

## 一种 VideoSAR 动目标阴影检测方法

张 营<sup>\*①</sup> 朱岱寅<sup>①</sup> 俞 翔<sup>①②</sup> 毛新华<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 211106)

<sup>②</sup>(南京工程学院计算机工程学院 南京 211167)

**摘 要:** 在高帧率的视频合成孔径雷达(VideoSAR)成像模式获得的图像序列中, 多普勒频移使运动目标在实际位置留下阴影, 且相邻帧图像具有很强相关性。该文针对上述现象提出一种VideoSAR图像中动目标阴影检测的方法。首先, 对每帧图像通过结合尺度不变特征变换(SIFT)和随机抽样一致性(RANSAC)算法实现配准并进行背景补偿, 再采用CattePM模型抑制相干斑噪声。然后通过Tsallis灰度熵的最大化阈值分割方法自动分离目标和背景, 获得二值图像。最后, 对相邻多帧图像背景建模并差分, 再结合三帧间差分法提取动目标阴影, 结果标记至原帧图像相应位置。基于美国Sandia实验室公布的VideoSAR成像片段, 实现了多个移动车辆的检测, 验证了所提算法的有效性。

**关键词:** 视频合成孔径雷达; 动目标阴影检测; 图像配准; 阈值分割; 帧间差分

中图分类号: TN957.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)09-2197-06

DOI: 10.11999/JEIT161394

## Approach to Moving Targets Shadow Detection for VideoSAR

ZHANG Ying<sup>①</sup> ZHU Daiyin<sup>①</sup> YU Xiang<sup>①②</sup> MAO Xinhua<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

<sup>②</sup>(Department of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** In the image sequence obtained by the high frame rate Video Synthetic Aperture Radar (VideoSAR) mode, the Doppler shift results in some shadows of the moving targets in their actual position, and a strong correlation exists between adjacent frames. Based on the above rationale, this paper proposes an approach to detecting moving targets' shadow in VideoSAR imagery. First, the Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) with RANdom SAmple Consensus (RANSAC) registration algorithm is used to compensate for the change of background of each frame, and the CattePM model is employed to suppress the speckle noise effectively. Then, in order to separate the targets and the background and generate binary images automatically, a threshold segmentation algorithm, called maximizing the Tsallis entropy, is applied. Finally, shadow detection is accomplished by the background difference with three frame difference method, and the detection results are marked on the corresponding position in the original frame. Experimental results utilizing the VideoSAR imaging fragment published by Sandia National Laboratories show that multiple moving vehicles are detected effectively, hence the validity of the approach is demonstrated.

**Key words:** Video Synthetic Aperture Radar (VideoSAR); Moving target shadow detection; Image registration; Threshold segmentation; Frame difference

### 1 引言

运动目标检测和分析始终是合成孔径雷达

(Synthetic Aperture Radar, SAR)研究领域的关键和热点。美国 Sandia 实验室在 2003 年提出了 VideoSAR<sup>[1-6]</sup> 的成像模式, 通过对场景高帧率、高分辨率成像, 实现对地面的动态观测, 实时掌握目标区域的相关信息。

目前, 国内对 VideoSAR 动目标检测的研究尚处于起步阶段, 从高帧率的视频图像中获取动目标并进行跟踪是关键技术。目标运动导致图像发生散焦, 但多普勒频移使其在实际位置留下阴影, 因此可根据阴影信息实现 VideoSAR 图像中动目标的检测<sup>[7,8]</sup>。国内外研究人员针对 SAR 动目标检测提出了

收稿日期: 2016-12-29; 改回日期: 2017-04-24; 网络出版: 2017-06-23

\*通信作者: 张营 zhy1994@nuaa.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61671240), 江苏省自然科学基金青年基金(BK20150730), 中央高校基本科研业务费(NZ2016105), 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(kfj20170401)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671240), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province for Youths (BK20150730), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (NZ2016105), The Foundation of Graduate Innovation Center in NUA (kfj20170401)

多种方法,文献[9]针对单幅高分辨率 SAR 图像进行动目标检测,通过简便的形态学方法提取道路信息并进行阴影检测,为了降低漏检,采用恒虚警技术(Constant False Alarm Rate, CFAR)在所检测距离门及附近搜索目标,最后完成目标参数估计。该方法需先通过形态学处理来提取道路这类静止且阴影面积较大的目标的边缘信息,而 SAR 大场景成像中的车辆因高速运动导致目标严重散焦,车辆阴影表现为较小的灰度值,该方法不能准确地提取出目标的大部分信息,造成轮廓的不完整和细节的缺失。文献[10]利用压缩感知技术解决了文献[9]中较小尺寸的目标检测结果不完整的问题,先采用模糊 C 均值的二值化方法进行图像聚类并分块,再结合一定阈值的稀疏表示理论检测动目标,在一定程度上提高了检测性能和估计精度,该方法针对不同运动目标的距离向和方位向速度构造尽可能多的不同散焦度和偏移量的样本图像进行参数匹配和目标检测,计算量较大,耗时较长。文献[11]对感兴趣区域采用计算量偏小的全局 CFAR 技术并结合 KSW 嫡方法完成二值化的阈值分割,然后进行区域生长来计算相应的聚集度特征,判别区域是否包含目标。该方法针对单幅 SAR 图像感兴趣区域的目标进行检测,虚警和目标分离设定的阈值需根据训练样本做相应调整,鉴别特征较少,有应用的局限性。

基于上述问题,本文提出了一种 VideoSAR 图像中动目标阴影检测的方法,首先对 VideoSAR 序列图像进行基于 SIFT 和 RANSAC 的图像配准,完成背景补偿,并通过 CattePM 模型抑制相干斑噪声;然后使用 Tsallis 灰度熵最大化的图像分割方法将所有序列图像自动分离成背景和目标清晰明显的二值图像;最后通过背景建模和三帧间差分法提取动目标,进行简便的数学形态学处理,将检测结果标记至原图像相应位置。相比于依靠单幅 SAR 图像中动目标本身特性及阴影边缘信息的目标提取方法,本文利用 VideoSAR 序列图像进行动目标阴影的检测和标记,更能适用于高帧率变化的图像,具有较强的鲁棒性,能有效地降低目标虚警和漏检率,实现多个运动目标的检测。

## 2 VideoSAR 图像配准

VideoSAR 对观测场景成像并生成序列图像,因雷达平台的运动及其到场景中心距离发生不同程度的变化,导致序列图像间的几何畸变,配准技术能重塑图像间的相关性和一致性,完成 VideoSAR 序列图像的预处理和背景补偿,利于后续的动目标检测和提取。

本文采用 SIFT 和 RANSAC 算法进行 VideoSAR 序列图像间的配准,首先通过高鲁棒性的 SIFT 算法来初步定位相邻图像间的若干特征点,计算对应的描述子,确保尺度缩放和旋转的不变性;然后将提取出的基准图像和待配准图像的特征点进行初次配对,得到它们之间所有描述子的欧式距离并进行相似性度量,计算两幅图中若干关键点的最近与次近欧式距离的比值,并与预设阈值进行比较,小于该阈值代表匹配成功,降低该阈值可减少匹配点数目,增加稳定性。

特征点在配对搜索过程中产生了正确特征点和少数错误点,采用 RANSAC 算法估计待配准图像的空间映射参数,从而得到基准图像下的对应点位置,并通过双线性插值法将待配准图像重采样至基准图像坐标系,重复上述方法完成每一帧 VideoSAR 图像的配准<sup>[12,13]</sup>。

## 3 基于 CattePM 模型的 VideoSAR 图像降噪

VideoSAR 图像存在大量相干斑噪声并对后续目标分离的精确性造成影响,采用各向异性的 CattePM 算法对序列图像进行降噪处理,能很大程度上抑制噪声<sup>[14]</sup>。

CattePM 算法的大致思路是采用具有高斯平滑处理的梯度模来计算扩散方程,进而控制扩散程度。高斯平滑函数能有效地抑制噪声,边界梯度信息能清晰地反映出来,表现出更大的差异性,方程表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial t} &= \operatorname{div} \left[ c \left( \|\nabla (G_\sigma * \mathbf{I})\| \right) \cdot \nabla \mathbf{I} \right] \\ \mathbf{I}(t=0) &= \mathbf{I}_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{I}_0$  表示含噪图像,而  $\mathbf{I}$  是经降噪处理的图像;  $G_\sigma(x) = C\sigma^{-1/2}\exp(-x^2/4\sigma)$  是高斯核函数,方差  $\sigma$  为滤波尺度,  $t$  是用于表示降噪过程与扩散持续时间相关的时间算子,  $\operatorname{div}$  为散度算子,  $\|\cdot\|$  为向量模值,  $*$  表示卷积,  $c(\|\nabla G_\sigma * \mathbf{I}\|)$  为扩散方程,如果  $c(\|\nabla G_\sigma * \mathbf{I}\|)$  处于  $p$  位置  $t$  时刻的值记为  $\alpha_p^t$ ,那么 CattePM 方程的离散化形式为

$$\mathbf{I}_p^{t+1} = \mathbf{I}_p^t + \lambda \sum_{q \in \eta_p} c(\alpha_p^t + \alpha_q^t) \nabla \mathbf{I}_{p,q}^t \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  代表扩散程度的常数,  $\mathbf{I}_p^t$  为目标图像的离散化形式,  $p$  为像素点在坐标系中的位置信息,  $|\eta_p|$  表示  $p$  点的邻域空间,通常取值为 4。

各向异性的 CattePM 模型能很好地抑制 VideoSAR 图像中的相干斑噪声,但过大的  $\sigma$  会模

糊图像的特征，过小时会形成“阶梯效应”，可根据  $\sigma$  动态取值来改变降噪程度，达到背景平滑、目标清晰的效果。

#### 4 基于 Tsallis 灰度熵的最大化阈值分割

考虑到 VideoSAR 序列图像中目标与背景对比度较小，阴影边缘信息不明显，采用 Tsallis 灰度熵的最大化阈值分割技术自动分离图像的目标和背景，Tsallis 熵具有非广延性，图像内部存在全局性的长程关联，能很大程度地将不同灰度级目标和背景分开。

任意设定两个概率分布  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  和  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_N\}$ ，满足  $p_i \geq 0$  且  $q_i \geq 0$ ， $\sum_{i=1}^N p_i = \sum_{i=1}^N q_i = 1$ 。存在于  $P$  和  $Q$  之间的 Tsallis 熵表达式为

$$D_q(P|Q) = -\sum_{i=1}^N p_i \ln_q \frac{q_i}{p_i} \quad (3)$$

此处的  $\ln_q(\xi)$  解释为  $\ln_q(\xi) = \frac{\xi^{1-q} - 1}{1-q}$ ，且  $\ln_q(\infty) = 0$ ，

非广延参数  $q$  描述了各个像素点灰度间的关联程度，在形式上增加了 Boltzman-Gibbs(BG)统计的预测能力。

因此，在  $q \rightarrow 1$  时的 Tsallis 熵可以重新定义为

$$\lim_{q \rightarrow 1} D(P|Q) = D_1(P|Q) = \sum_{i=1}^N p_i \ln \frac{p_i}{q_i} \quad (4)$$

一幅图像被分成  $L$  级灰度，每个灰度级的概率分布为  $\{p_1, p_2, \dots, p_L\}$ ，通过判定阈值  $T$  可将其分割为目标和背景清晰的二值图像。

$$P_A: \frac{p_1}{P^A}, \frac{p_2}{P^A}, \dots, \frac{p_T}{P^A} \quad (5)$$

$$P_B: \frac{p_{T+1}}{P^B}, \frac{p_{T+2}}{P^B}, \dots, \frac{p_L}{P^B} \quad (6)$$

式中， $P^A = \sum_{i=1}^T p_i$ ， $P^B = \sum_{i=T+1}^L p_i$ 。从而得到目标和背景的 Tsallis 灰度熵分别为

$$S_q^A(T) = \frac{1 - \sum_{i=1}^T \left(\frac{p_i}{P^A}\right)^q}{q-1} \quad (7)$$

$$S_q^B(T) = \frac{1 - \sum_{i=T+1}^L \left(\frac{p_i}{P^B}\right)^q}{q-1} \quad (8)$$

最后经阈值分割后获得图像的总 Tsallis 熵为

$$\begin{aligned} S_q(T) &= S_q^A(T) + S_q^B(T) + (1-q) \cdot S_q^A(T) \cdot S_q^B(T) \\ &= \frac{1}{q-1} - \frac{1}{q-1} \cdot \sum_{i=1}^T \left(\frac{p_i}{P^A}\right)^q \cdot \sum_{i=T+1}^L \left(\frac{p_i}{P^B}\right)^q \end{aligned} \quad (9)$$

Tsallis 熵函数  $S_q(T)$  的最大信息量对应于目标和背景的交界处，此时两者类内像素的  $p_i/P^A$  或

$p_i/P^B$  最为接近，且灰度级趋于均匀，通过求解  $S_q(T)$  所对应的最佳灰度值  $T$ ，从而实现目标和背景的有效分离。

$$T_{\text{opt}} = \arg \max [S_q(T)] \quad (10)$$

不同的非广延参数  $q$  的选取会造成最佳阈值的差异，由于目前没有可靠的证明描述  $q$  值和图像类别的关系<sup>[15]</sup>，因此实际应用中为了获取较为理想的分割结果，可根据不同  $q$  值对应阈值  $T$  的统计曲线，以此确定阈值变化较为平稳的范围。

#### 5 结合背景差分和三帧间差分法的动目标提取

经阈值分割处理后，得到了目标清晰的二值序列图像，因分割结果存在较少的干扰项，故采用简单快速的中值法进行背景建模。图像灰度值只有 0 和 1，背景图像的某一点的灰度值取决于对应中值大小，可利用相邻多帧图像生成背景图像，初始模型建立后需进行更新操作，最后将每帧对应的二值图像与背景图像相减即可得到大致的运动目标图像  $I_b$ <sup>[16]</sup>。

帧间差分法能较好地获取动目标的轮廓信息，连续两帧差分法会造成检测到的动目标结果比实际多，且只是对比并提取两帧间的差别，忽略了自身重叠部分的信息，此处采用三帧间差分方法，具体步骤如下：

步骤 1 相邻三帧图像分别为  $I_x, I_y, I_z$ ，得到  $I_x$  和  $I_y$  的差分结果  $I_m$ ， $I_y$  和  $I_z$  的差分结果  $I_n$ 。

步骤 2 获得三帧差分图像  $I_d$ 。

$$I_d = I_m \cap I_n \quad (11)$$

将上述两种方法分别获得的图像  $I_b$  和  $I_d$  按照式(12)完成动目标的提取，随着帧数的增加，应不断更新背景并结合三帧间差分结果从而得到每帧图像的动目标和干扰引起的阴影。

$$I_f = I_b \cup I_d \quad (12)$$

数学形态学中常用的腐蚀和膨胀方法能够消除结果中较小的干扰点，使运动目标更加完整和封闭，随后通过 8 邻域的连通域检测方法扫描整个区域，统计检测到的连通域(即动目标)数目并填色标记，最后利用图像相加性将检测结果融合至配准图像的相应位置。

综上所述，VideoSAR 动目标阴影检测的过程可以归结为一幅流程图，如图 1 所示。

#### 6 实验结果与分析

为了验证本文动目标阴影检测方法的有效性，应用美国 Sandia 实验室公布的 Kirtland 空军基地的

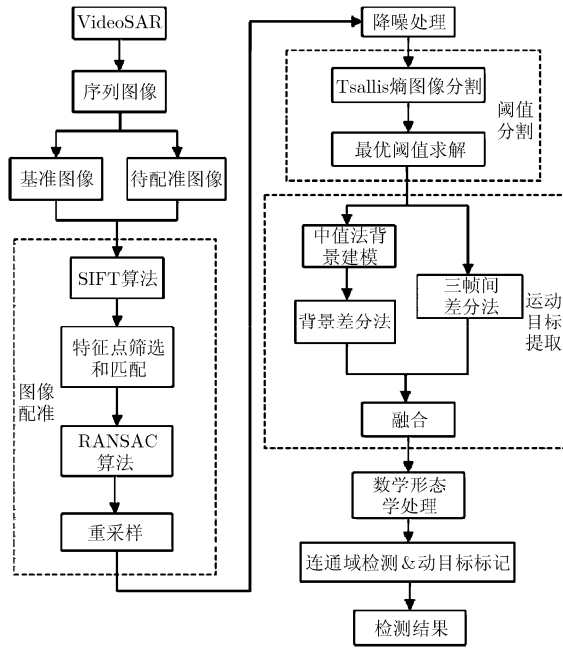


图1 VideoSAR 动目标阴影检测流程图

高分辨率VideoSAR成像片段完成了处理和检测, 视频中道路以外闪动的亮线是由移动车辆多普勒频移产生的, 车辆的实际位置表现为沿道路方向移动的阴影, 其他阴影信息为静止目标。本文方法的相关参数如下: 成像片段的帧率为5 FPS; 降噪过程中 $\lambda$ 取值为1/7,  $\sigma$ 取值为100, 迭代次数为30; 快速分

割算法的非广延参数 $q$ 设置为0.8, 利用式(10)计算可得两帧对应的最佳阈值 $T$ 分别是41和43。VideoSAR成像片段包含100幅序列图像, 考虑到篇幅限制, 对应于方法流程图1, 图2和图3为随机选取的第20帧和第39帧图像的各部分检测结果。

从图2和图3的VideoSAR动目标检测各部分结果可以看出, 高帧率的VideoSAR图像中移动车辆阴影因自身散射特性表现为较浅的灰度, 且雷达系统因载机受到气流扰动等因素造成每帧图像位置关系略有不同。根据每帧图像的特征和映射参数完成所有序列图像的配准和背景补偿, 配准结果的精度可根据正确匹配点占比和对应特征点的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)进行定量评价, 表达式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^N \|f(x, M) - y\|^2}{N}} \quad (13)$$

式中,  $x$ 和 $y$ 为一对匹配点,  $N$ 为正确匹配点数, RMSE可反映不同特征点映射的准确性。基准图像设定为VideoSAR的第1帧图像, 经实验所得, 第20帧和第39帧的特征点分别是98和104, 最终正确匹配点为83和89, 对应的占比为84.7%, 85.6%, 而RMSE结果分别是0.2和0.23, 说明特征点匹配的准确度较高, 基地道路和车辆等均发生了相对移动和旋转, 配准过程信息丢失较少, 使所有帧图像背景保持较高精度的背景补偿和一致性; 经CattePM模型抑制

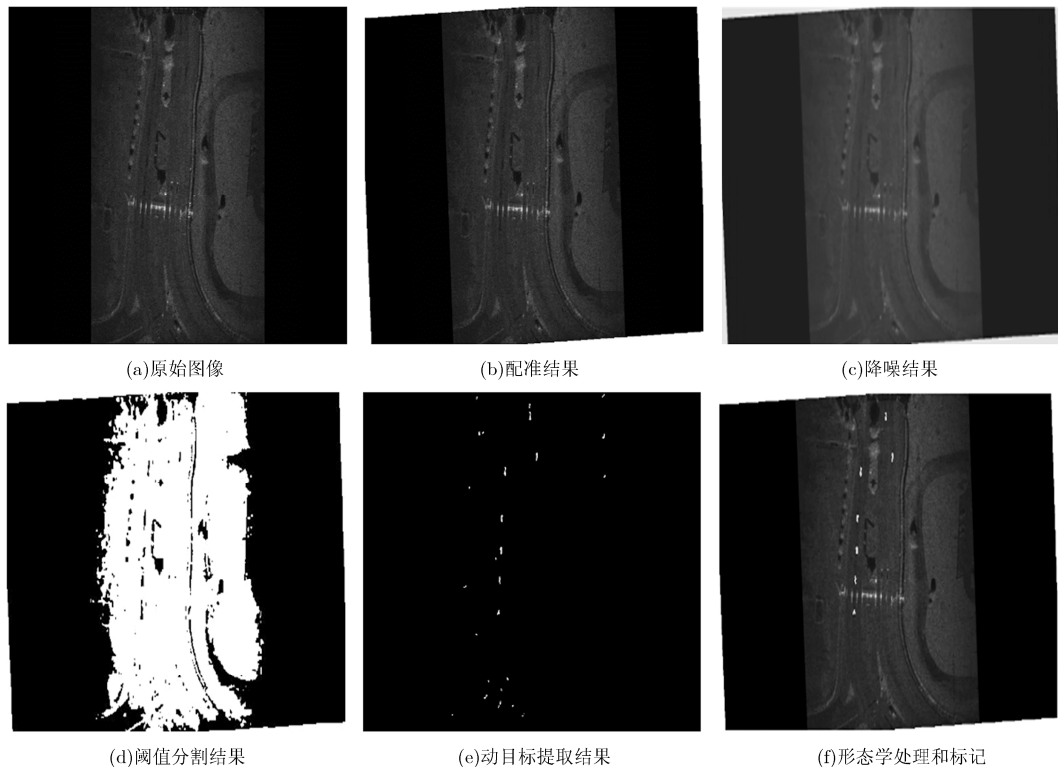


图2 第20帧VideoSAR图像检测结果

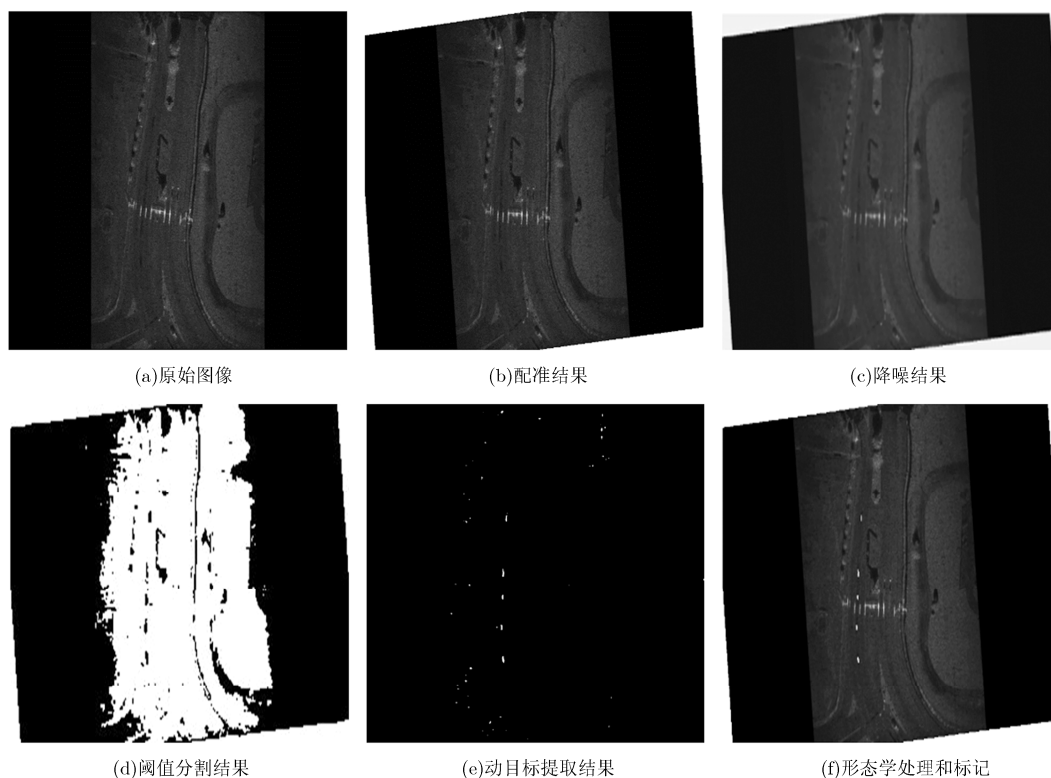


图 3 第39帧VideoSAR图像检测结果

相干斑噪声后，平滑了大部分相干斑噪声，并降低了图像整体的灰度，可为后续处理很大程度地减少噪声等干扰项的影响。快速阈值分割技术获得了对比度清晰的二值图像，目标阴影被自动分离出来，并保留了全部静止和移动目标；经相邻多帧图像完成中值法建模并结合背景差分和三帧间差分法提取动目标后，基本上消除了背景信息，图中阴影面积较大者即为移动车辆信息，不同于低噪声的光学图像，VideoSAR 图像的自身分辨率、配准、降噪及后处理过程中难以避免的误差造成了图像存在小面积阴影，采用极简便的形态学方法去除，连通域检测技术统计得到动目标数目并填色标记，两幅结果图中各包含了 7 个、5 个移动车辆，显示了移动车辆的实际位置，实现了每帧图像中多个移动车辆的检测和标记。从 VideoSAR 成像视频片段的检测结果可以看出，道路左侧的 5 个车辆向下(南)行驶一段距离，而右侧的 2 辆则向上(北)驶出了目标场景，因场景中车辆速度、位置的不断变化，加上多普勒频移和不同的散焦量等因素导致了同一车辆经 VideoSAR 成像后实际阴影的灰度和形状略有不同。

## 7 结束语

本文根据 VideoSAR 图像的高帧率、高分辨率特点，动目标以变化阴影的形式存在于强相关性的序列图像中，为 VideoSAR 图像的动目标阴影检测提供

了一种有效方法。(1)配准和降噪的预处理过程实现了较高精度的背景补偿和相干斑噪声的抑制，极大地减少了对后续检测的干扰。(2)阈值分割技术自动分离了目标和背景，图像对比度更加清晰且目标轮廓完整，算法的运算量小，分割速度快。(3)本文方法有效地排除了背景杂波和配准误差引起的虚假目标，准确地标记了动目标的实际位置。

## 参考文献

- [1] WELLS L, SORENSEN K, DOERRY A, *et al.* Developments in SAR and IFSAR systems and technologies at Sandia national laboratories[C]. 2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings, Big Sky, Montana, USA, 2003, Vol. 2: 1085-1095. doi: 10.1109/AERO.2003.1235522.
- [2] MILLER J, BISHOP E, and DOERRY A. An application of backprojection for video SAR image formation exploiting a subaperture circular shift register[C]. Proceedings of SPIE Defense, Security, and Sensing, Baltimore, Maryland, USA, 2013: 874609.
- [3] LIU B, ZHANG X P, TANG K, *et al.* Spaceborne video-SAR moving target surveillance system[C]. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016: 2348-2351. doi: 10.1109/IGARSS.2016.7729606.
- [4] ZHAO S, CHEN J, YANG W, *et al.* Image formation method for spaceborne video SAR[C]. 2015 IEEE 5th Asia-Pacific

- Conference on Synthetic Aperture Radar, Marina Bay Sands, Singapore, 2015: 148–151. doi: 10.1109/APSAR.2015.7306176.
- [5] DAMINI A, MANTLE V, and DAVIDSON G. A new approach to coherent change detection in VideoSAR imagery using stack averaged coherence[C]. 2013 IEEE Radar Conference, Ottawa, Ontario, Canada, 2013: 1–5. doi: 10.1109/RADAR.2013.6586152.
- [6] HAWLEY R W and GARBER W L. Aperture weighting technique for video synthetic aperture radar[C]. Proceedings of SPIE Defense, Security, and Sensing, Orlando, Florida, USA, 2011: 805107.
- [7] RAYNAL A M, BICKEL D L, and DOERRY A W. Stationary and moving target shadow characteristics in synthetic aperture radar[C]. Proceedings of SPIE Defense, Security, and Sensing, Baltimore, Maryland, USA, 2014: 90771B.
- [8] JAHANGIR M. Moving target detection for synthetic aperture radar via shadow detection[C]. 2007 IET International Conference on Radar Systems, Edinburgh, UK, 2007: 1–5. doi: 10.1049/cp:20070659.
- [9] 史洪印, 侯志涛, 郭秀花, 等. 基于阴影检测的单幅高分辨 SAR 图像动目标检测方法[J]. 信号处理, 2012, 28(12): 1706–1713. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2012.12.011.
- SHI Hongyin, HOU Zhitao, GUO Xiuhua, *et al.* Moving targets indication method in single high resolution SAR imagery based on shadow detection[J]. *Journal of Signal Processing*, 2012, 28(12): 1706–1713. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2012.12.011.
- [10] 史洪印, 张诺. 基于稀疏表示和道路辅助的单幅 SAR 图像运动目标检测方法[J]. 电子学报, 2015, 43(3): 431–439. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.003.
- SHI Hongyin and ZHANG Nuo. Moving targets indication method in single SAR imagery based on sparse representation and road information[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(3): 431–439. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.003.
- [11] 张小强, 熊博莅, 匡纲要. 一种基于变化检测技术的 SAR 图像舰船目标鉴别方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(1): 63–70. doi: 10.11999/JEIT140143.
- ZHANG Xiaoqiang, XIONG Boli, and KUANG Gangyao. A ship target discrimination method based on change detection in SAR imagery[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(1): 63–70. doi: 10.11999/JEIT140143.
- [12] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91–110.
- [13] 申浩, 李书晓, 申意萍, 等. 航拍视频帧间快速配准算法[J]. 航空学报, 2013, 36(6): 1405–1413. doi: 10.7527/S1000-6893.2013.0239.
- SHEN Hao, LI Shuxiao, SHEN Yiping, *et al.* Fast interframe registration method in aerial videos[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 36(6): 1405–1413. doi: 10.7527/S1000-6893.2013.0239.
- [14] CATTE F, LIONS P, MOREL J, *et al.* Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion[J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1992, 29(3): 182–193.
- [15] ALBUQUERQUE M P, ESQUEF I A, and GESUALDI MELLO A R. Image thresholding using Tsallis entropy[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2004, 25(9): 1059–1065. doi: 10.1016/j.patrec.2004.03.003.
- [16] TSAI D M and LAI S C. Independent component analysis-based background subtraction for indoor surveillance[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(1): 158–167. doi: 10.1109/TIP.2008.2007558.
- 张 营: 男, 1994 年生, 博士生(硕博连读), 研究方向为合成孔径雷达成像及目标检测.
- 朱岱寅: 男, 1974 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.
- 俞 翔: 男, 1982 年生, 讲师, 研究方向为逆合成孔径雷达成像技术.
- 毛新华: 男, 1979 年生, 副教授, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.