

## 背景自适应的多特征融合的弱小目标检测

陆福星<sup>1,2,3</sup>, 陈忻<sup>1,2</sup>, 陈桂林<sup>1,2</sup>, 饶鹏<sup>1,2\*</sup>

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对红外复杂背景下的弱小目标检测难题, 提出一种基于背景自适应的多特征融合的复杂背景下弱小目标的检测算法。首先, 通过对红外图像进行空域滤波去除孤立噪声点, 并利用恒虚警率分割消除大面积平稳背景, 获得疑似目标集。然后融合红外图像的背景信息、弱小运动目标的灰度特征、目标与周围像素的方向梯度特征等多个典型特征, 消除疑似目标集中的大部分假目标, 最后运用运动特征获取真实目标的轨迹, 最终实现复杂背景下的红外弱小目标的检测。实验表明: 该算法能实现复杂背景下低信噪比的红外弱小目标快速检测, 具有检测概率高, 算法速度快, 鲁棒性好的特点。

**关键词:** 弱小目标检测; 多特征融合; 背景自适应; 红外图像

**中图分类号:** TP751.1      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0326002

## Dim and small target detection based on background adaptive multi-feature fusion

Lu Fuxing<sup>1,2,3</sup>, Chen Xin<sup>1,2</sup>, Chen Guilin<sup>1,2</sup>, Rao Peng<sup>1,2\*</sup>

- (1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of infrared dim and small target detection under the complex background of infrared, a detection algorithm for dim and small targets in complex background based on background adaptive multi feature fusion was proposed. Firstly, the isolated noise points are removed by spatial filtering of infrared images, and the constant false alarm rate was used to eliminate large area stationary background and obtain a suspected target set. And then most of the false targets in the suspected target were eliminated by combining the background information of the infrared image, the gray feature of the dim and small moving target and the direction gradient feature of the target and the surrounding pixels. Finally, the detection of infrared dim and small targets in complex background was realized. The experiment shows that the algorithm can realize fast infrared dim and small target detection with low signal to noise ratio under complex background, which has the characteristics of high detection probability, fast speed and good robustness.

**Key words:** dim and small target detection; multi-feature fusion; background adaptive; infrared image

收稿日期: 2018-10-03; 修订日期: 2018-11-20

基金项目: 装备预先研究基金(30502030101); 预研项目(2015SQ701033)

作者简介: 陆福星(1991-), 男, 博士生, 主要从事红外信息处理技术方面的研究。Email: lfx110@foxmail.com

导师简介: 饶鹏(1977-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光电系统工程方面的研究。Email: Peng\_rao@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

低信噪比条件下红外弱小目标的检测问题一直是红外成像探测系统的重要组成部分, 红外弱小目标检测算法直接关系到整个探测系统的性能<sup>[1-2]</sup>。在不同的复杂背景和信噪比较低的情况下, 弱小目标的检测难点主要表现在远距离、低对比度, 目标形状为点状, 在像面上仅占一个或几个像素大小, 几何特征不明显, 且强度较弱, 并常处于强杂波和噪声干扰条件下, 图像中某些背景及噪声强度甚至大于目标信号强度, 甚至运动过程中出现目标闪烁、间断等现象<sup>[3-4]</sup>。由于目标和背景的双重复杂性, 使得目标检测的难度大为增加并且容易出现大量的虚警。

目前, 针对复杂背景下的目标检测问题, 已经提出了大量的算法<sup>[4]</sup>, 较常用的有最大中值滤波<sup>[5]</sup>、高通滤波<sup>[6]</sup>、二维最小均方差滤波<sup>[7]</sup>、形态学滤波<sup>[8]</sup>、小波变换<sup>[9]</sup>、多级滤波<sup>[10]</sup>、局部对比度<sup>[11]</sup>等, 这些算法主要利用目标与背景的灰度信息进行滤波和分割实现目标的检测, 在信噪比较高时检测结果较为理想, 但在目标信噪比低时会产生大量的虚假目标和漏检, 容易导致检测的失败<sup>[4]</sup>。因此需要合适的方法来抑制图像的背景信息, 尽可能地提取出多种能够反映目标本质的区别于背景的属性信息, 实现特征提取<sup>[12-13]</sup>。针对不同特征反映的目标特性, 进行特征融合实现复杂背景下红外弱小目标的检测。

文中对于红外序列图像的复杂背景下弱小多目标的检测问题, 提出一种基于背景自适应的多特征融合的弱小目标检测, 首先分析背景信息, 进行自适应的背景抑制, 然后提取红外弱小运动目标的灰度特征、方向梯度特征、运动特征进行多特征融合, 删除虚假目标, 最终完成复杂背景下红外弱小多目标的检测。实验证明: 该算法应用于红外弱小多目标能得到较理想的结果。整个算法的流程如图 1 所示。

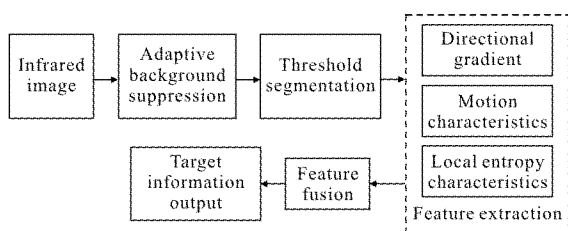


图 1 弱小目标检测流程图

Fig.1 Weak target detection flow chart

## 1 自适应背景抑制

近年来, 复杂背景下的红外弱小目标检测是当前研究的一个研究热点<sup>[3,7]</sup>。如何有效地抑制背景是实现弱小目标快速准确检测的前提。复杂背景可分为平稳背景和非平稳背景。平稳背景下的像素空域相关性强, 主要由探测器的噪声引起背景小范围的起伏, 可通过空域滤波实现背景抑制; 而非平稳背景下的像素时域相关性强, 可先进行背景差分再采用形态学变换实现背景抑制, 达到突出目标抑制背景的目的。因此文中首先计算初始帧图像标准差来判断背景的起伏特性, 实现不同复杂背景下的自适应背景抑制。

包含小目标的红外图像可以认为由目标、噪声和背景组成。具体的模型如下:

$$f(x, y) = f_T(x, y) + f_B(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

式中:  $f(x, y)$  为红外图像;  $f_T(x, y)$ 、 $f_B(x, y)$ 、 $n(x, y)$  分别表示目标、背景和噪声<sup>[4]</sup>。作用距离较远的目标, 目标的图像像面上表现为点状或者接近点状。因此红外图像的背景通常是大面积的平缓变化区域, 区域之间的像素具有较强的相关性; 红外小目标的红外辐射强度一般比周围的背景要高一些, 因此小目标在红外图像中呈现为孤立亮斑, 即在局部邻域内与其他像素在灰度值上的差别。文中采用基于背景抑制的方法对图像进行预处理来提升图像的信噪比, 之后可通过阈值分割得到候选目标。

## 2 阈值分割

假设原始图像为  $f(x, y)$ , 通过图像预处理得到背景抑制后的图像为  $g(x, y)$ , 经全局阈值分割后得到的检测结果为  $A$ 。具体公式如下:

$$g(x, y) = f(x, y) - f(x, y) \times h(x, y) \quad (2)$$

$$T = \mu + k \cdot \delta$$

式中:  $h(x, y)$  为滤波因子;  $\mu$ 、 $\delta$  分别为  $g(x, y)$  的均值和方差;  $T$  为分割的阈值;  $k$  为常数, 根据经验可取 3~8。并将  $g(x, y)$  中大于  $T$  的赋值为 1, 其余为 0, 得到检测结果  $A$ ,  $A$  中所有为 1 的点就是候选目标的位置。

## 3 多特征融合检测

多特征融合检测就是综合利用目标的灰度方向

梯度特征<sup>[14]</sup>、局部熵特征<sup>[15]</sup>和运动特征从大量的疑似目标中筛选出真实的目标来实现弱小目标的检测。具体过程如下:

(1) 以归一化局部熵检测弱小目标

利用局部熵消除候选目标  $A$  中的孤立噪声点、盲元和强起伏边缘。通过求取原始图像中的每个候选目标点的局部熵,并增加阈值,归一化的局部熵最大的是平稳背景、最小的是盲元和强噪声点,通过设置合适的阈值进行噪声剔除。将归一化局部熵在中间点保留为 1,其余为 0,结果保存为  $B$ :

局部熵反映了红外图像中局部区域的灰度离散型,目标作为图像中的突起,灰度变化较为剧烈,可采用局部熵作为目标的特征。局部熵  $L$  定义为:

$$L(x, y) = \sum_{(i, j) \in \varepsilon} g(x, y) \log_2(i, j)$$

$$p(i, j) = \frac{f(i, j)}{\sum_{(i, j) \in \varepsilon(x, y)} f(i, j)} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon(x, y)$  是以  $(x, y)$  为中心并与目标尺寸相接近的模板;  $f(i, j)$  为  $(i, j)$  处的灰度值;  $L(x, y)$  为该区域的熵。图像的局部灰度离散性越大,局部熵越小;反之,图像的局部灰度离散性越小,局部熵越大。假设目标的尺寸不超过  $3 \times 3$ , 因此,局部区域大小为  $3 \times 3$ 。

当局部区域的灰度全都相同时,局部熵最大,最大值  $L(x, y)_{\max}$  为  $\log_2(9)$ 。通过归一化处理,得到的归一化局部熵为:

$$\overline{L(x, y)} = \frac{L(x, y)}{L(x, y)_{\max}} \quad (4)$$

归一化局部熵最大的是平稳的背景;数值最小的是强起伏的背景边缘、噪声点、盲元点;中间部分包含小目标。通过设置合适的阈值可以删除噪声点和强起伏边缘,减少候选目标,得到的结果保存为  $B$ 。

(2) 以方向梯度比率检测弱小目标

通过背景抑制和局部熵剔除的是平稳背景和孤立噪声点,候选目标中的强起伏背景边缘点需要通过梯度方向比率来剔除。在原始图像中假设某一候选目标为  $f(x, y)_{\max}$ , 一个以该点为核心的  $5 \times 5$  的邻域窗口,定义 4 个方向上的加权梯度向量  $D_m$ <sup>[14]</sup>。每个方向包含候选目标点两侧的 4 个点,利用 4 个方向梯度加权向量来区分目标和强边缘点,具体示意图如图 2 所示。

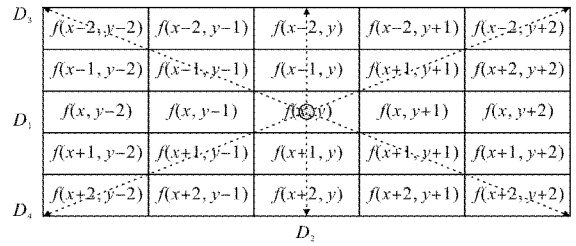


图 2 方向梯度向量计算

Fig.2 Directional gradient vector calculation

计算每个方向向量  $D_i$  中 4 个点与中心点的灰度差值之和。由于距离的不同,每个点与中心点的相关程度不同,根据先验知识,离中心越近,灰度插值越小。由此设定  $D_1 \sim D_4$  的加权归一系数  $w_{i,j}$  为:

$$w_{i,j} = \frac{1}{28} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & \frac{5}{2} & \frac{5}{2} & \frac{3}{2} \\ \frac{3}{2} & \frac{5}{2} & \frac{5}{2} & \frac{3}{2} \\ 1 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

通过计算方向梯度比率 (Direction Gradient Ratio, DGR), 每一个候选点方向向量的灰度差异值  $D_i$  的最大值、最小值的比值成为候选点的方向梯度比率。根据方向梯度大小来识别候选点中的背景边缘点。

$$d_m = \sum_{(i, j) \in d_m} w_{i,j} (f(x, y) - f(x+i, y+j))$$

$$DGR = \frac{\max(d_m)}{\min(d_m)} (1 \leq m \leq 4) \quad (5)$$

方向梯度主要去除的是背景边缘点,如果候选目标是背景边缘点,由于背景边缘的方向梯度相差较大,因而 4 个方向梯度向量中至少存在一个很大和很小的  $d_m$ , 因此,得到的 DGR 比较大;反之,如果候选目标是真实点目标,由于点目标周围的 4 个方向梯度向量相差不大,因而  $d_m$  差异较小, DGR 接近 1。因此,设定合理的阈值就可区分候选目标中的背景边缘点和真实小目标。

为了验证文中算法的性能,通过在 4 幅经典的复杂背景图像添加 9 个点目标进行图像仿真测试。图像中的红框标明的目标大小在  $3 \times 3$  之内,基本淹没于复杂的云背景之中。图像经过形态学变换(top-hat)、各向异性滤波(KAD)和最大中值(Max-median)以及文中的方法处理后的结果如图 3 所示。

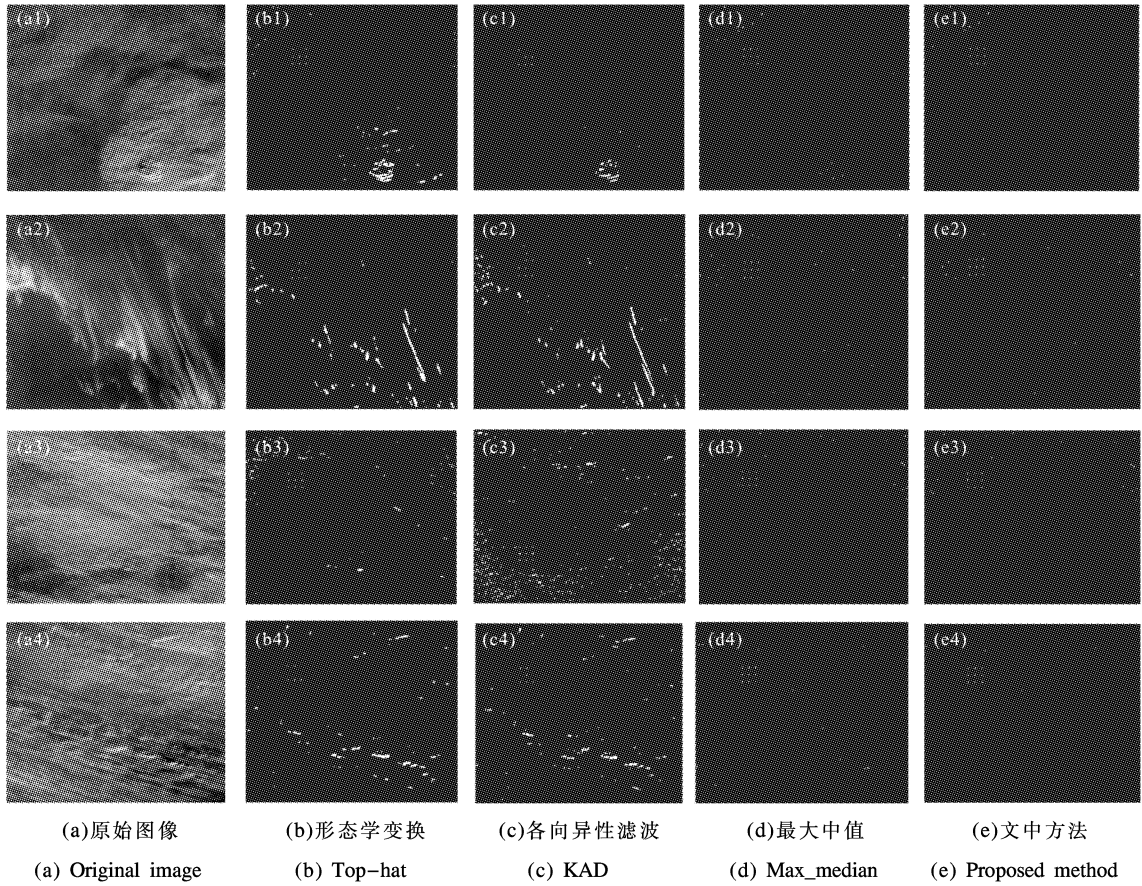


图 3 不同图像的的检测结果

Fig.3 Detection results of different images

采用目标检测概率  $P_d$  和虚警概率  $P_f$  作为算法的评价指标,定义如下:

$$P_d = N_d / N_t \times 100\%, P_f = N_f / (N_t / N_f) \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $N_d$  为正确检测的目标个数;  $N_t$  为实际的目标个数;  $N_f$  为虚警个数。4 幅图像统计的检测概率虚警率如表 1 所示。

表 1 不同图像的检测概率和虚警概率

Tab.1 Detection probability and false alarm probability of different images

Image		Top-hat	KAD	Max_median	Proposed method
Image 1	$P_d$	1	66.7%	100%	100%
	$P_f$	$7.93 \times 10^{-4}$	$2.19 \times 10^{-4}$	$2.19 \times 10^{-4}$	$8.54 \times 10^{-5}$
Image 2	$P_d$	88.9%	77.8%	100%	100%
	$P_f$	$8.79 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$3.54 \times 10^{-4}$	$1.71 \times 10^{-4}$
Image 3	$P_d$	88.9%	100%	100%	100%
	$P_f$	$1.1 \times 10^{-3}$	$4.1 \times 10^{-3}$	$3.30 \times 10^{-4}$	$2.29 \times 10^{-4}$
Image 4	$P_d$	55.6%	66.7%	100%	100%
	$P_f$	$7.45 \times 10^{-4}$	$9.89 \times 10^{-4}$	$1.71 \times 10^{-4}$	$6.10 \times 10^{-5}$

从图 3 和表 1 中可以看出: 文中多特征融合的检测方法针对复杂背景下的弱小目标检测具有良好

的效果,可以保证在低虚警率的条件下获得较高的检测概率,而其他的方法容易产生漏警或者较大的

虚警,不利于目标的快速检测。

### (3) 以运动特征进行序列图像目标确认

背景抑制删除了图像中大量的平稳背景,经过计算局部熵和方向梯度比率,剔除了大量的背景边缘和噪声点,使得疑似目标中剩下的假目标大大减少,需要结合真假目标之间的运动特征差异进行时域确认。与假目标相比,真实目标在连续数帧图像内具有运动连续性强和灰度变化稳定等特征,利用序列图像中弱小目标运动的连续性和轨迹的一致性进一步筛选,得到真正的目标<sup>[1,16-17]</sup>。

步骤1:参数初始化。设计多帧关联检测的帧数 $N$ 与 $M$ 、目标运动最大位置和目标的灰度差值 $E$ 。

步骤2:序列图像输入,取 $N$ 帧序列图像的第一帧为当前帧,寻找当前帧中所有的疑似点 $P_i$ ,记录中心坐标位置、目标灰度信息;

步骤3:判断某一疑似目标点 $P_i$ 在 $N$ 帧图像中出现的次数不小于 $M$ 并且疑似目标点的灰度差异不大于 $E$ 则判断为真目标;否则为假目标予以删除,并转至步骤5;

步骤4:当目标点 $P_i$ 为真目标时,记录并标识其在当前帧的像素坐标和灰度值。

步骤5:判断当前帧中疑似目标点是否全部处理完毕,如果没有,则跳至下一疑似目标点,重复步骤3~步骤4,否则,转至步骤6。

步骤6:根据设定的检测条件,判断检测是否停止,如果否,则更新序列图像,重复步骤2~步骤5,如果是,则输出目标轨迹。

## 4 实验结果

通过对红外探测器获得的低信噪比下的外场试验图像和实验室图像进行仿真验证,获得了良好的检测效果。图4(a)、图5(a)为原始图像,图4(b)、图5(b)为图像的单帧抑制结果,图4(c)、图5(c)为图像分割后的疑似目标结果,图4(d)、图5(d)为得到的候选目标位置经过归一化局部熵,剔除孤立噪声点得到的结果,图4(e)、图5(e)为利用方向梯度比率消除背景边缘点得到的含有极少数假目标的单帧候选目标,图4(f)、图5(f)多帧关联得到的序列图像的检测结果;通过统计,单特征检测的疑似

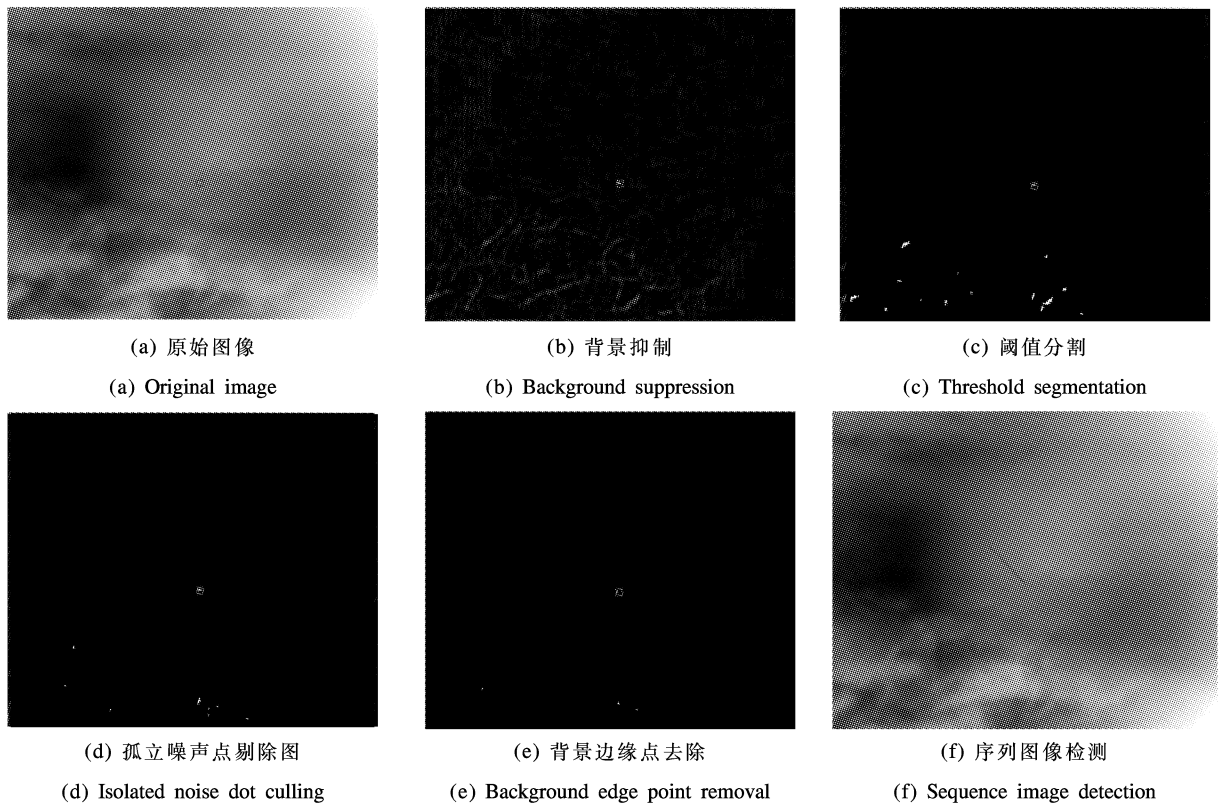


图4 外场实验图像的检测结果

Fig.4 Detection results of field experiment images

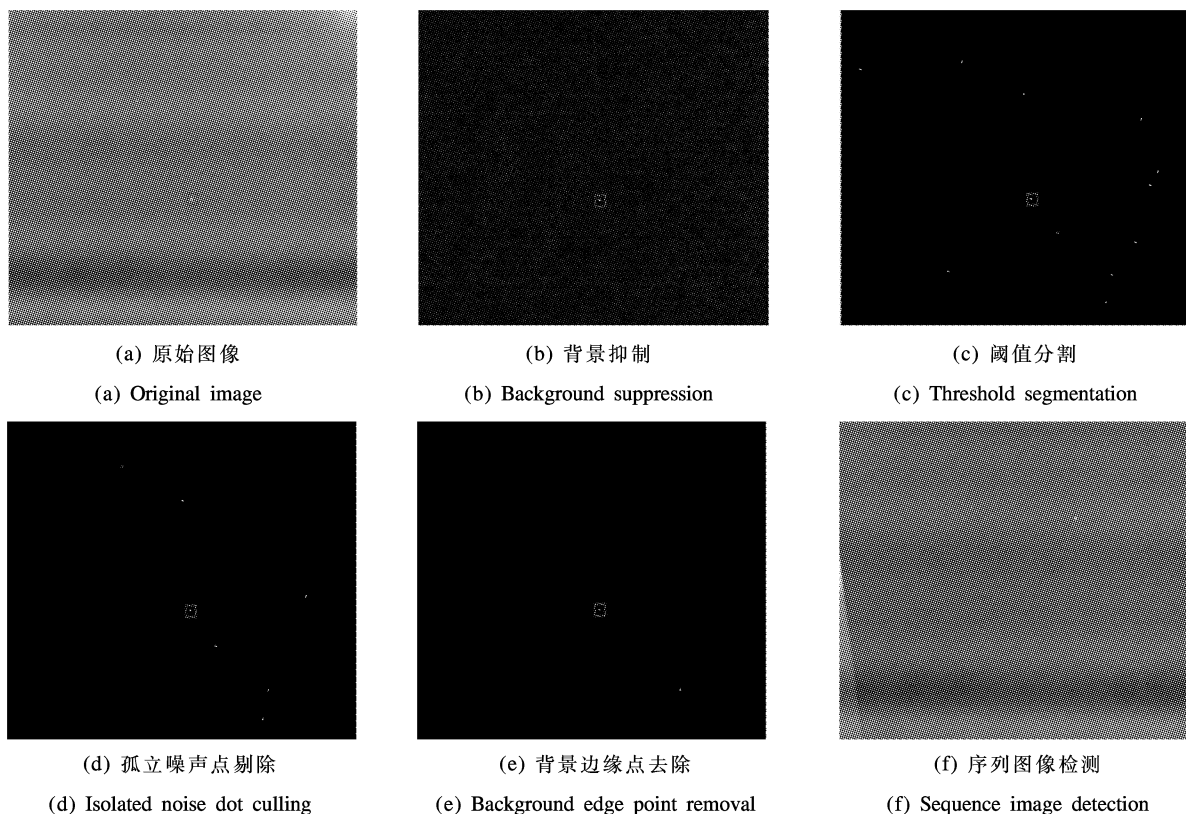


图 5 实验黑体成像实验的检测结果

Fig.5 Detection results of experimental blackbody imaging experiment

目标点和多特征融合检测的目标点个数如表 2 所示。

表 2 不同图像的疑似目标个数

Tab.2 Number of suspected targets for different images

Image	Candidate targets	Real targets	False alarm	Undetected targets
Fig.3(c)	23	1	22	0
Fig.3(d)	11	1	10	0
Fig.3(e)	5	1	4	0
Fig.4(c)	12	1	11	0
Fig.4(d)	7	1	6	0
Fig.4(e)	2	1	1	0

## 5 结 论

上述结果表明：文中提出的自适应的背景抑制方法能有效地抑制背景，突出目标，同时通过局部熵、方向梯度比率特征融合，有效地减少了单帧图像的疑似目标个数，最后通过融合弱小目标时域的连

续性，极大地提高了检测效率，能够快速地实现复杂背景下弱小目标的检测。

## 参考文献：

- [1] Huang Fuyu, Shen Xueju, Liu Xumin, et al. Detection of large field of view infrared targets based on spatial-temporal fusion processing [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2328-2338. (in Chinese)  
黄富瑜, 沈学举, 刘旭敏, 等. 基于空时域融合处理检测超大视场红外目标 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23 (8): 2328-2338.
- [2] Wang Fengzhao, Liu Xingtang, Huang Shucui. Multi feature target fusion detection algorithm based on fuzzy evidence theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 713-719. (in Chinese)  
王凤朝, 刘兴堂, 黄树采. 基于模糊证据理论的多特征目标融合检测算法[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 713-719.
- [3] Zhang Qiang, Cai Jingju, Zhang Qiheng. Anisotropic infrared background prediction method [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(2): 301-306. (in Chinese)

- 张强, 蔡敬菊, 张启衡. 各向异性的红外背景预测方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(2): 301-306.
- [4] Chen Hao, Ma Caiwen, Chen Yuecheng, et al. Multi dim feature detection and tracking algorithm based on multi feature fusion in complex background [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2444-2448. (in Chinese)  
陈皓, 马彩文, 陈岳承, 等. 基于多特征融合的复杂背景下弱小多目标检测和跟踪算法 [J]. 光子学报, 2009, 38(9): 2444-2448.
- [5] Qin Hanlin, Han Jiaojiao, Yan Xiang, et al. Infrared small moving target detection using sparse representation-based image decomposition [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 148-156.
- [6] Yang L, Yang J, Yang K. Adaptive detection for infrared small target under sea-sky complex background [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(17): 1083-1085.
- [7] Hadhoud M M, Thomas D W. The two-dimensional adaptive LMS (TDLMS) algorithm [J]. *IEEE Trans Circuits & Syst*, 1988, 35(5): 485-494.
- [8] Kim S, Lee J. Scale invariant small target detection by optimizing signal-to-clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track [J]. *Pattern Recognit*, 2012, 45(1): 393-406.
- [9] Strickland R N, Hahn H I. Wavelet transform methods for objects detection and recovery [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(5): 724-735.
- [10] Zhang Zhongyu, Jiao Shuhong. Multi feature fusion infrared ship target detection method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S1): 29-34. (in Chinese)  
张仲瑜, 焦淑红. 多特征融合的红外舰船目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S1): 29-34.
- [11] Zhang Xiangyue, Ding Qinghai, Luo Haibo, et al. Infrared small target detection algorithm based on improved LCM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0726002. (in Chinese)
- 张祥越, 丁庆海, 罗海波, 等. 基于改进 LCM 的红外小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0726002.
- [12] Wang Tian. Infrared dim target detection method based on multi feature fusion technology in cloud background [J]. *Information and Computer*, 2016(13): 58-59. (in Chinese)  
王田. 采用多特征融合技术的云背景红外弱小目标检测方法[J]. 信息与电脑, 2016(13): 58-59.
- [13] Li Qiuhua, Li Jicheng, Shen Zhenkang. Infrared image small target detection based on multi-scale feature fusion [J]. *System Engineering and Electronic Technology*, 2005, 27(9): 1557-1560. (in Chinese)  
李秋华, 李吉成, 沈振康. 基于多尺度特征融合的红外图像小目标检测 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(9): 1557-1560.
- [14] Liu Rang, Wang Dejiang, Jia Ping, et al. Omnidirectional morphology combined with local feature criteria for point target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1104001. (in Chinese)  
刘让, 王德江, 贾平, 等. 全方位形态学联合局部特征准则的点目标检测[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1104001.
- [15] Mao Yuxin, Yang Junqiang, Qu Jinsong, et al. Point target detection algorithm based on local entropy. Journal of [J]. *Artillery Launch and Control*, 2014(3): 41-44. (in Chinese)  
毛羽忻, 杨俊强, 曲劲松, 等. 基于局部熵的点目标检测算法分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2014(3): 41-44.
- [16] Liu Y, Chen F, Huang J, et al. Research on the detection technology to dim and small target[C]//Selected Papers From Conferences of the Photo electronic Technology Committee of the Chinese Society of Astronautics. International Society for Optics and Photonics, 2015: 952111.
- [17] Salari E, M Li. Dim target tracking with total variation and genetic algorithm [C]//IEEE International Conference on Electro/information Technology, Proc. of IEEE, 2014: 270-274.