

文章编号: 2095-4980(2020)02-278-07

# 一种基于 CFAR 检测和密度聚类的 ISAR 图像预处理方法

金元华<sup>1</sup>, 叶春茂<sup>1</sup>, 鲁耀兵<sup>1</sup>, 杨 健<sup>2</sup>

(1.北京无线电测量研究所, 北京 100854; 2.清华大学 电子工程系, 北京 100084)

**摘要:** 目标逆合成孔径雷达(ISAR)像通常受各种噪声的影响, 这些噪声使ISAR图像质量下降, 严重影响了后续的特征提取和目标识别应用。提高图像质量, 减少噪声的干扰成为ISAR目标识别应用中的重要步骤。提出了一种基于恒虚警检测和密度聚类的方法抑制ISAR像的斑点干扰和横条纹干扰, 在保证干扰抑制效果的同时相比于传统方法可以更有效地保留目标中的细节信息。提取了图像面积、长度、多普勒扩展作为ISAR识别特征矢量, 外场实测数据实验表明, 提出的预处理方法有效地抑制了图像中的干扰成分, 保留了更多图像细节, 有效地提高ISAR识别特征的稳定性。

**关键词:** 逆合成孔径雷达; 预处理; 干扰抑制; 特征提取

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018343

## A pre-processing method of ISAR images based on CFAR detection and density clustering

JIN Yuanhua<sup>1</sup>, YE Chunmao<sup>1</sup>, LU Yaobing<sup>1</sup>, YANG Jian<sup>2</sup>

(1.Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China;

2.Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR) images are usually affected by various noises which degrade the quality of ISAR images and seriously affect the subsequent feature extraction and target recognition applications. Improving the image quality and reducing noise interference have become important steps in the application of target recognition. A method based on Constant False-Alarm Rate (CFAR) detection and density clustering is proposed to suppress speckle interference and transverse fringe interference in ISAR images. Compared with traditional methods, this method can effectively preserve the details of the target while ensuring the effect of interference suppression. The image area, length and Doppler spread are extracted as ISAR recognition feature vectors. Field experiments show that the proposed method effectively suppresses the interference components in the image, retains more image details, and effectively improves the stability of ISAR recognition features.

**Keywords:** Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR); pre-processing; interference suppressing; feature extraction

逆合成孔径雷达(ISAR)是一种高分辨成像雷达, 相比于光学成像, 具有全天候和全天时工作的优点, 受天气的影响小。随着逆合成孔径成像技术的不断成熟, 基于 ISAR 像进行特征提取和目标识别已经成为目标识别领域重要的方法之一<sup>[1-7]</sup>。ISAR 像包含目标精细的几何结构和散射点分布等多种信息, 对目标的判别有重要的价值。但 ISAR 像通常受多种噪声的影响, 这些噪声严重影响了 ISAR 图像的质量, 使得对目标的特征提取和识别变得困难。因此, 提高图像质量, 减少噪声的干扰成为识别过程中重要的步骤。ISAR 像不同于光学像, 由于测量条件和成像原理等原因, 特征提取与识别难度较大。ISAR 像的特点总结如下<sup>[6,8]</sup>: 一般表现为稀疏、孤立的散射点分布; 存在斑点干扰和横条纹干扰, 使成像质量下降; ISAR 像与雷达视角有关, 不同的视角下 ISAR 像也不同; 横向分辨率和目标相对于雷达的自转速度有关, 往往难以确定, 所以 ISAR 图像的缩放一致性无法保证。ISAR

收稿日期: 2018-11-16; 修回日期: 2019-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(61490693; 61771043)

作者简介: 金元华(1992-), 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达目标识别。email: 1261678385@qq.com

像的这些不可避免的特点不利于图像的特征提取与目标识别。因此必须采取一定的预处理措施，进行 ISAR 像识别前预处理，提高图像特征的稳定性，以提高识别性能。

国内外对此进行了一些研究。文献[8-10]采用简单的固定阈值方法去除噪声和斑点干扰；文献[11-12]采用 Kuan、Frost、中值等滤波器方法去除噪声和斑点干扰；文献[13]计算图像中全部散射点的强度均值，并把它作为全局阈值的方法来消除干扰；文献[14]通过把强度低于预设阈值的点全部置零的方法消除干扰，然后通过形态学处理实现图像的联通。文献[15]提出把各个距离单元中幅度小于最大幅度 1/10 以下的点全部置零消除横条干扰，全局迭代消除斑点干扰。这些方法在一定程度上抑制了 ISAR 像中的干扰，但是干扰抑制效果一般，图像特征稳定性有待进一步提高。对此，本文提出了一种基于恒虚警检测和密度聚类的预处理方法。首先通过检测聚类的方法对 ISAR 像进行斑点干扰和横条纹干扰的抑制，并进行形态学填充处理，使图像由稀疏散射中心集合的形式转化为保持原有几何特征的联通图像，再对预处理后的 ISAR 像进行图像特征提取，并与文献[15]中的预处理方法对比，说明了本文方法的有效性。

## 1 斑点干扰和横条纹干扰抑制

斑点干扰的产生主要是由于环境噪声的存在，其强度相比于目标散射点要弱得多。由于目标成像时，相位补偿时聚焦不良、螺旋桨调制效应以及强散射点的副瓣造成了横条纹干扰的出现。由于其强度较大，使得在进行目标特征提取时，会把它当作目标进行处理，对特征提取的准确性造成了严重的影响。因此对横条纹干扰进行消除和抑制是目标识别里特别重要的一步。通常有 2 种方法可以用来减少横条纹干扰：a) 成像过程中提高相位补偿的精确度；b) 成像后，根据所得图像特征选取合适的方法进行横条纹干扰抑制。

### 1.1 基于恒虚警检测

基于恒虚警检测的方法是指，在保持虚警率不变的情况下，根据目标所处环境和恒虚警率计算得到相应的检测门限，根据此门限检测目标<sup>[15]</sup>。检测概率和虚警概率由下式得到：

$$P_{fa} = \int_T^{+\infty} p(x|H_0)dx \quad P_D = \int_T^{+\infty} p(x|H_1)dx \quad (1)$$

式中： $p(x|H_0)$ 为目标不存在时的概率密度函数； $p(x|H_1)$ 为目标存在时的概率密度函数； $T$ 为检测门限值。

对于 ISAR 图像的检测处理可以用距离-多普勒二维恒虚警(CFAR)检测器进行处理，也可以在距离维进行一维 CFAR 检测，然后再在多普勒维进行一维 CFAR 检测。

二维 CFAR 检测器参考窗的选择也有不同方式，常用的有矩形窗和十字形参考窗，见图 1。为了防止目标进入噪声参考单元，影响对背景噪声的评估，保护单元的设置应与目标尺寸相适应。

距离、多普勒分别进行 CFAR 检测的方法，首先对 ISAR 像的距离维进行恒虚警检测，消除目标距离维上的拖尾，然后再对 ISAR 像进行多普勒维的恒虚警检测，消除横条纹干扰和噪声干

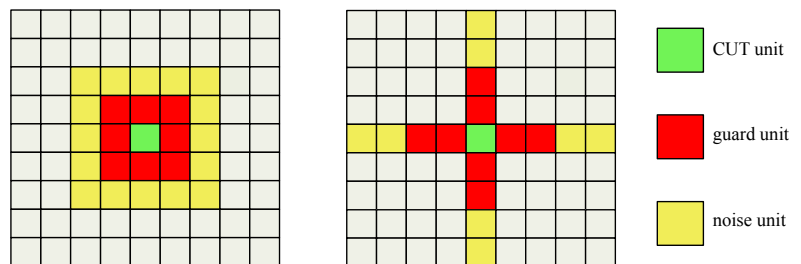


Fig.1 Rectangular reference windows and cross reference window  
图 1 矩形参考窗与十字形参考窗

扰。这种方法的优点是，可以根据目标所处的环境，不同的维度选择不同的检测方法，以提高检测性能。例如：为了提高多目标检测能力，可以在距离维采用有序统计类恒虚警检测方法，在多普勒维采用均值类恒虚警检测方法；当背景杂波环境比较稳定，且在单目标环境下时，可以在距离维和多普勒维都采用均值类恒虚警检测方法。用实测飞机数据进行了检测效果的对比，见图 2。图 2(a)采用的检测方法是二维单元平均 CFAR(Cell Averaging CFAR, CA-CFAR)，使用矩形参考窗；图 2(b)采用的检测方法是二维 CA-CFAR，使用十字形参考窗；图 2(c)采用的检测方法是两次一维 CA-CFAR。从检测结果可以看到图 2(b)和图 2(c)的干扰去除效果要好一些，图 2(c)相比于图 2(b)对飞机的拖尾抑制效果更好。

### 1.2 基于密度的聚类算法

在经过上述恒虚警检测后，可能会存在一些强度比较大的横条纹干扰和噪声点被保留下来，这些点往往散布在目标的周围区域，分布稀疏，而目标区域分布密集，这时利用基于密度的聚类方法把目标区域筛选出来。

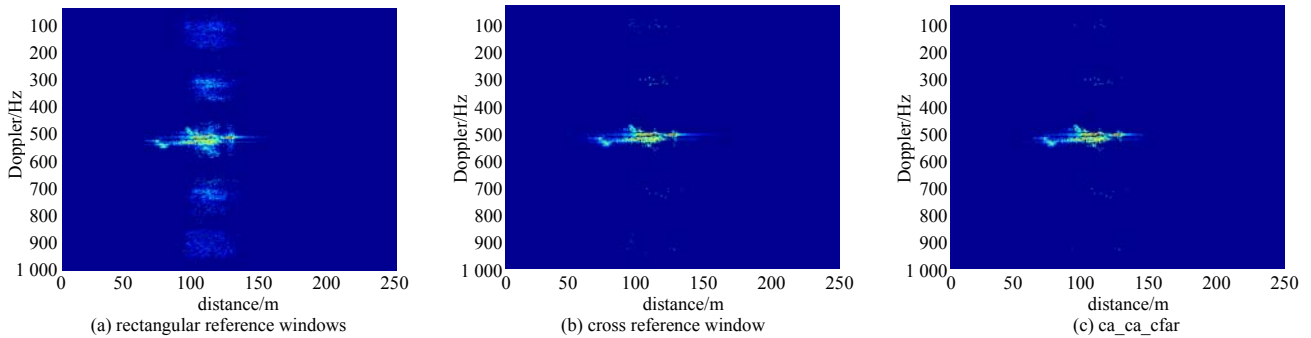


Fig.2 Processing results of different detection methods  
图 2 不同检测方法的处理结果

密度聚类亦称“基于密度的聚类”(density-based clustering), 因为不同的类别数据之间的紧密程度存在差别, 所以可以通过这种特征进行聚类, 密度聚类就是这种通过计算区域内数据密度把满足某一密度要求的区域的样本归为一类的算法<sup>[17-18]</sup>。

DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Application with Noise)是一种具有代表性的密度聚类算法, 它基于一组“邻域”(neighborhood)参数( $\epsilon, MinPts$ )来描述样本之间的密集程度。对数据集  $D = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ , 有下面的定义:

- 1)  $\epsilon$ -邻域: 对  $x_i \in D$ , 数据集  $D$  中与  $x_j$  的距离不大于  $\epsilon$  的数据称作  $x_i$  的  $\epsilon$ -邻域, 即:  $N_\epsilon(x_j) = \{x_i \in D \mid dist(x_i, x_j) \leq \epsilon\}$ ;
- 2) 核心对象(core object): 如果  $x_j$  的  $\epsilon$ -邻域包含的样本数不小于  $MinPts$ , 即  $|N_\epsilon(x_j)| \geq MinPts$ , 那么称  $x_j$  是数据集  $D$  的一个核心对象;
- 3) 密度直达(directly density-reachable): 如果  $x_j$  在  $x_i$  的  $\epsilon$ -邻域内, 并且  $x_i$  是数据集  $D$  的一个核心对象, 那么称  $x_j$  可由  $x_i$  密度直达;
- 4) 密度可达(density-reachable): 对数据  $x_i$  和  $x_j$ , 如果存在数据  $p_1, p_1, \dots, p_n$ , 其中  $p_1 = x_i, p_n = x_j$ , 并且  $p_{i+1}$  可由  $p_i$  密度直达, 那么称  $x_j$  是由  $x_i$  密度可达的;
- 5) 密度相连(density-connected): 对数据  $x_i$  和  $x_j$ , 如果存在  $x_k$  使  $x_i$  与  $x_j$  均可通过  $x_k$  密度可达, 那么称  $x_i$  和  $x_j$  是密度相连的。

基于这些定义, DBSCAN 将“簇”定义为: 通过密度可达逻辑推导出来的最大密度相连数据的集合。也可以说, 对于邻域参数( $\epsilon, MinPts$ ), 簇  $C \subseteq D$  是满足下面条件的非空样本子集:

连接性(connectivity):  $x_i \in C, x_j \in C \Rightarrow x_i, x_j$  密度相连。

最大性(maximality):  $x_i \in C, x_j$  由  $x_i$  密度可达  $\Rightarrow x_j \in C$ 。

于是, DBSCAN 算法先选取数据集  $D$  中的任意一个数据作为起始点, 然后从这个数据点出发进行相应的聚类。算法先通过参数( $\epsilon, MinPts$ )找出数据集中的所有核心对象; 然后选择任一核心对象为起始点, 在数据集  $D$  中寻找可由其密度可达的样本, 生成聚类簇, 直到所有核心对象都被访问过。

步骤:

Step1: 设定邻域参数( $\epsilon, MinPts$ );

Step2: 找出各样本的  $\epsilon$ -邻域, 并确定核心对象集合  $\Omega$ ;

Step3: 从中随机选取一个数据作为起始点, 找出由它密度可达的所有数据, 这些数据就构成了第一个聚类簇  $C_1$ ;

Step4: 将  $C_1$  中的所有核心对象从  $\Omega$  去除:  $\Omega = \Omega / C_1$ ;

Step5: 再从更新后的集合  $\Omega$  中随机选取一个核心对象作为起始点来生成下一个聚类簇;

不断重复上述过程, 直至  $\Omega$  为空。数据集  $D$  中不属于任何簇的样本被认为是噪声或者异常样本。

## 2 ISAR 像填充

空间 ISAR 像与光学像有所不同, ISAR 像是由孤立、稀疏的散射点构成的二维像, 不利于后续图像形状特征的提取, 因此必须对其采取一定的方法进行填充和平滑, 然后才能对其进行形状特征提取。

针对 ISAR 像固有的特点, 本文采取形态学方法对其进行填充。形态学膨胀处理需要定义结构元素的大小, 其大小需根据实际情况进行相应的调整, 本文使用半径为 5 的圆形结构元。

形态学处理主要包含 2 种方法: 膨胀和腐蚀<sup>[19]</sup>。假设用  $\zeta$  表示二维离散欧几里德空间,  $b$  是  $\zeta$  内的一个点, 图像  $A$  和结构元素  $B$  是  $\zeta$  的一个子集。图像  $A$  被  $b$  平移后的结果为  $A_b$ , 即:

$$A_b = \{a+b | a \in A\} \quad (2)$$

其含义为  $A_b$  中的元素是  $A$  中的元素平移到以  $b$  为原点的坐标系内的结果。

腐蚀运算定义为:

$$A \odot B = \{x | b+x \subset A, b \in B\} \quad (3)$$

膨胀运算定义为:

$$A \oplus B = \{a+b | a \in A, b \in B\} \cup A_b \quad (4)$$

腐蚀运算是通过结构元对图像进行“减”的操作, 可以去除一些离散、孤立的与主体部分不连接的点。膨胀运算是通过结构元对图像进行“加”的操作, 可去除目标内部“空洞”, 实现图像的联通。结构元素的大小需要根据实际情况进行调整, 没有统一的标准。在形态学处理中, 对图像先进行腐蚀然后再进行膨胀的操作称为开运算; 对图像先进行膨胀后进行腐蚀的操作称为闭运算。开运算和闭运算是形态学处理中 2 种非常重要的运算方法。

形态学滤波的结果通常受结构元素选择的影响, 结构元素的形状和大小都会对结果产生一定的影响。如果选取的结构元素过小, 则填充后的图像依然会存在“空洞”; 如果选取的结构元素过大, 则会使填充后的图像失真, 形状特征提取失去意义。所以选择结构元素的形状和大小, 一定要根据图像的形状大小和离散程度去综合考虑, 选取合适的结构元素。图 3(a)是去除斑点干扰和横条纹干扰之后的 ISAR 像, 经过形态学处理后见图 3(b)。

### 3 ISAR 图像特征提取

由于目标的几何特征具有直观性、分辨性、易于提取并且具有明确的物理意义, 同时也具有一定的识别能力, 因此利用几何特征进行目标识别早已广泛应用, 但是对客观条件要求比较严格, 例如方位的稳定像、较高的信噪比等。

几何特征包括一切表述目标形状的特征, 例如目标的周长、面积、目标的长度和宽度、目标的轮廓、目标的离心率等。几何特征是目标识别中的一种重要特征。本文研究 3 个常用的 ISAR 像特征: 面积、长度、多普勒扩展特征。定义如下:

1) 面积特征:

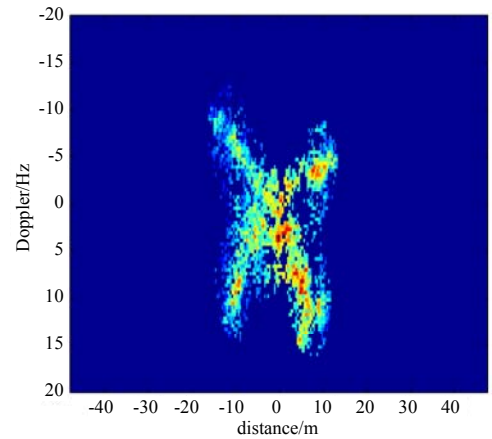
$$S = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j) \cdot d_r \cdot d_D \quad (5)$$

式中:  $f(i, j)$  为 ISAR 像对应的二值图像, 取值为 0 或者 1;  $d_r$  和  $d_D$  分别为距离单元与多普勒单元长度;  $M$  为多普勒维单元数目;  $N$  为距离维的单元数目。由于高分辨雷达电磁像的特性决定了雷达对目标的分辨率不会随目标的远近而改变, 即雷达所能成像的范围内, 分辨率是不会改变的, 所以目标面积具有平移、旋转不变性。

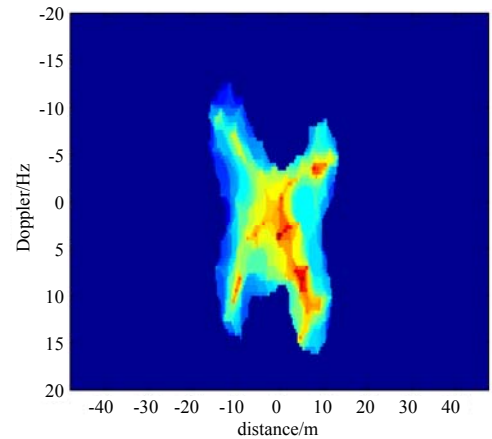
2) 长度特征:

$$L = L_r - L_l \quad (6)$$

$$\text{式中} \quad L_l = \min j, \quad L_r = \max j, \quad \text{s.t.} \quad f(i, j) = 1 \quad (7)$$



(a) ISAR images processed by detection and clustering



(b) ISAR images processed by filling

Fig.3 ISAR images processed by detection, clustering and filling  
图 3 ISAR 像检测聚类 and 填充处理

3) 多普勒扩展特征:

$$D = D_{\text{down}} - D_{\text{up}} \tag{8}$$

$$D_{\text{up}} = \min i, D_{\text{down}} = \max i, \quad \text{s.t.} \quad f(i, j) = 1 \tag{9}$$

### 4 仿真实验与分析

ISAR 像预处理的目的, 即提高目标图像稳定性以利于后续的认识处理。本文使用外场实测数据进行验证, 以说明本文方法的有效性。用中心频率为 5 520 MHz, 带宽 400 MHz 的雷达照射雅克飞机和 An-26 飞机得到的回波数据进行距离多普勒成像, 之后对 ISAR 像进行斑点、横条纹干扰抑制, 并与未经处理以及经过传统方法处理后的数据一起进行特征提取, 通过计算多幅图像序列的特征方差, 验证本文所提方法的有效性。

图 4 和图 5 分别给出了 An-26 飞机和雅克飞机的 ISAR 图像预处理效果。传统的图像预处理方法可以简单快速地进行图像预处理, 但是对横条纹干扰的处理过于粗糙, 目标自身的一些弱散射点可能也会被删除, 从而导致特征信息的丢失, 见图 4(b); 同时经过处理后, 一些强干扰或者横条纹干扰也可能保留下来, 见图 5(b)。而本文提出的方法通过检测聚类处理, 可以保留飞机本身更多的细节信息, 横条纹干扰与噪声干扰可以去除得更干净。通过对 2 种不同型号飞机的预处理也说明了本文方法具有一定的通用性。

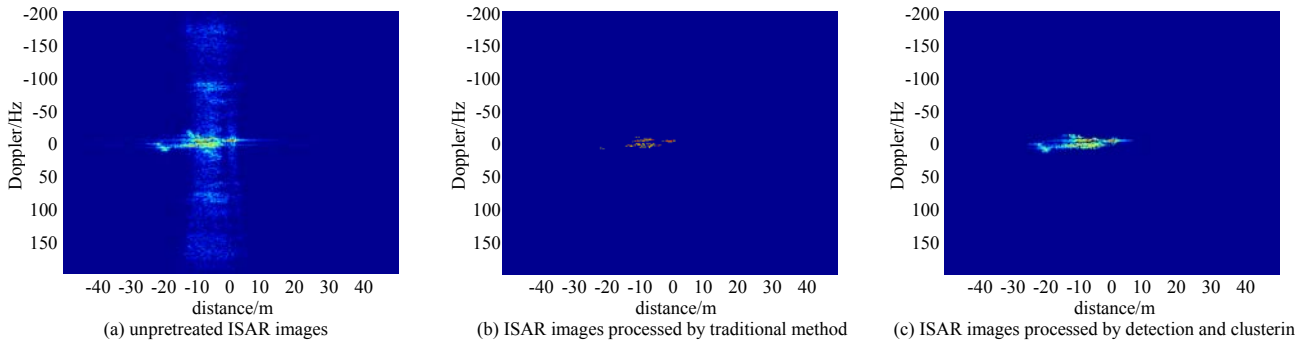


Fig.4 Comparison of two pretreatment methods for An-26

图 4 An-26 飞机 2 种预处理方法对比

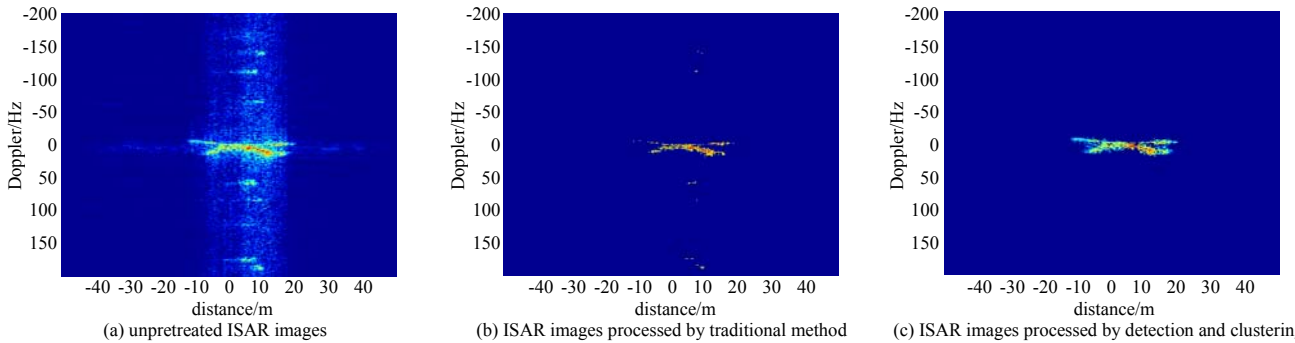


Fig.5 Comparison of two pretreatment methods for Jacques

图 5 雅克飞机 2 种预处理方法对比

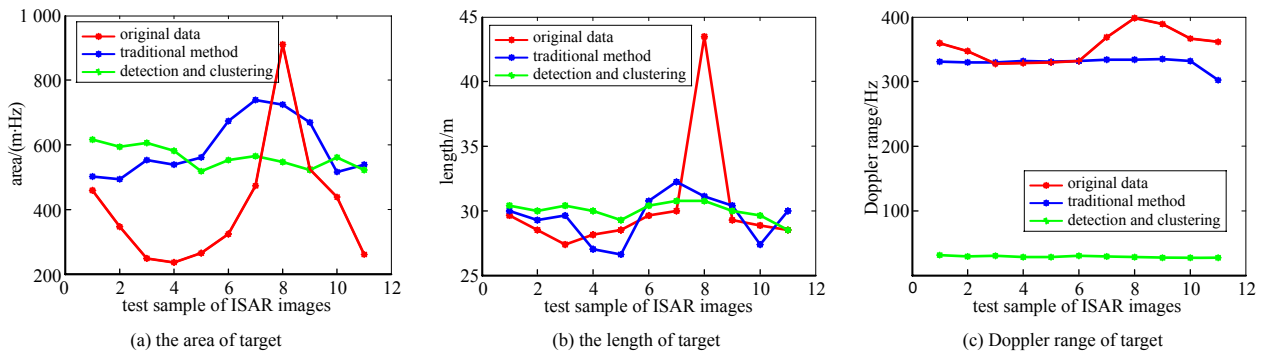


Fig.6 Feature extraction results of Jacques

图 6 雅克飞机特征提取结果

采用雅克飞机实测数据进行ISAR图像序列生成、图像预处理和特征提取分析。试验中连续获取了11幅ISAR图像，图像之间目标姿态相对稳定。本文提取了ISAR像的面积、长度、多普勒扩展特征作为特征向量，从图6和表1可以看出，经过本文预处理后识别特征的稳定性较未经处理的和经过传统方法处理的稳定性更强；未经过预处理和经过传统方法预处理的ISAR像，由于横条纹干扰和斑点干扰未完全消除，对多普勒扩展特征产生了严重的影响，见图5(c)。可以看出本文预处理方法对横条纹干扰和斑点干扰的去除更加有效。

表1 ISAR像的测试样本的方差  
Table1 Variance of the ISAR image test sample

	area/(m·Hz)	length/m	Doppler range/Hz
original data	186.40	4.28	23.60
traditional method	87.56	1.71	8.61
detection and clustering	32.34	0.64	1.26

## 5 结论

基于ISAR像的目标识别是目标识别中一种重要的方法，但由于噪声干扰和成像机理等原因导致ISAR像不够稳定，因此在提取图像特征前需要对图像进行预处理以提高图像稳定性。本文提出了一种基于恒虚警检测和密度聚类的ISAR图像预处理方法，首先对ISAR像的斑点干扰和横条纹干扰进行了有效的抑制，然后对图像进行形态学处理。进一步地对预处理后的ISAR像进行了识别特征的提取，得到了更加稳定有效的目标特征向量。相比于传统方法可以在去除干扰的同时保留更多的目标细节信息，避免特征信息的丢失。仿真实验表明，本文方法有效去除了干扰对图像质量的影响，提高了ISAR像的图像稳定性，且较其他方法更好，有利于后续的特征提取和目标识别。

## 参考文献：

- [1] SAIDI M N, TOUMI A, HOLTZENER B. Pose estimation for ISAR image classification[C]// 2010 IEEE Geoscience & Remote Sensing Symposium. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2010: 4620-4623.
- [2] SAIDI M N, DAOUDI K, KHENCHAF A, et al. Automatic target recognition of aircraft models based on ISAR images[C]// 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu, Hawaii, USA: IEEE, 2010, 4: 685-688.
- [3] MYERS V, PINTO M. Bounding the performance of sidescan sonar automatic target recognition algorithms using information theory[J]. Iet Radar Sonar Navigation, 2007, 1(4): 266-273.
- [4] 何强, 蔡洪, 韩壮志, 等. 基于非线性流形学习的ISAR目标识别研究[J]. 电子学报, 2010, 38(3): 585-590. (HE Qiang, CAI Hong, HAN Zhuangzhi, et al. ISAR target recognition based on non-linear manifold[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 585-590.)
- [5] 张兴敢. 逆合成孔径雷达成像及目标识别[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002. (ZHNAG Xinggan. ISAR imaging and targets recognition[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics Astronautics, 2002.)
- [6] 唐宁, 高勋章, 黎湘. ISAR像自动识别中的预处理算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(9): 2002-2006. (TANG Ning, GAO Xunzhang, LI Xiang. Pre-processing of ISAR images in automatic target recognition[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(9): 2002-2006.)
- [7] 李岩, 高梅国, 崔双洋. 认知雷达对抗中的未知雷达状态识别方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(2): 233-238. (LI Yan, GAO Meiguo, CUI Shuangyang. Unknown radar state recognition method for Cognitive Radar Countermeasure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(2): 233-238.)
- [8] ZELJKOVIC V, LI Q, VINCELETTE R, et al. Automatic algorithm for inverse synthetic aperture radar images recognition and classification [J]. Iet Radar Sonar Navigation, 2010, 4(1): 96-109.
- [9] ZELJKOVIĆ V, LI Q, VINCELETTE R, et al. Noise resistant algorithm for radar images recognition and classification[C]// Signal and Data Processing of Small Targets. San Diego, California, United States: SPIE, 2009: 744507-744507-11.
- [10] ZELJKOVIC V, LI Q, VINCELETTE R B, et al. Aircraft identification by unions of ISAR images[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Mobile Multimedia Communications. London, UK: [s.n.], 2009, 37: 1-5.
- [11] SAIDI M N, HOELTZENER B, TOUMI A, et al. Automatic recognition of ISAR images: target shapes features extraction[C]// 2008 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory To Applications. Damascus, Syria: IEEE, 2008: 1-6.
- [12] ROSENBACH K, SCHILLER J. Identification of aircraft on the basis of 2-D radar images[C]// Record of the IEEE 1995 International Radar Conference. Wachtberg Werthoven, Germany: IEEE, 1995: 405-409.