基于几何特征的高分辨率SAR图像飞机目标解译方法*

高 君[1,2] 高 鑫[1] 孙 显[1]
(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190;2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

摘 要: 针对高分辨率SAR(synthetic aperture radar)图像特性,提出了一种基于几何特征的飞机目标解译方法。首先,局部自相似性及DBSCAN(density-based spatial clustering of application with noise)算法用于提取感兴趣的目标区域;其次,机翼和机身形成的"T"型结构采用霍夫变换进行提取;最后,结合基于水平集的精细部件分割和共线性、对称性等先验知识,飞机目标的发动机和机头等部件得以提取。得到飞机目标的关键几何参数以用于目标识别和解译。基于miniSAR图像的实验验证了方法的实用性和有效性。

关键词: SAR飞机解译; 几何特征;水平集分割;霍夫变换
中图分类号: TP753 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 520.604

Geometrical features-based method for aircraft target interpretation in high-resolution SAR images

Gao Jun[1,2] Gao Xin[1] Sun Xian[1]
(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Electronics, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A new method based on geometrical features is proposed for aircraft target interpretation to make full use of the characteristics of high-resolution SAR (synthetic aperture radar) images. Our method consists of three steps. First, the local self-similarity and DBSCAN (density-based spatial clustering of application with noise) algorithm are used to extract the ROI (region of interest). Second, the geometrical structure, especially the "T" shape consisting of the aircraft's swings and fuselage, is extracted based on Hough transform. Third, fine components segmentation based on level set and prior knowledge such as collinearity and symmetry are combined together to identify the components of the target such as the engines and the prow of the aircraft. We get the key parameters of the aircraft from above steps for target recognition and interpretation. The experiments based on the images from miniSAR demonstrate that our method is effective in high-resolution SAR images.

Keywords: SAR aircraft interpretation; geometrical features; level set segmentation; Hough transform

1 引 言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)具有全天时、全天候的成像能力,随着分辨率的提高,已被广泛应用于军事和民用的各个领域,如军事侦察与监视、地形地貌测量、海洋渔业管理和灾害防御与评估等。由于雷达对飞机、船舶、坦克、车辆等目标具有极强的发现能力,利用SAR图像进行自动目标识别(automatic target recognition, ATR)成为SAR图像应用领域一个重要的分支[1-3]。至今提出的诸多SAR目标识别方法,可以大致分为2类:基于模板的方法和基于模型的方法。1)基于模板的方法原理简单,比较易于实现,但由于需要庞大的模板库作为匹配源,且随着成像条件改变,同一目标所成像的模板差异很大,这限制了该方法的实际应用。2)基于模型的方

收稿日期:2015-03
* 基金项目:高分辨率对地观测青年基金(GFZX04060103-5-17)资助项目

法，可以对目标的不同状态进行建模，同时考虑更多复杂情形如半遮挡、多目标间干扰等。该方法需要预先知道目标的细节参数，通过 CAD(computer aided design)工具得到目标的三维模型，再通过仿真成像过程，计算出目标模型的电磁散射结果，最后仿真结果与真实 SAR 图像进行匹配进而完成目标识别[3]。由于低分辨 SAR 图像中目标往往只包含几个像素或亮斑，这种情况下试图对目标进行细节描述是失效的，因此考虑散射机理成为低分辨率 SAR 图像目标识别的有效方法。然而，随着空间分辨率的提高，基于模型的方法也面临着一些问题：首先，对目标进行高分辨率条件的成像仿真计算量更大，计算时间更长；其次，高分辨率的仿真结果势必占用更多的存储空间；同时，高分辨率情况下仿真结果和真实 SAR 图像的匹配策略也需要改变。上述问题使得基于模型的方法变得复杂和冗余，限制了其在高分辨率情况下的实际应用。

由于适合中低分辨率的方法不能满足高分辨情形的需求，亟需研究新的有效方法来迎接高分辨率带来的机遇和挑战。特别地，当空间分辨率达到 0.1 m 甚至更高时，目标的骨架和轮廓在 SAR 图像中得到了很好的保留，这些显著的几何特征对于 SAR 图像解译具有重大意义。目前，已有很多学者开始利用目标的几何特征和细节信息来进行高分辨率 SAR 图像的应用研究。U. Soergel 等人利用关键的几何信息进行城市区域的分析[4]，L. P. Nicoli 等人将形状信息用于 SAR 目标的识别[5]，TANG Kan 等人提出了基于几何特征的仿真算子，相比精确的电磁散射计算，该算子利用了目标的几何结构，进而提高了传统仿真算法的效率[6]。所有这些工作都表明应该更多地注重和利用高分辨率条件下目标的几何特征和丰富细节。

为了探索关键几何特征在目标解译中的分辨能力，提出了一种基于几何特征的高分辨率 SAR 图像飞机目标解译方法，旨在提取强散射飞机目标的关键几何结构，进而分析目标的功能特性。本文方法的主要贡献如下：提出了新的飞机目标几何特征提取方法，结合飞机目标的几何特征和共线性、对称性等先验知识进行飞机目标的部件提取和功能分析。本文方法不仅给出了一个直观的解译结果，还输出了飞机的关键参数以用于辅助目标分类和识别。

2 本文方法介绍

本文方法的整体流程如图 1 所示。

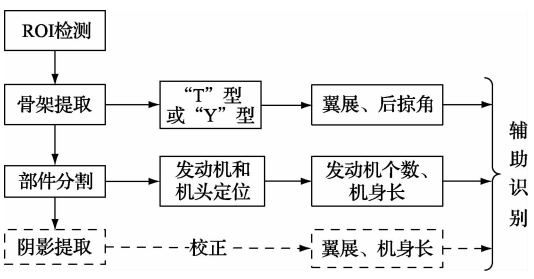


图 1 本文方法整体流程

图中：ROI (region of interesting，感兴趣区域)检测在原始 SAR 图像中定位候选的飞机目标；骨架提取获取飞机目标的“T”型或“Y”型骨架，同时计算出目标的翼展长度和后掠角；部件分割采用水平集方法获取飞机目标的关键部件用于定位飞机发动机和机头，机身长度和发动机数量参数进而被获得；阴影提取作为可选步骤，用于提取目标的阴影，进而校正飞机的机身长度和翼展长度，通过阴影和雷达波入射参数，还可以进一步推算飞机的高度。最后，提取得到的几何参数用于辅助飞机目标的分类和识别。

2.1 ROI 检测

通过散射原理可知，在 SAR 图像中，人造目标亮度较大，且像素分布不均匀。而自然物体或背景较暗，像素分布相对均匀。因此，可以借助图像中像素区域的自相似性来滤除自然背景，提取可能的潜在目标。

最小核值相似(smallest univalue segment assimilating nucleus，SUSAN)是一个高效的图像低层特征操作算子，利用图像的局部自相似性以发现目标的角点和边缘。它定义了一个圆形模板作为滑动窗来计算圆心周围的相似像素个数，如式(1)：

$$n(r_0)=\sum_r c(r,r_0),\ c(r,r_0)=e^{-(I(r)-I(r_0)/t)\sigma} \tag{1}$$

式中：r_0 表示圆心或核的位置，r 表示圆形模板的内部区域，$I(r_0)$、$I(r)$ 分别表示位置 r_0 和 r 的像素值，t 是相似度的阈值，通过实验确定。当 $n(r_0)$ 达到局部最小值时，r_0 被当作一个角点或边缘点。由于 SUSAN 算子避免了梯度计算，它对 SAR 图像的斑点噪声具有很强的鲁棒性。

经过 SUSAN 操作，得到候选目标点集后，通过聚类算法将这些点进行聚类。格式塔准则指出点的临近性、相似性、对称性和方向连续性将影响人类对目标的认知。鉴于此，选用 DBSCAN (density-based spatial clustering of application with noise)作为点的聚类算法。DBSCAN 定义了点的可达性和密度连通性，实验表明该算法能够正确提取飞机目标的 ROI 区域。

2.2 骨架提取

由机身和翼展形成的几何骨架可以看作“T”型或“Y”型结构，通过霍夫变换进行目标骨架结构的提取。霍夫变换是一种在图像中定位特殊形状的有效方法[7]。Duda 和 Hart 将其拓展到极坐标系中用于检测直线。在图像 $U(x,y)$ 中，给定点 $p(x,y)$，投票函数定义为：

$$\rho=x\cos(\theta)+y\sin(\theta),\ -90\leqslant\theta<90,\quad p(x,y)\in U(x,y) \tag{2}$$

如图 2 所示为 $\rho\theta$ 平面的投票过程。

经过霍夫变换得到累积 θ 的峰值，它表示检测到直线的方向，如图 2 箭头所示。类似地，通过获取前 2 个或 3 个 θ 的峰值来得到“T”型或“Y”型结构的直线方向，如图 3 所示。

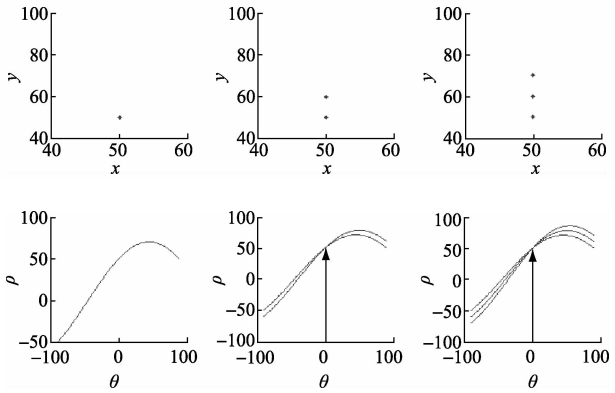


图 2　随着共线的点增多，相应 θ 的累加值增大

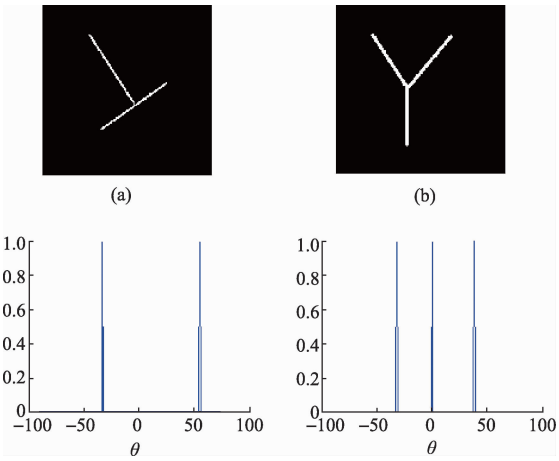


图 3　“T”型的峰值 θ(a)和“Y”型的峰值 θ(b)

由于飞机骨架相比标准的“T”型或“Y”型结构具有更多的噪声，同时骨架上的强散射斑点往往具有多个像素，故实际检测结果中存在大量部分重叠的线段，如图 4（b）所示。这说明简单地选择 θ 的前两个峰值作为“T”型骨架的两个方向是不可行的。为了提高方法的准确性和鲁棒性，选取前 n（$n >> 2$）个峰值作为候选。如图 4(c)，除部分噪声外，检测到的候选直线集中在两个主方向的附近，通过高斯核平滑可以滤除噪声，同时得到最集中的 2 个主方向值。

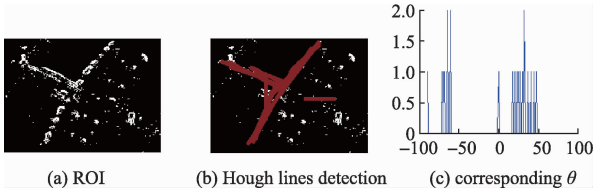


图 4　霍夫直线检测及对应 $\theta(n = 30)$

高斯核函数定义如（3）：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-u)^2/2\sigma^2} \quad (\sigma > 0, u \in \mathbf{R}) \tag{3}$$

式中：σ 控制函数的形状，u 决定其中心位置。高斯核平滑后的结果如图 5 所示，可以看到“T”型骨架的两个主方向已经被确定出来。

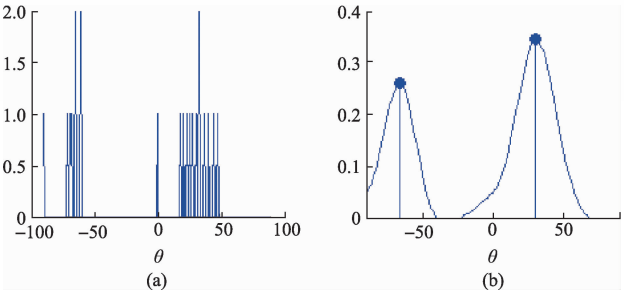


图 5　高斯平滑结果（$u = 0, \sigma = 10$）

2.3　水平集部件分割

完成飞机目标骨架提取后，需要接着定位其发动机和机头，以便进一步分析目标的内部功能特性。由于发动机附近还可能存在座舱或地面车辆等干扰，这使得对发动机的定位难度加大。因此，先对飞机目标进行部件分割，再借助共线性和对称性等先验知识进行发动机的定位。

作为高层解译的基础，SAR 图像分割一直被广泛研究，大量的分割方法被提出[8-11]。其中，水平集方法以其善于处理目标几何拓扑结构变化而著名[12]。此外，它统一的能量框架可以直接引入 SAR 图像的统计模型，使得该方法对 SAR 图像有很好的适应性[13-14]，因此，选择水平集方法进行部件的分割提取。对于统计模型的选取，不同分辨率和成像条件的 SAR 图像适用不同的统计模型，Feng J 等人指出，对于高分辨率单极化 SAR 图像，G^0 统计模型相比其他模型能更好的描述图像中亮度分布均匀、不均匀和极不均匀的区域[15]。本文的实验数据分辨率为0.1 m，因此采用 G^0 模型进行 SAR 图像亮度分布的拟合。G^0 亮度分布模型定义如式（4）：

$$P_f^{G^0}(I(x,y);\alpha,\gamma,n) = \frac{n^n\Gamma(n-\alpha)I(x,y)^{n-1}}{\gamma^\alpha\Gamma(n)\Gamma(-\alpha)(\gamma+nI(x,y))^{n-\alpha}}, -\alpha,\gamma,n,I(x,y) > 0 \tag{4}$$

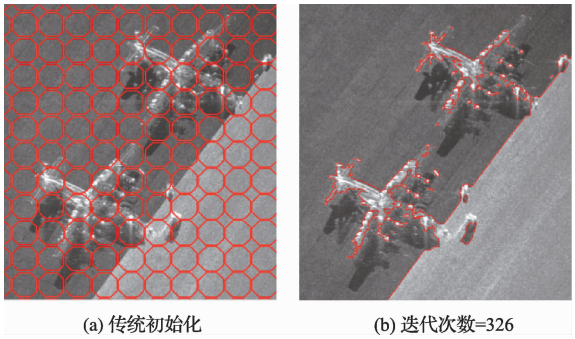
式中：参数 n 是 SAR 图像的等效视数，α 是形状参数，γ 是尺度参数。

基于 G^0 分布的水平集分割方法将图像分割转换为能量最优问题，这里不再推导其具体公式，更多细节参见文献[15-16]。下面主要讲述如何将该方法应用于飞机目标的部件提取，传统的水平集分割主要用于提取大块区域的轮廓或边缘（如城市区域、农田、水域等）或者提取低分辨率图像中的目标（如 MSTAR 数据中的坦克、车辆等），这些被提取的对象往往是内部连通的，且其分割效果受初始化轮廓位置的影响很大。本文提出了一种阈值初始化方法用于水平集分割的初始化。

根据SAR图像中人造目标亮度大于自然背景的先验知识，可以将零水平集曲线初始化在图像中更亮的区域而不是整个图像区域，此后初始化曲线开始演化进行目标部件的提取。亮暗区域通过阈值 T 来区分，T 值通过实验和观察可选取在0.7到0.9之间。初始轮廓所在区域由如下规则确定：

$$\begin{cases} \text{亮区域}, & I_n(x,y) \geqslant T \\ \text{背景}, & I_n(x,y) < T \end{cases} \tag{5}$$

式中：$I_n(x,y)$ 表示SAR图像的归一化像素亮度。新的阈值初始化方式可以高效的提取飞机目标的关键部件，相比传统方式，减少了迭代次数，加快了分割速度。2种初始化方式的对比如图6所示。



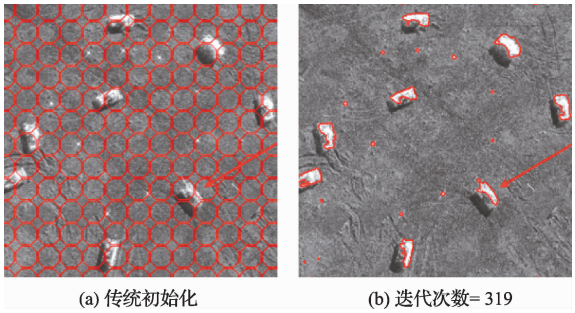
(a) 传统初始化　(b) 迭代次数=326

(c) 阈值初始化，T=0.8　(d) 迭代次数=120

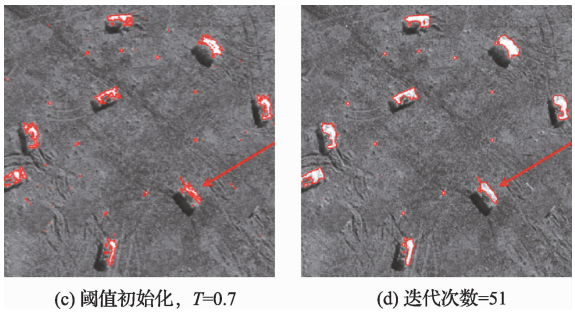
图6　2种初始化方式的对比

从图6可以看到阈值初始化方法倾向于快速提取目标的各个部件（实验数据来自美国Sandia实验室[17]）。

图7展示了另一组来自Sandia实验室的数据实验，如箭头所示，阈值初始化方法通过更少的迭代次数准确地提取了目标轮廓。



(a) 传统初始化　(b) 迭代次数=319



(c) 阈值初始化，T=0.7　(d) 迭代次数=51

图7　阈值初始化方法在沙漠军事车辆目标图像上的测试

详细的比较如表1所示。实验环境为Win7 64位，CPU i5-3470@3.2 GHz，内存4 G，MATLAB语言。

表1　2种初始化方式的对比

图像	迭代次数1次		迭代时间/s	
($h\times w$)	阈值	传统	阈值	传统
飞机 516×448	120	326	16.1	43.3
车辆 514×538	51	319	7.5	51.6

部件分割后，利用提取到的飞机骨架和共线性、对称性等先验知识可以定位出飞机目标的关键功能部件，如发动机和机头等。定位流程如图8所示。

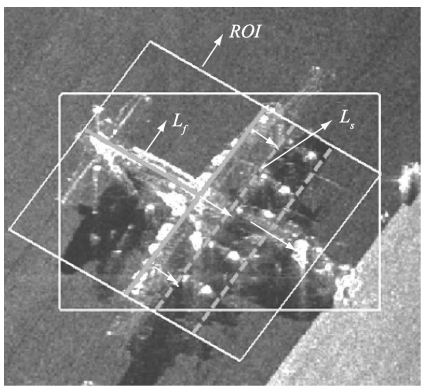


图8　发动机定位流程

图中：L_f 为飞机“T”型骨架的主方向，L_s 是沿着机身主方向移动的扫描线，用于记录水平集部件分割后具有共线性的散射点。由于发动机沿着机身呈轴对称，因此在 L_s 上且关于 L_f 对称的点，就是飞机的发动机散射点。这样就可以剔除虚警和干扰，定位出发动机。飞机机头则可以简单的认为在ROI内部，在直线 L_f 上，且是分割后的区域中面积最大的一块区域。由于飞机机头有驾驶舱，往往呈现强散射，在SAR图像上表现为密集分布的亮斑簇，所以其分割后的区域面积也较大。

2.4 参数输出

经过 ROI 检测、骨架提取、水平集分割和部件定位后，可以得到飞机目标的翼展、机身长、后掠角以及发动机数目等参数。如果某型飞机的后掠角较小，可以将其“Y”型结构简化为“T”型，后掠角近似为 0。如果阴影被提取，可以进一步校正目标的长度和翼展参数。最后，将这些参数用于辅助目标分类识别。定义目标的参数向量为：

$$T_i = \left(\frac{length_i}{wingspan_i}, engines_i, angle_i\right) \tag{6}$$

式中：$\frac{length_i}{wingspan_i}$ 表示目标 T_i 的机身长度与翼展长度之比。$engines_i$ 表示目标 T_i 的发动机数量，$angle_i$ 表示 T_i 的后掠角。目标间的相似测度定义为：

$$s(T_i, T_j) = \frac{\sum_{q=1}^{n}\left(1 - \frac{|T_{iq} - T_{jq}|}{r_q}\right)}{n} \tag{7}$$

式中：n 是向量 T_i 的维度，T_{iq} 为 T_i 的第 q 个分量，r_q 用于调整各分量的权重，更多细节见后文实验部分。

3 实验与分析

3.1 Ka 波段 SAR 图像

基于 Ka 波段的实验展开为 4 部分，分别描述 ROI 检测、骨架提取、部件分割定位和阴影提取及参数输出。

3.1.1 ROI 检测

原始 SAR 图像如图 9(a)，图 9(b)展示了原图中不同区域的亮度分布。ROI 检测的结果如图 10，图 10(a)为运用 SUSAN 算子的结果，图 10(b)为 DBSCAN 聚类结果。

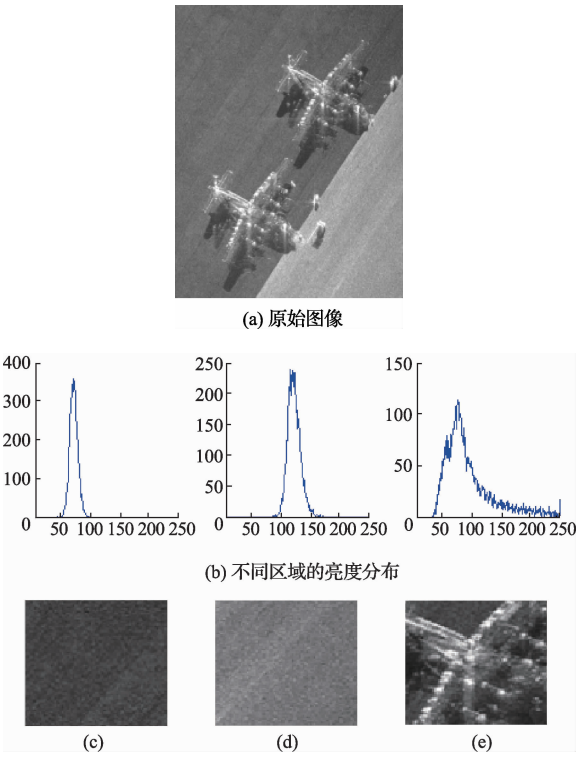


图 9 原始 SAR 图像

图 9(a)原始 SAR 图像来自[17]Ka 波段，C130 运输机，4 英尺(0.1 m)分辨率。(b)不同区域的亮度分布。在图 9(b)中，子图(c)和(d)表示自然背景的灰度级在一个较小的范围内平滑改变。相反，接近飞机目标区域(子图(e))的灰度级变化较大。

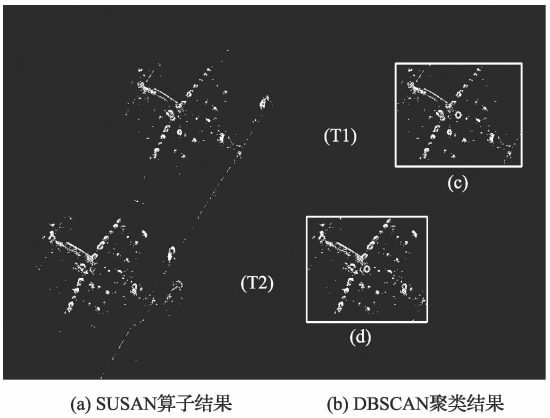


图 10 ROI 检测的结果

图 10(a)为 SUSAN 算子结果，其中参数 t 由图 9(b)中背景区域的灰度分布决定，$t=60$。感兴趣目标区域由最小外接矩形表示，内部小圆表示聚类的中心。DBSCAN 算法的输入参数是 $r=24$，$q=100$。

3.1.2 骨架提取

霍夫直线检测的过程如图 11 (a)～(d)，(e)、(f) 为高斯平滑的结果。获取到骨架的两个主方向后，结合霍夫直线检测的结果，可以提取到“T”型结构，如图 12 所示。

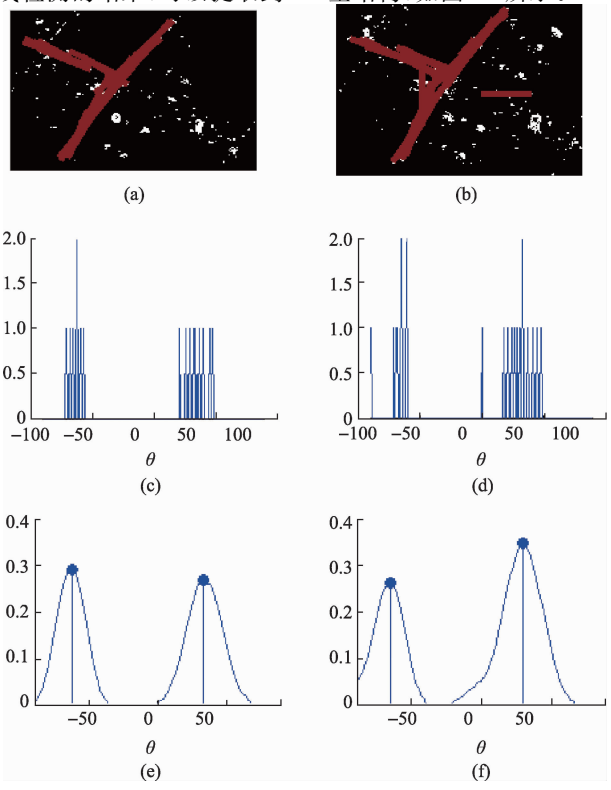
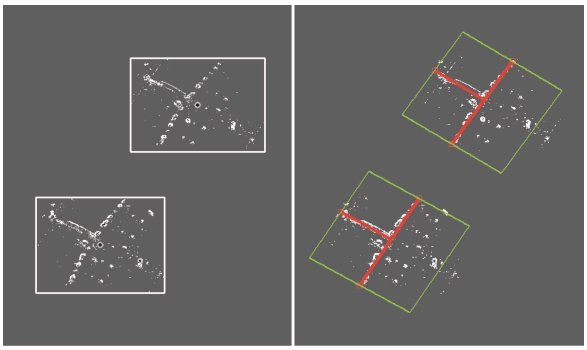


图 11 飞机骨架的霍夫直线检测结果

图 11 所示，(a)和(b)分别对应图 10(b)中的目标 T1 和 T2。(c)和(d)是对应 θ 的峰值($n=30$)。由于噪声和部分重叠直线的影响，直接选择前 2 个 θ 的峰值作为“T”型的方向不可取。(e)和(f)为高斯平滑结果。实验参数设置为：峰值数 $n=30$；高斯函数参数：$u=0$，$\sigma=10$。对于图 11(e)，飞机机身和机翼与正北方向的夹角分别是 $\theta_t=-63°$，$\theta_s=34°$。对于图 11(f)，$\theta_t=-66°$，$\theta_s=31°$。



(a) 图10(b)中的ROI区域　　(b) “T” 型骨架

图 12 “T”型定位结果

如图 12 所示，子图(b)显示检测到的飞机机翼和机身并非严格垂直，对于两个飞机骨架，其间的夹角都是 97°。

3.1.3 部件分割定位

ROI 区域的水平集部件分割如图 13，发动机和机头定位结果如图 14 所示。通过图 14 可以看到图中飞机目标的每个发动机都产生了两处强散射，分别对应于发动机罩腔体和发动机与机翼间的二面角。

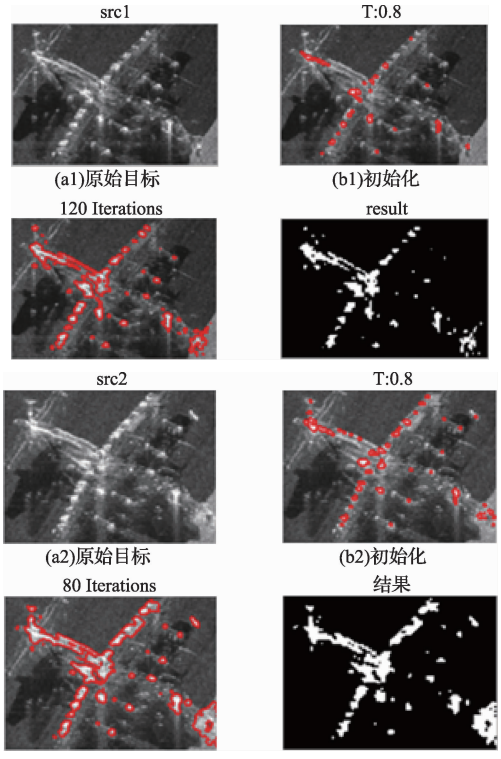


图 13 阈值初始化的水平集分割结果，将飞机发动机定位在轮廓中

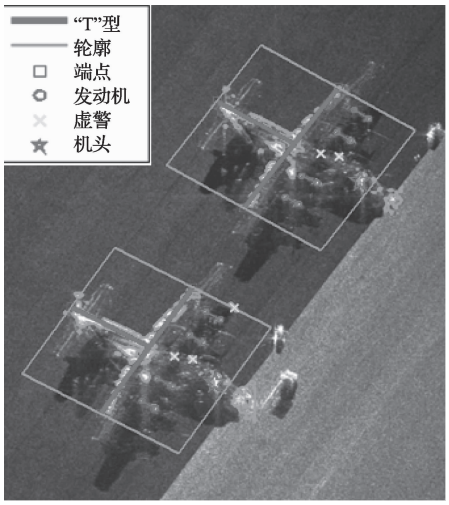


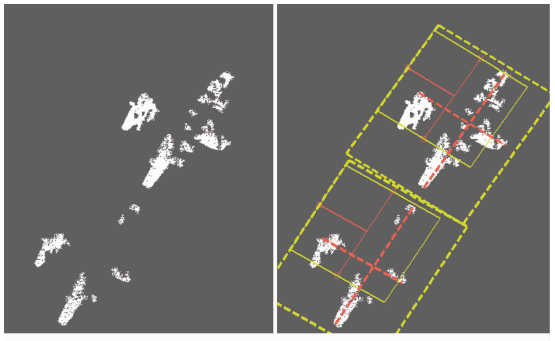
图 14 飞机发动机和机头鉴定结果，对称性和共线性用于剔除虚警

3.1.4 阴影提取与参数输出

阴影提取通过自适应阈值及 DBSCAN 聚类完成，提取结果如图 15(a)。通过阴影可以对飞机目标的翼展和机身长进行计算，如图 15(b)，最终的解译参数如表 2 所示。

表 2 解译参数

目标	骨架提取		分割		阴影提取	
编号	翼展	后掠角	发动机数量	机身长	翼展	机身长
T1	155	0°	4	164	223	162
T2	158	0°	4	162	223	147



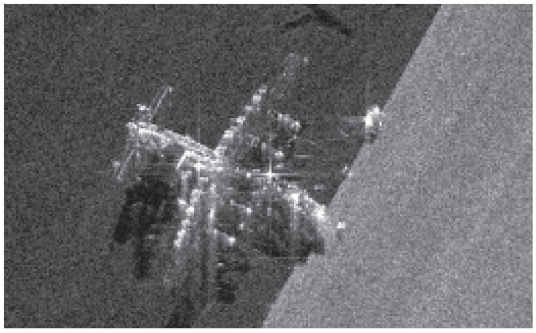
(a)　　(b)

图 15 阴影提取和参数计算

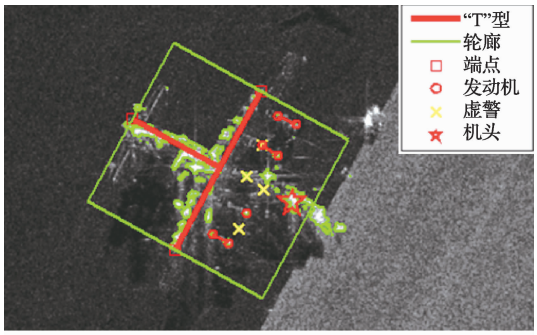
如图 15 所示，(a)DBSCAN 算法的输入参数是 $r=2$，$q=14$。(b)虚线对应于阴影提取，实线是飞机骨架的位置。

3.2 Ku 波段 SAR 图像

图 16(a) 是 miniSAR Ku 波段图像[18]，图 16(b)是对应 SAR 图像的飞机目标解译结果，具体的解译参数如表 3 所示。



(a) Ku波段, 4英尺(0.1 m)分辨率, 3.3 km斜距



(b) 解译结果

图 16 原始 SAR 图像和解译结果

表 3 解译参数

目标编号	骨架提取		分割	
	翼展	后掠角	发动机数量	机身长
T3	138	0°	4	138

3.3 参数应用

最后,将输出的解译参数与真值进行对比。如果翼展和机身长度通过骨架和阴影两种方式获得,取较大值。具体参数对比详如表 4 所示,其中 Tr 表示目标的真实参数。

表 4 参数对比

目标编号	翼展/m	机身长/m	后标角	发动机数量
Tr	40.41	29.79	0°	4
T1	223	164	0°	4
T2	223	162	0°	4
T3	138	138	0°	4

结合式(7),给定 $r_1 = 0.5, r_2 = 2, r_3 = 20$,目标间相似度计算见表 5。通过表 5 可以看到,本文提出的方法能够准确的提取出目标的几何参数,同时经过阴影提取校正后的参数与真实数据相似度更高。这些解译参数可以进一步用于目标的分类和识别。

表 5 目标间近邻测度

	Tr	T1	T2	T3
Tr	1	0.998 8	0.992 8	0.824 8
T1	0.998 8	10.994 0	0.823 6	
T2	0.992 8	0.994 0	1	0.817 6
T3	0.824 8	0.823 6	0.817 6	1

4 结 论

本文提出了一种 SAR 飞机目标几何特征提取方法用于目标解译识别,在高分辨率 SAR 图像中,几何特征对于人造目标识别意义重大。SAR 的成像机理表明,SAR 图像目标的强散射点暗示目标的内部结构与功能特性,通过分割提取目标的关键散射点或骨架,对其分布进行分析,能够有效地进行目标推理和辨识。

基于 Ka 波段和 Ku 波段的 SAR 图像实验验证了方法的可行性。通过结合散射点分布和目标部件的对称性、共线性等先验知识,进行目标的有效提取和相似度测量。一方面,方法输出了直观的解译结果;另一方面,提取的关键参数可用于目标的进一步分析识别。相比其他方法,本文提出的基于阈值的水平集初始化方法加快了分割速度,同时充分利用了高分辨率条件下目标的几何细节,通过将目标的几何结构特征与其对应的内部功能属性进行关联,也为高分辨率 SAR 图像的目标解译提供了有用的思路。

参 考 文 献

[1] 鲁小丽,王岩飞,潘卓,等. 基于剪切波变换的 SAR 图像舰船检测[J]. 电子测量技术, 2014,37(6): 54-58,62.

[2] JIANXIONG Z, ZHIGUANG S, XIAO C, et al. Automatic target recognition of SAR images based on global scattering center model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10): 3713-3729.

[3] ZHANG L, WANG C, ZHANG H, et al. Aircraft discrimination in high resolution SAR images based on texture analysis[C]. 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR), 2010: 118-121.

[4] SOERGEL U, THOENNESSEN U, BRENNER A, et al. High-resolution SAR data: new opportunities and challenges for the analysis of urban areas [J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2006, 153(3): 294-300.

[5] NICOLI L P, ANAGNOSTOPOULOS G C. Shape-based recognition of targets in synthetic aperture radar images using elliptical Fourier descriptors[C]. SPIE Defense and Security Symposium. International

Society for Optics and Photonics, 2008: 69670G-69670G-12.

[6] TANG K, SUN K, SUN H, et al. A geometrical-based simulator for target recognition in high-resolution SAR images[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012,9(5): 958-962.

[7] 段汝娇,赵伟,黄松岭,等. 一种基于改进 Hough 变换的直线快速检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(12): 2774-2780.

[8] 郑毅,郑苹. 基于模糊熵和模拟退火算法的双阈值图像分割[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,28(4): 360-367.

[9] 刘开刚,许梅生,李维. 一种基于双阈值区域分割的 SAR 图像目标提取方法[J]. 国外电子测量技术, 2008,27(3): 3-6.

[10] YONG-CAI G, YONG T, CHAO G. Level set based segmentation of moving humans in thermal infrared sequences [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2014, 33(1): 106-116.

[11] 朱贺,李臣明,张丽丽,等. 联合灰度阈值分割及轮廓形态识别的河道提取[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,28(11):1288-1296.

[12] 闫晟,刘明刚,侯朝焕. 基于水平集的弱边缘医学超声图像分割算法[J]. 电子测量技术,2008,31(5): 28-30.

[13] CAO Z, PI Y, YANG X, et al. A variational level set SAR image segmentation approach based on statistical model[C]. Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2008 7th European Conference on, 2008: 1-4.

[14] YONGMIN S, HONG S, GE X. SAR image segmentation based on level set with stationary global minimum [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(4): 644-648.

[15] FENG J, CAO Z, PI Y. A G0 statistical model based level set approach for SAR image segmentation [C]. 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2010: 1-4.

[16] MARQUES R C P, MEDEIROS F N, SANTOS NOBRE J. SAR Image segmentation based on level set approach and G0 model [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(10): 2046-2057.

[17] DOERRY A W, DUBBERT D F, THOMPSON M, et al. A portfolio of fine resolution Ka-band SAR images: part I [C]. Defense and Security, 2005: 13-24.

[18] GUTIERREZ D. miniSAR: A Review of 4-inch and 1-foot Resolution Ku-Band Imagery [EB/OL]. 2005, [2014-4-21]. http://www. sandia. gov/radar/imagery. html.

作 者 简 介

高君,1990 年出生,硕士研究生。主要研究方向为 SAR 图像理解。

高鑫,1966 年出生,研究员,博士生导师。主要研究方向为 ATR 与 SAR 图像理解。

孙显,1981 年出生,助理研究员。主要研究方向为遥感图像处理与人工智能。

E-mail: nktxgj@163. com