

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201304035  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20130929.1120.008.html>

# 一种频域特征的飞机目标提取方法

尹辉,谷峰

(中国人民解放军空军航空大学 航空航天情报系,吉林 长春 130022)

**摘 要:**针对军事遥感影像智能判读的目标定位与提取问题,将先验知识引入到目标提取过程中,提出一种基于频域特征的飞机目标提取方法.该方法通过绘制目标圆周剖面线将二维图像信号简化为一维信号,运用频谱能量的谐波叠置原理对飞机形状进行频谱分析,确定目标轮廓的固有频率;然后设计多尺度的 Gabor 滤波器组提取图像的纹理特征图,并进行特征图融合形成目标显著图;最后利用数学形态学的方法对目标显著图进行处理,得到最终的目标提取结果.实验结果表明,与基于无先验知识的视觉显著性目标检测方法相比,该方法抗干扰能力强,能够清楚、准确、完整地提取目标区域,是一种有效的飞机目标提取方法.

**关键词:**频域特征;飞机;目标提取;频谱分析;Gabor 滤波器组;显著图

**中图分类号:**TP753   **文献标志码:**A   **文章编号:**1673-4785(2013)05-0459-06

中文引用格式:尹辉,谷峰.一种频域特征的飞机目标提取方法[J]. 智能系统学报, 2013, 8(5): 459-464.  
英文引用格式:YIN Hui, GU Feng. A method of extracting aircraft target based on the frequency domain feature[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(5): 459-464.

## A method of extracting aircraft target based on the frequency domain feature

YIN Hui, GU Feng

(Department of Aviation and Spaceflight Intelligence, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Focusing on the positioning and extraction of the intelligent interpretation in the military remote sensing image, prior knowledge is introduced into the target extraction process, so as to propose an aircraft target extraction method based on the frequency domain feature. In this method, by drafting the target circumference profile, the two-dimensional image signal is simplified into the one-dimensional signal, the harmonic superposition principle on the energy of frequency spectrum is applied to frequency spectrum analysis of aircraft shape, so as to determine the natural frequency of the target outline; then, by the design of multi-scale Gabor filter banks, the texture feature diagram on the image is extracted, and by combination of feature diagrams, a target salient image is formed; finally, the method of mathematical morphology is used to process the target salient image, obtaining the final target extraction result. The experimental results show that, in comparison with the visual saliency target detection method without prior knowledge, the method has powerful anti-disturbance ability, it may extract the target domain clearly, accurately and completely, and it is a kind of effective aircraft target extraction method.

**Keywords:** frequency domain feature; aircraft; target extraction; frequency spectrum analysis; Gabor filter banks; salient image

在军事遥感影像智能解译领域中,飞机作为一类重要的目标受到广泛的关注,并一直都被研究和探索,而这方面成型的资料较少,外军的研制情况均是保密资料.公开的资料中目标检测方法可以分为基于特征的方法<sup>[1-2]</sup>、基于模板的方法<sup>[3]</sup>和基于表观的方法<sup>[4]</sup>.基于特征的方法尝试寻找区分性的图像特征,然后在合理的几何布局上验证这些特征是否存在,这类方法简单,容易实现,但特征的选取需要加入一定的先验知识.基于模板的方法能够处理形状和视角较大范围的变化,但对模板要求较高,计算复杂不适合实时检测.基于表观的方法通过扫描图像中有重叠的小矩形区域来寻找候选区域,然后用一组具有选择性的检测算法来标定目标,这类方

收稿日期:2013-04-15. 网络出版日期:2013-09-29.  
通信作者:尹辉. E-mail: image\_recognition@ 163.com.

法依赖于样本的选取与分类器的性能.国内现有的飞机检测方法主要有基于角点检测的自适应核聚类方法<sup>[5]</sup>、主动形状模型法<sup>[6]</sup>以及圆周频率滤波法<sup>[7]</sup>.基于角点检测的自适应核聚类法,采用方向导数检测角点,将有效性函数引入核聚类中,可动态估计聚类数目,并根据聚类结果实现飞机目标的定位.该方法无需进行区域或轮廓的提取,但是当多个飞机距离很近、并排存在时,无法对角点实现正确的聚类.主动形状模型则是采用统计分析的方法建立目标形状及其形变模型,在图像中迭代搜索,使先验形状上的标记点逐步拟合到物体的实际边缘上,最终准确分割出目标物体.但该模型对飞机分割初始点的位置选取很敏感,迭代时间比较长,不利于工程上实时性的处理.基于圆周滤波法不需要进行图像分割或边缘提取,利用飞机形状和灰度变化特征,设计滤波器的算法简单、计算量小;但是遥感图像背景复杂,圆周半径的选择需要人为确定,且抗噪声能力差,单一半径无法检测出不同大小的飞机.总结现有目标检测的方法,发现通常基于滤波的方法效果更好,关键在于能否寻找到合适的滤波器.而 Gabor 滤波器

组不仅具有多尺度特性,而且还具有一般小波滤波器所不具备的良好方向特性,不仅如此,Gabor 滤波器对局部细节信息的捕捉能力也非常出色,已被广泛应用于人脸检测<sup>[8]</sup>、遥感地物目标识别等领域<sup>[9-10]</sup>.

高分辨率遥感图像中飞机目标检测往往比识别更加棘手,用来检测飞机的特征主要有形状特征、灰度特征、角点特征等.本文的创新在于通过分析飞机的形状得出频域特征,并将其作为 Gabor 滤波器的中心频率,实现了飞机目标的检测.这种方法的突出优势在于综合考虑了飞机的形状、光谱、纹理特征,降低了背景的干扰,增强了目标的视觉显著性,实现了遥感图像飞机目标特征的简洁有效描述,通过绘制圆周剖面线的方法将对二维图像信号的研究简化为一维信号研究.

### 1 飞机目标的频域特征提取

本文提出的飞机目标提取方法流程如图 1 所示,主要分为三大部分.

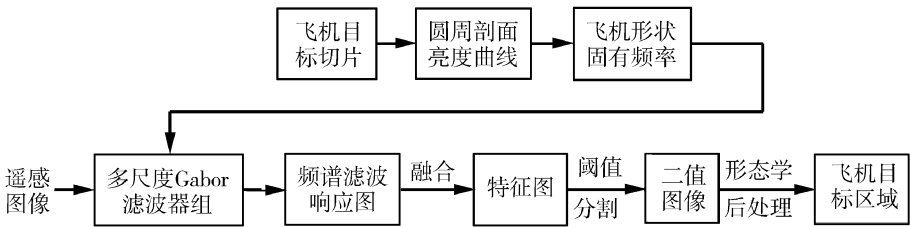


图 1 本算法流程  
Fig.1 The flowchart of the method proposed in this paper

1) 频域特征的分析.为了提取频域特征,首先分析飞机目标样本的形状特征,通过绘制经过飞机的机身、机翼的圆周剖面曲线(通常来讲,飞机目标的亮度值要高于背景,这样曲线会形成波峰与波谷交替出现的形状),利用谐波叠置原理,分析曲线的频谱特性,得到飞机形状的固有频率,将此频率作为飞机的频域特征.

2) 滤波器的设计.设计多通道 Gabor 滤波器组的目的是提取频域特征,Gabor 滤波器有很强的纹理区分能力,能很好地捕捉目标与背景之间的纹理变化,更重要的是它有频率选择性,可实现频域特征筛选.本文将飞机的频域特征 $f$ 作为 Gabor 滤波器的中心频率输入,对图像滤波使飞机目标与背景更容易区分,便于后续的目标边缘提取.

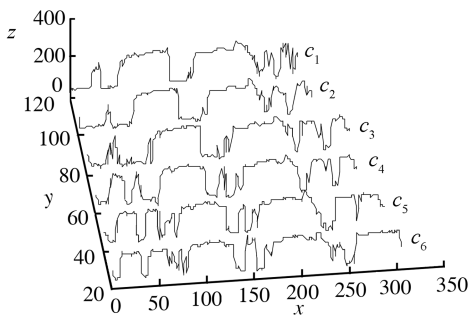
3) 形态学后处理.算法流程中还进行了滤波响应特征图的融合,以达到进一步增强目标区域的目的

的,但同时也少量地增加了噪声的干扰,因此最后采用了简单的形态学后处理去除噪声,以达到精细化检测的目的.

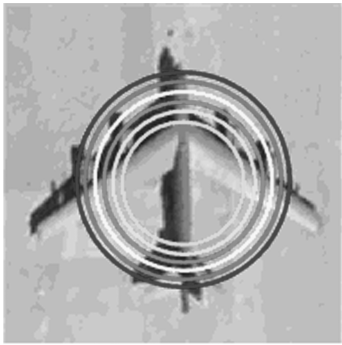
#### 1.1 飞机圆周剖面亮度响应曲线绘制

圆周剖面线是以飞机目标的质心为圆心,以质心到机身远端距离的一半为半径.这样做的目的是使算法具有抗旋转性,无论飞机目标的朝向如何变化,在提取地物剖面线之后,角度的旋转将转化为曲线的平移量.如图 2 所示,当在飞机目标的切片上提取圆周剖面亮度曲线时, $x$  轴表示像元位置, $y$  轴标记曲线数, $z$  轴为像元亮度值.剖面线揭示了图像剖面方向上像元亮度值的变化模式,它能直观形象地反映目标的形态特征及其复杂程度.如果对飞机目标绘制若干条同心的圆周剖面线,则可以获取剖面线方向上稳定的形态特征.由于噪声和阴影的影响,剖面亮度响应曲线虽然表现为高低不一的波动,但

是它们的波峰、波谷的出现均呈现相对一致的趋势,而这些波峰和波谷可以认为是飞机的特征点.



(a) 目标圆周剖面亮度曲线



(b) 目标图像及圆周剖面线

图 2 圆周剖面亮度曲线

Fig.2 Circular section intensity curve

1.2 飞机剖面亮度响应曲线频谱分析

如图 2 所示,图 2(a) 为目标圆周剖面亮度响应曲线,其中  $c_1 \sim c_6$  分别对应图 2(b) 中由里向外的圆周.以最大的圆周剖面亮度响应曲线  $c_6$  为例,首先对圆周剖面亮度响应曲线进行傅里叶变换,为了获取不同频率的剖面亮度响应曲线的波动分布规律,这里借助剖面亮度响应曲线  $y_t$  的谐波模型,将其频谱能量表示成随频谱能量中心距离变化的  $k$  次谐波能量的叠加:

$$y_t = a_0 + \sum_{k=1}^p (a_k \cos(\omega_k t) + b_k \sin(\omega_k t)). \quad (1)$$

通过一维傅里叶变换可以得到  $k$  次谐波的傅里叶系数:

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cos \frac{2\pi k}{n} (t-1),$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \sin \frac{2\pi k}{n} (t-1),$$

$$a_0 = \bar{y}_t.$$

第  $k$  项对应的空间频率为

$$f_k = \frac{k}{n\Delta t}.$$

令  $\Delta t=1$ ,则  $f_k=k/n$ .而经傅里叶变换后,能量谱是呈

中心对称的.当亮度响应序列点  $n$  为偶数时,谐波的个数  $p=n/2$ ;  $n$  为奇数时,  $p=(n-1)/2$ .因此,  $f_k$  的取值范围为  $0 \sim 0.5$ ,  $0.5$  对应的频率称为奈奎斯特频率.而不同谐波  $k$  所对应的频谱能量为

$$E_k = a_k^2 + b_k^2.$$

不同频率的频谱能量可以反映在该频率时剖面线变化的响应特征.因此,问题研究的关键就是如何找出影像剖面线波动所对应的主要频率,从而揭示信号内部频率结构,给出序列中包含的各次谐波和波动贡献的完整描述.设空域中表征地物剖面的亮度响应序列的总方差为  $S$ ,把式(1)看作一个回归方程,则有

$$S = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y}_t)^2 = \sum_{k=1}^p \frac{1}{2} E_k. \quad (2)$$

由此可见,空域中的亮度响应序列的总方差可以表示为频域中各次谐波能量的贡献之和,  $E_k/2$  是  $k$  次谐波对应方差的贡献.根据傅里叶变换对剖面线亮度响应序列计算能量谱,能量谱图可以显示不同频率波动的幅值大小,也就是谐波方差贡献的大小.因此,可以从频谱曲线中的峰值点判定剖面线的主要频率或周期:峰值越高,频谱能量值越大,从而对剖面线的整体影响也越大,其部分峰值如表 1 所示.

表 1 频谱能量降序排序(前 20 个)

Table 1 Spectrum energy in descending order ( top 20 )			
频率	能量	频率	能量
0	2.592E+09	13	1.420E+06
3	2.057E+07	20	1.345E+06
4	1.246E+07	21	1.018E+06
10	8.624E+06	6	1.010E+06
9	6.274E+06	1	8.782E+05
5	6.118E+06	15	7.030E+05
16	4.331E+06	8	7.020E+05
12	3.733E+06	19	4.942E+05
7	3.020E+06	18	4.592E+05
14	3.019E+06	11	3.942E+05

由此构造统计量:

$$F_k = \frac{0.5E_k/2}{\frac{S - E_k/2}{n - 2 - 1}} \sim F(2, n - 2 - 1) \quad (3)$$

作为检验第  $k$  次谐波显著性的度量指标.这里,统计量  $F_k$  服从分子自由度为 2、分母自由度为  $n-2-1$  的  $F$  分布.当  $k$  次谐波的  $F_k$  值大于  $F_\alpha$  时(  $\alpha$  为某一显著性水平),则可认为波动是显著的,此时第  $k$  次谐



波所对应的频率就是剖面亮度响应曲线主体轮廓特征的中心频率。

从表 1 和表 2 可以发现,利用不同谐波上频谱能量的大小来表征地物剖面线的特征,不但可以显示出地物波形的频率成分组成,而且还可以反映不同频率的成分在地物剖面线的波动中所占的比重,从而很好地揭示各个频率成分对地物特征的影响程度.如图 3 频谱能量分布图所示,除了直流中心(为了显示方便,频率为 1 时对应直流分量)以外,当  $k=3$  时,频率能量  $E_k$  达到最大值.另外,当谐波次数分别为 3、7、10、12、14、16 以及 20 附近时,能量谱曲线均出现不同程度的峰值,并且距离频谱中心越来越远,频谱峰值也越来越小.然而,这些峰值是否一定是剖面线隐含周期对应的频率,还需要进行显著性检验.因为即使不含任何谐波分量的信号,也会由于采样引起的频谱能量波动而出现“伪峰”.由式(2)、(3)可以求得上述剖面亮度响应序列的总方差、不同谐波  $k$  的方差贡献及其统计检验量  $F_k$ ,具体计算结果如表 2 所示.因此通过设计中心频率为 0.01 周/像元的多尺度 Gabor 滤波器组,就可以增强图像中飞机目标.Gabor 滤波器相比其他滤波器具有频率选择性,可实现频域特征筛选.实验中将飞机的频域特征  $f$  作为 Gabor 滤波器的中心频率输入.

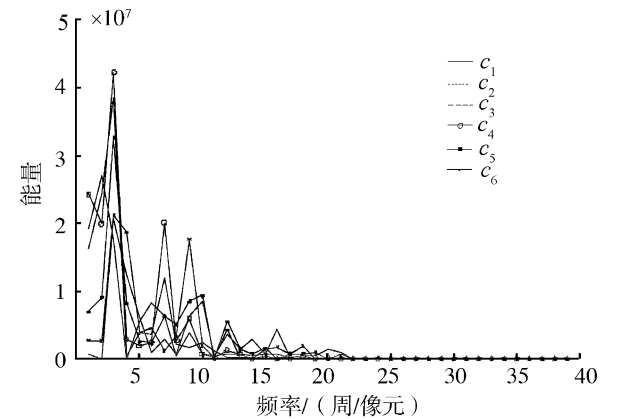


图 3 剖面亮度曲线频谱能量分布

Fig.3 Spectrum energy distribution of section intensity curve

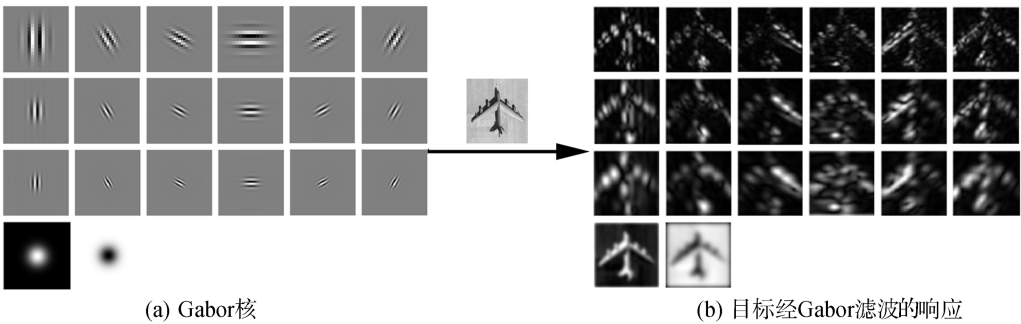


图 4 Gabor 核以及频率滤波响应

Fig.4 Gabor kernel and filter frequency response

表 2 飞机目标圆周剖面亮度曲线谐波分析结果  
Table 2 Circular section intensity curve of the harmonic analysis results

谐波峰值点/ 谱半径	频率/ (周/像元)	方差 贡献率/%	累计 贡献率/%	统计检 验值 $F_k$
3	0.010	26.352	26.352	54.387
7	0.023	3.870	30.222	6.119
10	0.033	11.049	41.271	18.881
12	0.039	4.783	46.054	7.636
14	0.046	3.868	49.922	6.117
16	0.052	5.549	55.471	8.931
20	0.065	1.723	57.194	2.666

2 基于 Gabor 滤波器组的频域特征提取

Daugman 将一维 Gabor 函数推广到二维空间,得到二维 Gabor 函数:

$$g(x,y)=\frac{1}{2\pi^2\sigma_x\sigma_y}e^{-\frac{1}{2}[(\frac{x}{\sigma_x})^2+(\frac{y}{\sigma_y})^2]+j(u_0x+v_0y)}. \quad (4)$$

式中:  $(u_0,v_0)$  为滤波器的中心频率,中心频率越小,提取的纹理特征尺度越大;  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  分别为滤波器在  $x$  和  $y$  方向上的径长,它们共同确定了滤波器的径向角度  $\theta$ . Gabor 滤波器的实部为偶对称滤波器,虚部为奇对称滤波器. Gabor 滤波器的性能主要由 5 个参数  $u_0$ 、 $v_0$ 、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\theta$  确定,设计 Gabor 滤波器的主要任务就是确定这些参数. Gabor 滤波器组的非正交性意味着经滤波后的图像中有冗余信息. 为了尽可能地检测所有方向和所有频率的特性,滤波器组必须均匀覆盖矩形的频谱平面. 由于 Gabor 滤波器的对称性,这些滤波器表现为围绕原点对称的高斯函数,它们的长宽比率控制了方向选择性,因此它们的长宽比、相互间隔和所有方向数,共同保证了对二维频谱的均匀覆盖. 实验过程中发现,滤波器方向间隔设为  $30^\circ$  时,可以用最少的滤波器均匀覆盖频率平面,因此这里的滤波器采用 6 个方向,分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$ . 选取 3 个尺度 Gabor 滤波器,滤波器核的实部如图 4(a) 所示,输入图像与 Gabor 滤波器核函数作卷积将在与其振荡方向垂直的边缘产生强烈的响应,滤波结果如图 4(b) 所示. 也就是说 Gabor 核函数能检测输入图像中一些具有相应方向的局部特征,这些局部特征构成了输入图像对亮度、姿态变化不太敏感的特征表示.

3 实验与分析

实验选取一幅卫星遥感图像验证本文提出算法的有效性,首先以中心频率为0.01周/像元、3个尺度(大小为3、5、7)、6个方向(0°、30°、60°、90°、120°、150°)的多尺度 Gabor 组对图像进行滤波,将 Gabor 滤波后的 18 幅特征图进行幅值叠加,如图 5(b)所示.从图 5(b)中可以看出,经过 Gabor 滤波后飞机目标亮度较高,说明前面分析得到的飞机中心频率是有效的,但同时该特征图中有很强的噪声,这是因为 Gabor 滤波器可以提取局部纹理信息,并且 6 个方向的滤波叠加后会增强部分噪声.Gabor 滤波后的

图像如图 5(c)所示,可以发现图中飞机目标整体区域明显,且噪声干扰小.因此为了更准确地将飞机目标从背景中分割出来,将 2 幅特征图 5(b)、5(c)进行融合.通过阈值分割方法将图像 5(b)转变为二值图像,然后将图 5(b)和图 5(c)对应位置的幅值相乘进行融合,与图 5(b)相比,图 5(d)中飞机目标区域比较完整,噪声得到有效的抑制.最后利用数学形态学的方法进行去噪、平滑等相关后处理操作,提取结果如图 5(f)所示,通过 canny 边缘提取得到飞机目标区域(如图 5(g)),同时将目标提取结果标注在原图像 5(h)上.

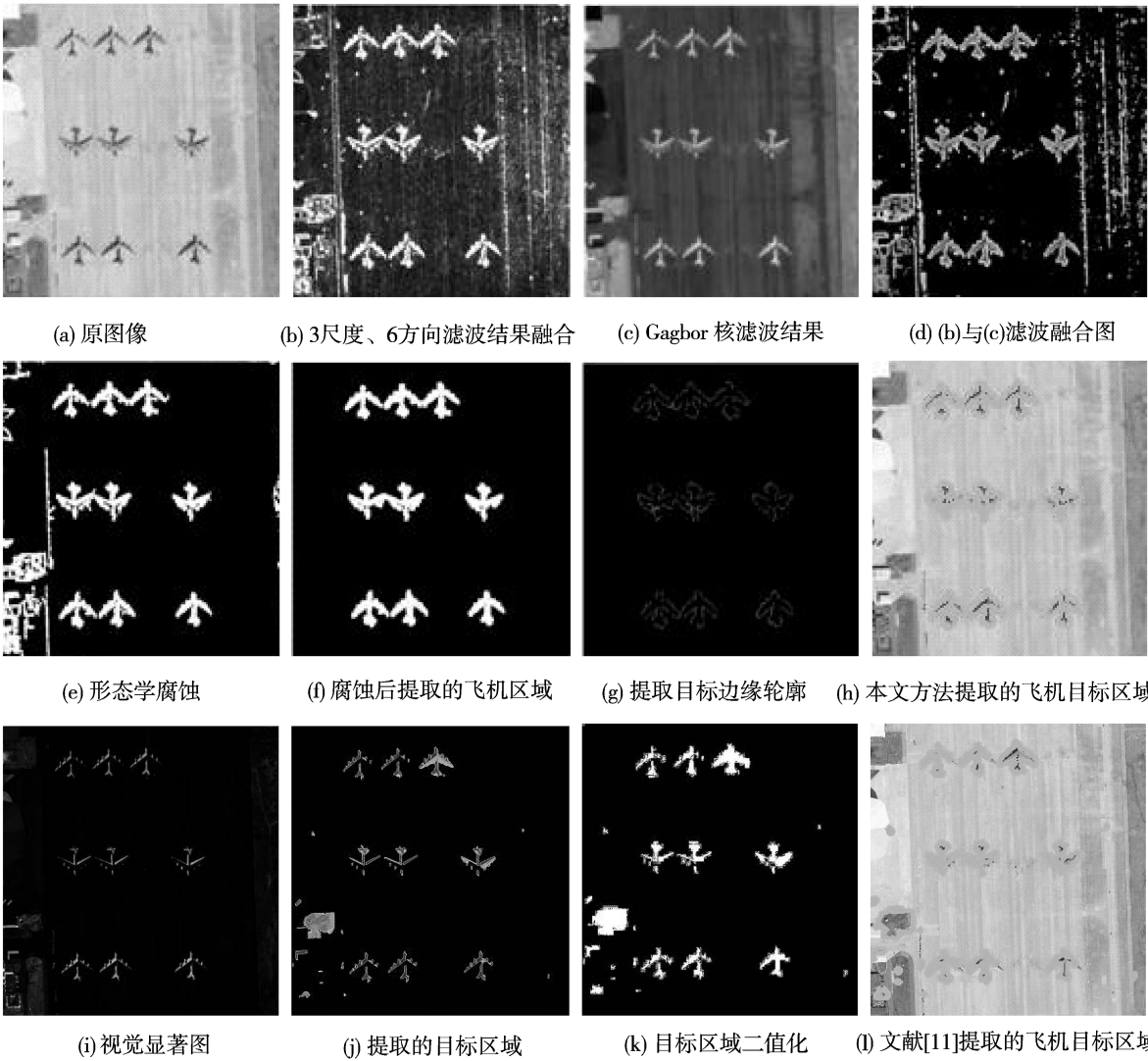


图 5 实验图像  
Fig.5 Test images

实验采用文献[11]中的基于视觉显著性的目标检测方法作对比,结果如图 5(i)~5(l)所示,其中图 5(i)为提取的目标显著图,图 5(j)为基于视觉显著图的目标检测结果,图 5(l)为对比实验提取的结果.将图 5(d)与 5(l)对比发现文献[11]中的方法

虽然也定位到全部的飞机目标,但没有完整提取出目标轮廓,存在飞机机翼部分丢失、错将草坪区域当作目标被检测出来的问题.这是因为基于视觉注意机制模型主要提取颜色、纹理、亮度特征,并进行无监督的分类,而飞机目标通常在颜色上不具有显著

性,这样草地、房屋等背景就会干扰目标的提取。而本文的算法是在分析目标形状特征的基础上,提取了与目标形状相关的频域特征,并结合了目标的区域纹理、光谱特征,且这些是区分飞机目标与背景最重要的特征;因此本文方法更具有针对性,效果更加显著,可以清楚、准确、完整地提取出飞机目标,便于后续的识别工作。

## 4 结束语

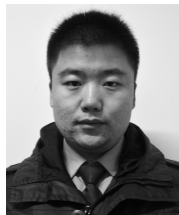
遥感影像中目标的智能解译是遥感和地球空间科学等领域研究的热点,也是亟待解决的一个技术难点,而对感兴趣目标的检测与提取是后续识别工作的基础。本文针对机场中飞机目标的提取问题,在引入目标形状先验知识的基础上,提出用圆周剖面亮度曲线来描述飞机形状,以曲线的中心频率作为飞机的频域特征,并结合多尺度 Gabor 滤波器的设计来实现飞机目标的检测。通过实验与基于视觉显著图的目标检测方法作比较,验证了该方法的可行性和优越性。根据频谱信息研究遥感图像的特征提取与图像分割是一种非常有价值的学术思路,可为遥感图像的处理和应用开辟新的途径,对空域处理方法是很好的补充,并为特定目标中心频率的确定提供参考依据。

## 参考文献:

- [1] MARTIN R, MARFIL R, NUNEZ P, et al. A novel approach for salient image regions detection and description[J]. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(16): 1464-1467.
- [2] CHANG L, PALANCAR J H, SUCAR L E, et al. FPGA-based detection of SIFT interest keypoints[J]. Journal of Electronic Imaging, 2013, 10(2): 371-392.
- [3] BUTAKOFF C, FRANGI A F. Multi-view face segmentation using fusion of statistical shape and appearance models[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(3): 311-321.
- [4] FELZENSZWALB P, MCALLEATE D, RAMANAN D. A discriminatively trained, multi scale, deformable part model [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, USA, 2008: 1-8.
- [5] 王鹏伟, 吴秀清, 余珊. 基于角点特征和自适应核聚类算法的目标识别[J]. 计算机工程, 2007, 33(6): 179-181. WANG Pengwei, WU Xiuqing, YU Shan. Target identification based on corner character and self-adaptive kernel clustering algorithm[J]. Computer Engineering, 2007, 33(6): 179-181.

- [6] 余珊, 吴秀清. 基于变分域的主动形状模型标记点, 自动标定[J]. 计算机仿真, 2008, 25(3): 227-230. YU Shan, WU Xiuqing. Automatic marking for landmarks of active shape model based on variation domain[J]. Computer Simulation, 2008, 25(3): 227-230.
- [7] 蔡红萍, 耿振伟, 栗毅. 遥感图像飞机检测新方法——圆周频率滤波法[J]. 信号处理, 2007, 33(4): 539-543. CAI Hongping, GENG Zhenwei, SU Yi. A new method to detect airplanes in remote sensing image—circle-frequency filter[J]. Signal Processing, 2007, 33(4): 539-543.
- [8] 张国云, 章兢. 基于 Gabor 小波的多尺度 PCA 支持向量机人脸识别方法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(4): 437-442. ZHANG Guoyun, ZHANG Jing. Multi-scale PCA support vector machine algorithm based on Gabor wavelet for face recognition[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(4): 437-442.
- [9] BAU T C, SARKAR S, HEALEY G. Hyperspectral region classification using a three-dimensional Gabor filterbank[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(9): 3457-3464.
- [10] 万伟, 冯学智, 肖鹏峰, 等. 基于傅里叶描述子的高分辨率遥感图像地物形状特征表达[J]. 遥感学报, 2011, 15(1): 73-87. WAN Wei, FENG Xuezhi, XIAO Pengfeng, et al. Shape feature representation of ground objects from high-resolution remotely sensed imagery based on Fourier descriptors [J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(1): 73-87.
- [11] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, et al. Frequency-tuned salient region detection[C]//IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, USA, 2009: 1597-1604.

## 作者简介:



尹辉,男,1989年生,硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理与模式识别。



谷峰,男,1964年生,教授,硕士生导师,主要研究方向为数字图像处理、模式识别、复杂系统仿真。发表学术论文50余篇,出版著作5部。