

基于稀疏环决策的天空背景红外弱小目标检测算法

丁云^{1,2}, 卢海涛³, 张国华^{1,2}, 张生伟^{1,2}

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳, 471000; 2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳, 471000; 3. 空装重点型号部, 北京 100843)

摘要: 针对天空背景红外图像中弱小目标检测的难题, 分析了红外目标检测的模型, 提出了基于稀疏环决策的目标检测算法。利用数学形态学滤波目标增强方法对图像进行背景抑制, 而后采用恒虚警检测方法对滤波后图像进行自适应分割, 从而获得候选目标点, 然后计算各个候选目标点的局部自相似性描述子, 对自相似性描述子归一化、分块之后得到稀疏环表示, 利用相应的判断准则可以判别目标点与虚警点。实验结果表明, 该算法应用于复杂云层背景弱小红外目标图像能够得到较理想的结果, 与移动管道滤波方法相比, 能有效区别目标点与固定云层杂波干扰, 并且虚警率低, 易于实现。

关键词: 目标检测; 红外目标; 弱小目标; 稀疏环; 形态学滤波; 恒虚警

中图分类号: V274.1; TP391 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2015)04-0032-04

Sparse Ring Decision Based Algorithm for Detecting Infrared Dim Target Against Sky Background

DING Yun^{1,2}, LU Hai-tao³, ZHANG Guo-hua^{1,2}, ZHANG Sheng-wei^{1,2}

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China; 2. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China; 3. Air Force Armament Department, Beijing 100843, China)

Abstract: Aiming at the problem of dim target detection in infrared images with sky background, the detection model of infrared targets is analyzed and a detection algorithm was put forward based on the sparse ring decision. The morphological filtering target enhancement method was used for background suppression, then the Constant False Alarm Rate (CFAR) detection method was adopted for image adaptive segmentation to get candidate target points. The Local Self-Similarity (LSS) descriptors of candidate target points were calculated out, and sparse ring was obtained by normalizing the LSS descriptors and partitioning. By means of appropriate criterion, the target point and false alarm points can be distinguished. Experiments show that: 1) The algorithm can get ideal results when applied to infrared images with dim and small target against clutter cloud background; and 2) Comparing with moving pipeline filter algorithm, it has lower false alarm rate and is easier for implementation.

Key words: target detection; infrared target; dim target; sparse ring; morphological filtering; CFAR

0 引言

随着武器系统的发展, 现代战争要求在更远距离和更复杂条件下准确地发现目标, 从而为作战员提供更多的反应时间来做好战斗准备, 因此红外预警系统成为了各国相关机构研究的热点, 其中, 红外弱小目标检测决定着系统的探测能力和作用距离, 是反映红外

目标探测识别能力至关重要的一项核心技术。但是, 由于红外弱小目标本身没有形状和纹理特征, 再加上复杂的背景以及噪声干扰, 弱小目标很容易淹没在背景中, 很难被有效地检测出来。针对这个难题, 各国的研究学者提出了很多弱小目标检测技术, 如时域滤波^[1]、频域滤波^[2]、匹配滤波^[3]、概率神经网络^[4]等, 这些算法在信噪比较高时检测效果不错, 但是当目标运动很快或者具有固定云层杂波干扰产生大量的虚假目标时, 通常导致检测失败, 使红外预警系统的性能大打折扣。因此, 研究如何在保证弱小目标检测能力的同时降低虚警率, 是有效提升红外预警系统性能的关键。

收稿日期: 2014-11-11

修回日期: 2014-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(61273075)

作者简介: 丁云(1989—), 男, 江西上饶人, 硕士生, 研究方向为图像目标检测、目标跟踪。

本文针对复杂云层背景的天空图像,提出了基于稀疏环决策的天空红外弱小目标的检测算法,利用形态学滤波、恒虚警对图像预处理后,初步得到可疑目标,再对可疑目标得到稀疏环表示后剔除虚警点。实验证明,在处理复杂的云层背景红外图像时,该算法能有效地区分目标点与虚警点,虚警率低。

1 算法过程分析

1.1 红外目标检测模型

红外目标图像可以认为由3部分组成:目标图像、背景图像和噪声干扰^[5]。目标红外辐射强度与其周围自然背景的辐射强度不相关,并且一般都高于背景的辐射强度,因此,目标可看作是图像中的孤立亮斑,处于图像的高频部分。背景辐射主要指能辐射红外线的自然辐射源,在空间上往往呈大面积的连续分布状态,具有较大的相关性,主要是缓慢变化的低频部分。红外图像平面上的噪声与背景像素不相关,空间分布是随机的,帧间没有相关性,也属于高频部分。根据上述红外图像模型,经典的目标检测模型包括背景抑制、图像分割和多帧关联3个重要环节,如图1所示。

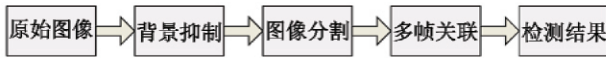


图1 经典目标检测模型

Fig.1 Classical target detection model

目标增强是为了抑制起伏的云层背景,增强目标,提高目标信杂比。常用的有均值滤波、中值滤波、双边滤波以及形态学滤波等。图像分割算法主要实现自适应地从背景抑制图像中提取可疑目标,图像分割结果中不可避免存在部分噪声像素,这些分割出来的噪声像素容易被判别为目标而成为虚警,因此一般采用多帧关联算法进行噪声虚警抑制,多帧关联算法包括管道滤波方法^[6]等。通过实验仿真对比,本文将采取形态学滤波以及恒虚警检测对图像进行可疑目标提取。

1.2 形态学滤波目标增强算法

数学形态学^[7-8]是一种非线性滤波方法,基本运算主要有膨胀、腐蚀、开运算和闭运算4种。基于这些基本运算可以推导和组合出各种数学形态学的实用算法。

用 b 开启 f 记为 $f \circ b$,其定义为

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b \quad (1)$$

用 b 闭合 f 记为 $f \cdot b$,其定义为

$$f \cdot b = (f \oplus b) \ominus b \quad (2)$$

Top-Hat 算子定义为

$$H_{\text{TH}}(f) = f - (f \circ b) \quad (3)$$

形态学算法的性能优劣取决于结构元的选取,如

何选择最优的结构元,是形态学操作的关键。结构元的选取一般应遵循如下原则:1) 根据输入目标先验信息,并考虑变换后的后续运算,选取与之相适应的结构元素;2) 结构元必须在几何结构上比原图像简单,且有界;3) 结构元素的形状最好具有某种凸形,如长方形、正方形、圆形、十字形等。综合考虑以上3个原则,选取 1×7 的扁平结构元,采用 Top-Hat 算子进行背景抑制,目标增强。

1.3 恒虚警(CFAR)检测

由于弱小目标和背景灰度对比度不大,而且灰度分布往往接近或者交叠,很难只用固定的阈值直接对原始图像分割提取目标,如图2所示。本文采用自适应的阈值方法,同时为了在复杂多变的云层杂波环境中保持恒定的虚警概率,选择改进的恒虚警(CFAR)检测方法^[9]。

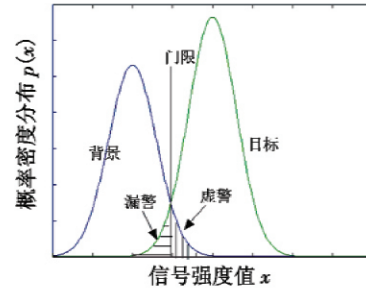


图2 图像分割

Fig.2 Image segmentation

具体的门限取法如下所述。

1) 求图像均值和方差。假设预处理之后图像大小为 $M \times N$,则

$$\mu = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - \mu]^2 \quad (5)$$

2) 根据自适应恒虚警阈值公式求阈值 T

$$T = \mu - a\sigma\Phi^{-1}(P_f) \quad (6)$$

式中: a 为调整因子; P_f 为虚警概率。

3) 根据阈值 T 就可以对图像进行二值化

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & f(x, y) < T, \text{为背景} \\ 255 & f(x, y) \geq T, \text{为目标} \end{cases} \quad (7)$$

从而实现恒虚警检测。

1.4 稀疏环表示

传统的管道滤波等方法在面对具有固定云层干扰的情况下,由于干扰帧间关联性较强,管道滤波方法很难去掉云层干扰,为了解决前端处理后存在云层杂波,根据目标点与背景局部特性的区别,采用稀疏环表示(SRR)来描述背景和目標间的差异。

文献[10]的局部自相似性(local self-similarity)能

表达较小区域内的相似性,主要被用于检测和识别具有具体性质和纹理的目标。在本文中,采用一种简单而有效的稀疏环表示来区分背景和目标。对于每个像素 p ,计算其自相似性描述子 d_p ,如图 3 所示。

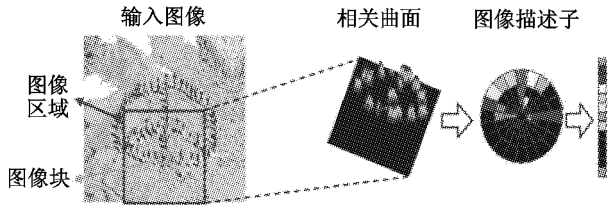


图 3 在图像像素上提取 LSS 描述子

Fig. 3 Extracting the LSS descriptor at an image pixel

内环图像块 Q 与以 p 为中心的较大外环图像区域 R 相比较,利用简单的平方差和(SSD)计算两者之间的距离平面 $S_{ssd,p}(x,y)$,公式为

$$S_{ssd,p}(x,y) = \sum_{i,j} |Q(i,j) - R(i,j)|^2 \quad (8)$$

式中, i,j 是图像平面中的像素坐标,将内环 Q (通常选取大小为 5×5)对外环 R (大小选取为 40×40)进行遍历,求均值后赋给遍历的中心点。然后,将计算结果 $S_{ssd,p}(x,y)$ 归一化并转化为“相关曲面(correlation surface)”,即

$$S_p(x,y) = \exp\left(-\frac{S_{ssd,p}(x,y)}{\sigma}\right) \quad (9)$$

式中, $\sigma = \max(V_{varnoise}, V_{varauto}(p))$, $V_{varnoise}$ 是将以 p 为中心的内环剔除之后外环 R 的噪声方差, $V_{varauto}(p)$ 是在 p 的小邻域中取半径为 1 的所有图像块,并计算它们与以 p 为中心的图像块的绝对差,然后取绝对差中的最大值。

随后,对相关曲面 $S_p(x,y)$ 进行分块处理,计算出每一块中像素的均值并赋值给整个图像块,具有相同角度的网格的均值形成一个向量 v ,然后将它与 w 进行点积得到 $d_i (i=1,2,\dots,12)$,其中, w 为权值向量,网格的坐标半径越小,对应的权值越大。在本文中,取夹角 θ 为 30° ,半径分别为 $r_1=6, r_2=12, r_3=18$,分成 36 小块,权值可以简单地取为 $w = [1/2, 1/3, 1/6]^T$ 。按上述步骤计算完每个角度的值后就可以得出图像的 d_i 值。

对于红外弱小目标,由于其与背景相似性很小,因而理论计算出来的 d_i 值通常很小,设定阈值 d ,保留小于 d 的值就可以得到 SRR,对候选目标进行稀疏环检测,候选目标中保留的 d_i 个数越多且稠密,就可以判定为是目标,否则为虚警。

2 实验结果与分析

运行软件平台为 Matlab R2012a,本次实验处理的图像大小为 256 像素 \times 320 像素,灰度级数为 256,背

景为起伏的云层。图 4 是对天空图像进行预处理的过程,在图 4a 的左侧中部存在一个目标点。

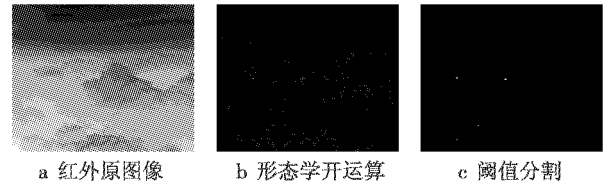


图 4 天空图像预处理过程

Fig. 4 Preprocessing of a sky image

从上述形态学滤波以及恒虚警阈值分割的结果中,会发现目标点与一些云层边缘产生的虚警点共存。下面对图 4 中的 5 个候选目标点进行具体分析,根据经验值,选取 $d=50$ 。

图 4c 中经过阈值分割后,得到 5 个候选目标点,候选目标点 1~5 坐标依次为 $(63, 128), (148, 130), (268, 151), (102, 211), (64, 235)$,如图 5 所示。



图 5 图 4c 候选目标点

Fig. 5 Candidate target points in Fig. 4c

对图中的 5 个候选目标点分别进行稀疏环求解,如图 6~图 10 所示。

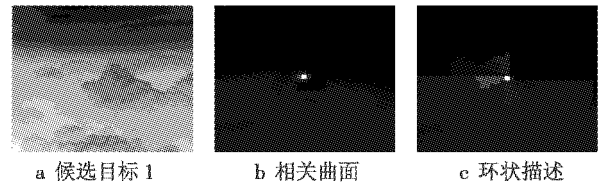


图 6 候选目标 1 的稀疏环处理

Fig. 6 Sparse ring processing of candidate target point 1

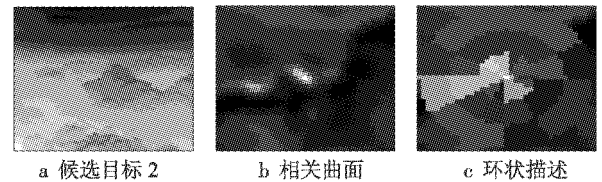


图 7 候选目标 2 的稀疏环处理

Fig. 7 Sparse ring processing of candidate target point 2

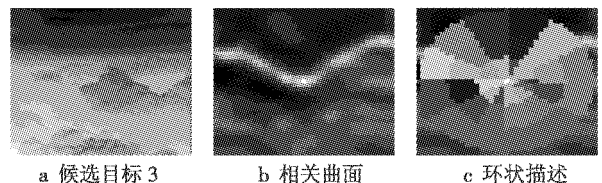


图 8 候选目标 3 的稀疏环处理

Fig. 8 Sparse ring processing of candidate target point 3

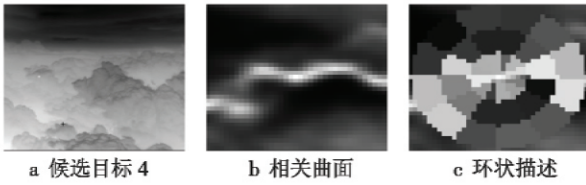


图 9 候选目标 4 的稀疏环处理

Fig. 9 Sparse ring processing of candidate target point 4

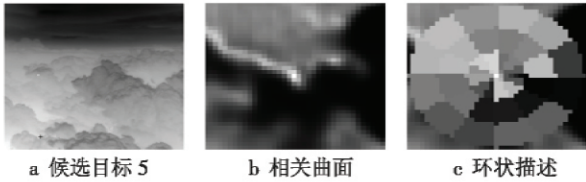


图 10 候选目标 5 的稀疏环处理

Fig. 10 Sparse ring processing of candidate target point 5

图 6 ~ 图 10 中的 5 个候选目标仿真结果如表 1 所示。

表 1 图 4 候选目标点稀疏环决策

Table 1 Sparse ring decision-making to candidate target points in Fig. 4

候选目标坐标	稀疏环表示后 d 值分布	小于 d 值个数	大于 d 值个数	判断是否为目标
(63, 128)	$d_{\max} = 45.158, d_{\min} = 0.472$	12	0	是
(148, 130)	$d_{\max} = 127.792, d_{\min} = 37.162$	1	11	否
(268, 151)	$d_{\max} = 174.850, d_{\min} = 55.992$	0	12	否
(102, 211)	$d_{\max} = 216.340, d_{\min} = 58.113$	0	12	否
(64, 235)	$d_{\max} = 193.783, d_{\min} = 38.887$	2	10	否

由表 1 可得, 5 个候选目标点中, 1 号保留 d 的个数最多, 从图 6c 环状描述中也可以看出, 候选目标点 1 与背景的自相似性最小, 因而 d 值都小于阈值。而剩下 4 个候选目标点都属于云层边缘产生的虚警点, 加权后计算得出的 d 值全部或大部分大于阈值, 不符合目标的判别标准, 因而属于虚警点, 需要剔除。

为了更好地验证本文算法的有效性, 利用管道滤波方法与本文算法对一个序列图像进行处理, 总共为 50 帧, 目标初始位置在图像左边中间, 然后向右运动。

初始图像为图 4a, 取其中的第 5 帧、第 20 帧、第 40 帧, 如图 11 ~ 图 12 所示。



图 11 移动管道滤波方法, 阈值调整因子 $a = 7.5$

Fig. 11 Moving pipeline filter method when modulating factor $a = 7.5$

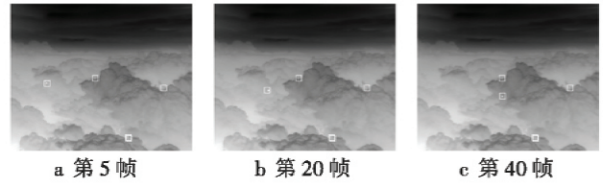


图 12 移动管道滤波方法, 阈值调整因子 $a = 8.85$

Fig. 12 Moving pipeline filter method when modulating factor $a = 8.85$

本文稀疏环表示结果如图 13 所示。

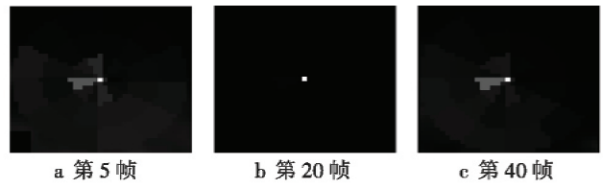


图 13 稀疏环表示

Fig. 13 Sparse ring representation

由图 11 和图 12 可得, 当阈值调整因子较小时, 整个序列图像的检测率很高, 但存在很多虚警点; 当调整因子较大时, 虚警点很少甚至没有, 但是存在漏警的情况; 综合来看, 移动管道滤波整体的检测性能不是很好, 但是采用本文的算法, 不管目标点是在云层之中, 还是云层边缘产生的虚警点, 都能准确地判别出真实目标与虚警点, 如表 2 所示。本文算法实现检测率高, 虚警率低。

表 2 稀疏环决策

Table 2 Sparse ring decision-making

候选目标坐标	稀疏环表示后 d 值分布	小于 d 值个数	大于 d 值个数	判断是否为目标
(63, 138)	$d_{\max} = 50.427, d_{\min} = 4.429$	11	1	是
(96, 150)	$d_{\max} = 2.914, d_{\min} = 0$	12	0	否
(149, 159)	$d_{\max} = 52.843, d_{\min} = 2.190$	11	1	是

3 结束语

在形态学滤波与恒虚警检测的基础上, 充分利用红外目标与背景的差异性, 引入自相似性描述子以及稀疏环表示来对目标点与虚警点进行判别, 使复杂云层背景下弱小红外目标的检测性能以及虚警率得到了较大的改善, 相比传统的序列检测算法, 本文算法能有效地区分真实目标点与云杂波干扰, 检测准确率高。另外, 在算法实现的过程中, 包括形态学滤波结构算子以及门限选择更多地要依据经验值, 因此, 更好地获取先验的知识显得尤为重要。

参考文献

[1] 李吉成, 沈振康, 李秋华. 强背景杂波条件下运动的弱 (下转第 53 页)

- [5] EASLEY G, LABATE D, LIM W Q. Sparse directional image representation using the discrete Shearlet transform[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2008, 25(1):25-46.
- [6] 冷继兵. 基于 Shearlet 变换域图像噪声混合滤波方法[J]. *电视技术*, 2013, 37(17):51-54. (LENG J B. New hybrid filtering algorithm for image noise based on Shearlet transform domain [J]. *Video Engineering*, 2013, 37(17):51-54.)
- [7] 王晓明, 冯鑫, 党建武. 基于 Shearlet 框架的多尺度去噪算法[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(7):2733-2736. (WANG X M, FENG X, DANG J W. Multiscale denoising algorithm based on Shearlet frame [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(7):2733-2736.)
- [8] 赵艳飞. Contourlet 变换在图像处理中的应用研究[D]. 合肥:安徽大学, 2007. (ZHAO Y F. Research on Contourlet transform and its application to image processing [D]. Hefei: Anhui University, 2007.)
- [9] 徐华南, 刘哲, 胡钢. Contourlet 变换及其在图像去噪中的应用研究[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(2):401-405. (XU H N, LIU Z, HU G. Research on Contourlet transform and its application to image denoising [J]. *Application Research of Computers*, 2009, 26(2):401-405.)
- [10] 方红, 王年, 章权兵. 基于稀疏贝叶斯学习的图像重建方法[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(6):1502-1509. (FANG H, WANG N, ZHANG Q B. Approach of image reconstruction based on sparse Bayesian learning [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(6):1502-1509.)
- [11] 杨国梁, 雷松泽. 基于贝叶斯估计自适应软硬折衷阈值 Curvelet 图像去噪技术[J]. *西安工程大学学报*, 2011, 25(6):857-861. (YANG G L, LEI S Z. Image denoising based on adaptive compromise threshold by Bayesian estimation using Curvelet transform [J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2011, 25(6):857-861.)
- [12] 丁灿, 曲长文, 杨俭. 基于贝叶斯估计的改进 Contourlet 变换的 SAR 图像滤波[J]. *数据采集与处理*, 2013, 28(6):746-754. (DING C, QU C W, YANG J. Improved denoising method of Contourlet of SAR image based on Bayesian estimation [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2013, 28(6):746-754.)
- (上接第 35 页)
- 小目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(2):208-211. (LI J C, SHEN Z K, LI Q H. Detection of moving and weak target in heavy clutter background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2):208-211.)
- [2] ZHANG B Y, ZHANG T X, CAO Z G, et al. Fast new small target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(10):1-6.
- [3] KHAN J F, ALAM M S. Target detection in cluttered FLIR imagery using probabilistic neural network [C]//*Proceedings of SPIE, Automatic Target Recognition XV*, 2005, 5807:55-66.
- [4] ZHANG Y, XIONG M T, WU Q Z. Evaluation of dim target detection and tracking algorithms [C]//*The 4th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment, Proceedings of SPIE*, 2009, 7283:1-6.
- [5] 马文伟, 赵永强, 张国华, 等. 基于多结构元素形态滤波与自适应阈值分割相结合的红外弱小目标检测[J]. *光子学报*, 2011, 40(7):1020-1024. (MA W W, ZHAO Y Q, ZHANG G H, et al. Infrared dim target detection based on multi-structural element morphological filter combined with adaptive threshold segmentation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(7):1020-1024.)
- [6] 赵小明, 袁胜春, 马晓丽, 等. 基于移动式管道滤波的红外小目标检测方法研究[J]. *红外技术*, 2009, 31(5):294-297. (ZHAO X M, YUAN S C, MA X L, et al. Research on infrared small target detection technique based on moving pipeline filtering [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(5):294-297.)
- [7] GONZALEZ R C, WOOD R E. 数字图像处理 [M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 3 版. 北京:电子工业出版社, 2013. (GONZALEZ R C, WOOD R E. *Digital image processing* [M]. Translated by RUAN Q Q, RUAN Y Z. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.)
- [8] WANG Y, ZHEN Q B, ZHANG J P. Real-time detection of small target in IR grey image based on mathematical morphology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(1):28-31.
- [9] 张慧燕, 吴顺君. 自适应门限下杂波恒虚警算法[J]. *西安电子科技大学学报:自然科学版*, 2000, 27(1):105-109. (ZHANG H Y, WU S J. Theoretic study of the CFAR algorithm clutters with a self-adaptive threshold [J]. *Journal of Xidian University: Natural Science Edition*, 2000, 27(1):105-109.)
- [10] SHECHTMAN E, IRANI M. Matching local self-similarities across images and videos [C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007:1-8.