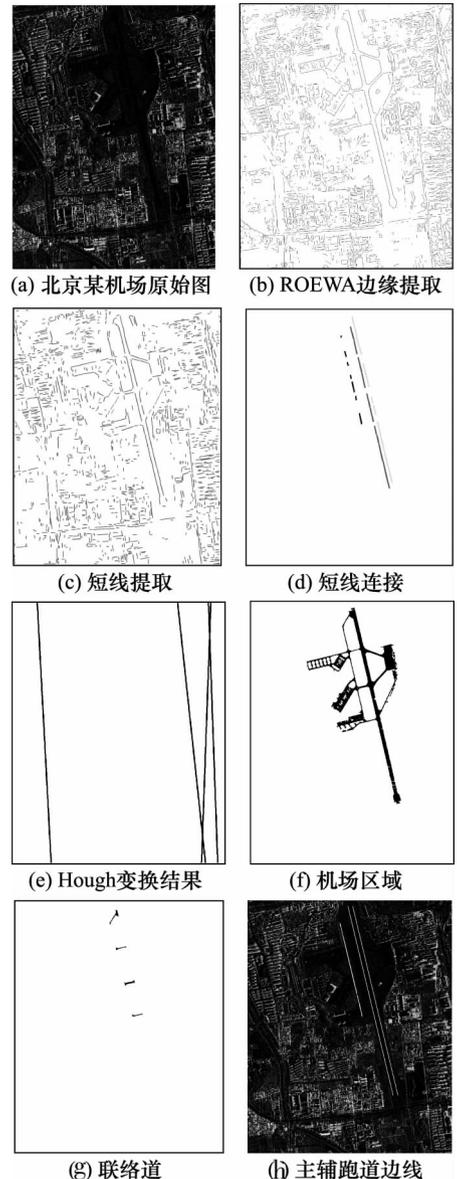


图 4 机场跑道提取结果图

表 1 7 幅机场图像处理时间结果

编号	图像大小/像素	采样间隔/m	本文边缘检测/s	本文短线提取/s	本文短线连接/s	Gabor 求边缘方向/s	相位编组/s	Hough 变换提取直线/s
1	3533×4432	0.75	1.8	1.4	0.7	31.0	6.2	7.2
2	2696×3444	1.25	2.9	1.9	0.6	57.9	9.0	10.4
3	6583×4859	0.5	2.5	1.4	0.3	40.9	7.2	5.8
4	954×3290	1.25	0.6	0.5	0.3	8.7	1.7	1.6
5	2471×2246	1.25	1.0	0.6	0.2	15.8	2.9	2.7
6	437×1398	2.5	0.3	0.3	0.2	4.7	1.0	0.8
7	1965×4035	1.25	1.3	1.0	0.5	22.6	4.4	5.5

表 2 7 幅机场跑道提取结果

编号	主跑道方向/弧度	跑道边线 1 位置/像素	跑道边线 2 位置/像素	跑道长度/m	实际长度/m	跑道宽度/m	实际宽度/m
1	-1.34	-419.1	-435.6	2561.7	2500	49.5	50
2	-1.50	-368.9	-386.9	2540.3	2500	56.2	50
3	-0.54	105.7	89.2	2451.3	2300	41.3	60
4	-1.52	-64.4	-75.4	3203.8	3230	45.8	60
5	-0.60	71.4	82.4	2283.3	2000	45.8	60
6	1.40	184.6	173.6	3346.0	3300	55	60
7	1.46	283.9	294.9	3300.4	3230	45.8	60

#### 4 结束语

本文设计了以尺度变换、边缘检测、短线提取、短线筛选、短线连接、平行线提取和验证识别等流程的机场提取方案,对其中短线提取和短线连接两个重要步骤提出了改进,在验证识别中采用置信度综合多个特征进行判别。其中短线提取充分利用边缘线自身的结构信息,将边缘曲线看成三种线基元的组合,相同的线基元才能构成直线,从而可以很容易搜索出直线,避免了最小二乘拟合计算,而且弥补了 ROEWA 算子不能准确确定方向的缺陷。本文的短线连接将模板搜索与 Hough 变换结合起来,从而

形成一种 Hough 变换的全新应用,它不需要像传统 Hough 变换遍历图像中所有像素,只需判断短线段的端点,搜索空间大幅缩小,从而导致计算量大幅减小。而且它克服了以前 Hough 变换不能得到直线端点的问题,不但能得到跑道的位置信息,还对成像质量不佳的跑道图像有很强的“纠错”能力,即使跑道扭曲变形严重,本文方法亦能很好的恢复出跑道边线。总之,本文提出了一个快速可行的机场提取方案。但在验证识别处,置信度的多个参数为经验设定,自动性有待进一步提高,而且还有必要进一步挖掘机场的其他特征来更加有效的进行判别,这些将成为以后需要完成的工作。

#### 参考文献

- 1 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.
- 2 J. W. Han, et al. . A method of automatic finding airport runways in aerial images[A]. ICPR[C]. 2002:731~734.
- 3 鲍复民,等. 合成孔径雷达图像中机场跑道的自动识别[J]. 西安交通大学学报,2004,38(2):1243~1246.
- 4 何勇,徐新,孙洪,等. 机载 SAR 图像中机场跑道的检测[J]. 武汉大学学报,2004,50(3):393~396.
- 5 罗军,杨卫平,沈振康. 红外图像机场跑道的自动识别[J]. 红外技术,2003,25(3):13~17.
- 6 Qiu-Ting Wang, Ye Bin. A recognizing and understanding method of military airfield image based on geometric structure [A]. ICWAPR[C]. 2007:1241~1245.

- 7 甘博,等. 统计的 Hough 变换在机场遥感图像分割中的应用[J]. 计算机工程,2002,28(8):264~265.
- 8 Finch I,et al. . Identification of airfield runways in synthetic aperture radar images[A]. ICPR[C]. 1998:1633~1636.
- 9 D. H. Liu,et al. . Airport detection in large aerial optical imagery[A]. ICASSP[C]. 2004:761~764.
- 10 李小毛,等. 多尺度线状目标的机场跑道识别[J]. 红外与激光工程,2005,34(6):733~736.
- 11 赵凌君,等. SAR 图像边缘检测方法综述[J]. 中国图像图形学报,2007,12(12):2042~2049.
- 12 应龙,等. 高分辨率遥感图像中机场跑道快速检测方法[J]. 小型微型计算机系统,2006,27(2):282~286.
- 13 肖志坚,等. 基于结构特征的遥感图像机场目标识别[J]. 红外与激光工程,2005,34(3):314~318.
- 14 杨卫东,等. 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,2006,34(2):11~13.
- 15 刘葱葱,桑农,曹治国,张天序. 基于上下文的机场目标识别方法[J]. 红外与激光工程,2004,33(1):67~70.

## A Method of Airport Extraction Based on Template Searching from High Resolution SAR Image

YANG Hao,ZHANG Hong,WANG Chao,ZHANG Bo,ZHANG Liping

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

**Abstract:** Aiming at airport extraction from high resolution SAR image, we design an airport extraction scheme based on scale transformation, edge detection, line extraction, line connection, parallel lines extraction and recognition etc. , and present new algorithm in two key steps: line extraction and line connection. Firstly, in line extraction step, we make use of edge structure feature and view curves as a composition of three types of line primitive, so lines can be fit fast from edge map. Then in line connection step, a method based on template searching is put forward, it transfers the problem of line connection to the problem of searching peak in template space. Experiments show that the method is simple, rapid and feasible.

**Key words:** SAR image; airport extraction; line extraction; line connection