

# 基于统计特征和桥梁方法的红外弱小目标检测算法

韩志华<sup>1,2\*\*</sup>, 刘晶红<sup>1\*</sup>, 徐芳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了更有效地检测出红外弱小目标,通过分析红外图像中弱小目标与其邻域背景的特征差异性,提出了一种基于统计特征和桥梁方法的红外弱小目标检测算法。在滑动窗口范围内提取像素值的均值、方差等特征,根据这些统计特征和桥梁方法判断该窗口范围内有无红外弱小目标;如果存在弱小目标,记录下其位置;对弱小目标区域进行二次筛选。研究结果表明,所提算法相对于较经典算法,虚警率降低了 58% 以上。

**关键词** 探测器; 红外探测器; 弱小目标检测; 统计特征; 桥梁

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.060401

## Infrared Dim Target Detection Based on Statistical Characteristics and Bridge Method

Han Zhihua<sup>1,2\*\*</sup>, Liu Jinghong<sup>1\*</sup>, Xu Fang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optical Precision Machinery and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to detect dim the small infrared targets more effectively, a small infrared target detection algorithm based on statistical features and bridge method is proposed by analyzing the difference between the small dim infrared targets in infrared images and their neighborhood backgrounds. The mean value, variance and other characteristics of pixel values are extracted in the sliding window range. According to these statistical characteristics and the bridge method, whether there are small infrared targets in the window range is determined. If there is a small target, its location is recorded, and then the small target area is screened twice. The research results show that the false alarm rate of the proposed algorithm is 58% lower than that of the classical algorithm.

**Key words** detector; infrared detector; dim target detection; statistical characteristic; bridge

**OCIS codes** 040.3060; 110.3080; 100.2960

## 1 引言

红外成像技术可以白天晚上不间断地对目标进行侦查,被广泛应用于红外成像制导、远程探测、跟踪等领域。但是红外弱小目标在图像中所占像素数量非常少,并且没有明显的纹理特征和形状信息。除此之外,红外图像还受噪声、云雾、背景物体辐射等干扰。这使得红外弱小目标的检测变得很困难。

自从 20 世纪中期以来,许多研究人员在此领域

进行了大量的研究,提出了很多弱小目标检测算法。小波变换方法<sup>[1]</sup>能较有效地降低噪声方面的干扰,但是复杂度过高。双波段融合探测的方法<sup>[2]</sup>在专用设备下效果较好,但是探测所需设备昂贵。基于时间序列的算法<sup>[3-4]</sup>,对视频中相邻几帧的目标进行非线性预测,能有效地排除噪点干扰,但是复杂背景条件下存在虚警率偏高的问题。基于局部统计特征的小目标检测方法<sup>[5]</sup>能有效地剔除噪点,但是弱小目标检测存在虚警率较高的问题。基于局部特征的单帧

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2018-09-17; 录用日期: 2018-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(60902067)、吉林省重大科技攻关项目(11ZDGG001)

\* E-mail: liu1577@126.com; \*\* E-mail: hanzhihua1234@126.com

红外小目标检测算法<sup>[6]</sup>中使用了滤波器,能有效剔除噪点,但实测虚警率偏高。基于 Contourlet 变换和独立分量分析的小目标检测方法<sup>[7]</sup>把数据复杂度降低了许多,并且也有效地排除了噪声和杂波的干扰,但是低空复杂背景下存在虚警率高的问题。定向显著性的方法<sup>[8]</sup>利用高斯建模方法,使得该算法能在低空复杂条件下能够取得良好的检测率,但是该算法存在复杂度过高和弱目标虚警率偏高的问题。利用机器学习进行检测的方法<sup>[9-10]</sup>需要大量的训练样本。基于局部对比的检测算法<sup>[11]</sup>有效地提高了信噪比,但是第二步的自适应阈值分割使得弱目标检测虚警率偏高。文献<sup>[12]</sup>利用显著性提取和形态学的方法进行小目标提取,虽然实时性较好,但是虚警率偏高。通过信号分解然后重建的方法<sup>[13]</sup>稳健性好,但是复杂背景条件下虚警率过高。文献<sup>[14]</sup>通过对多尺度图像进行滤波来达到目标增强和背景抑制的目的,虽然它的稳健性好,但是复杂度过高。总的来说,基于小波和建模的方法复杂度过高,基于频率和局部对比的方法容易导致虚警率过高,基于机器学习的方法严重依赖训练样本。为了解决上述复杂度过高和弱小目标虚警率过高的问题,本文提出了基于统计特征和桥梁方法的弱小目标检测算法。

## 2 红外弱小目标检测理论

### 2.1 红外弱小目标特性

在红外图像中,目标较小,信噪比较低。以常见大小的  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$  的图片为例,弱小目标大小不超过  $21 \text{ pixel} \times 21 \text{ pixel}$ ,也就是弱小目标在红外图像中所占像素个数的比例不会超过  $0.15\%$ <sup>[15]</sup>,弱小目标与其局部背景之间的平均灰度值差距小于  $20\%$ 。文献<sup>[11]</sup>指出红外图像中的小目标形状特征和纹理特征不明显,很难通过常见特征把小目标从背景中提取出来。在目标与背景区域之间的灰度值差异性方面,文献<sup>[16]</sup>指出通常红外小目标的辐射强度要高于局部背景,小目标灰度值之间差异性不大,而小目标灰度值与其邻域背景之间会有一个突变的过程。观察整幅图像可知,小目标区域的灰度值较高,例如远距离的喷气式飞机,其尾部喷气处温度相比于周边云层、建筑、机身等温度较高,从而在红外图像中这个部位的灰度值要高于周边邻域的灰度值。在目标与背景区域各自内部差异性方面,文献<sup>[1-2, 6, 11, 17-18]</sup>都指出了红外小目标与其周边背景存在灰度值差异性和

特征差异性,认为同一个小目标区域的灰度值具有连续性,小目标邻域的背景灰度值具有连续性。在目标与背景之间的特征差异性方面,文献<sup>[19-21]</sup>指出小目标与其邻域背景之间的某些特征信息不同,可以利用这些特征对小目标进行提取。本文利用这些特征差异性来判断一个滑动窗口范围内有无红外小目标。

### 2.2 窗口内目标有无判定

基于小目标的特性,提出了两个判断条件。条件一:窗口区域内小目标的灰度值要高于其邻域背景,所以通过更新均值的方法把远大于背景像素平均值的点找出来并列为疑似目标点。首先通过窗口区域内的均值把目标邻域的背景像素点找出来,然后根据这些像素点更新背景像素点均值,最后根据背景像素点均值更新目标像素点。条件二:在窗口区域内疑似目标点所在的区域必须和任何物体“无接触”。这里的“无接触”是指窗口范围内的目标区域和窗口边界之间不存在任何的和目标灰度值差不多的“连接桥梁”。如图 1 所示,因为“桥梁”连接疑似目标与窗口边界相同,且其灰度值与“目标”相同,所以上方的圆形物体不满足条件二。下方窗口内的圆形物体并没有这样的“桥梁”,所以它满足条件二。同时满足以上两个条件则判断窗口范围内存在目标。

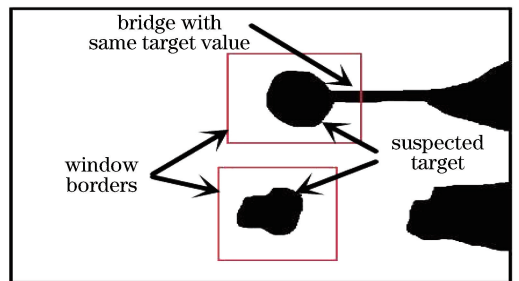


图 1 桥梁示意图

Fig. 1 Bridge diagram

### 2.3 示 例

如图 2 所示, $u$  表示小目标所在区域, $V$  代表滑动窗口( $V$  能覆盖住  $u$  且  $V$  不小于  $u$  的 1.2 倍), $w$  表示整个红外图像。 $V$  从左到右、从上到下遍历整个图像。如图 3 所示,当  $V$  分别在窗口 1、窗口 2、窗口 3、窗口 4、窗口 5 位置时,窗口 1 和 5 同时满足条件一和条件二,窗口 2、窗口 3、窗口 4 只满足条件一,所以把窗口 1 和 5 内的物体列为目标(由于窗口 5 范围内并没有与目标值相同且连接目标与窗口边界的“桥梁”存在,因此它满足条件二)。

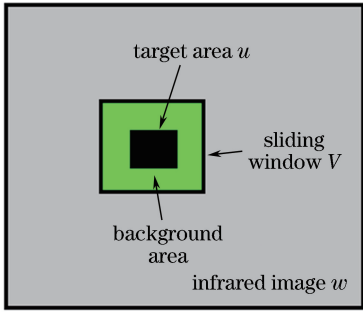


图2 滑动窗口

Fig. 2 Sliding window

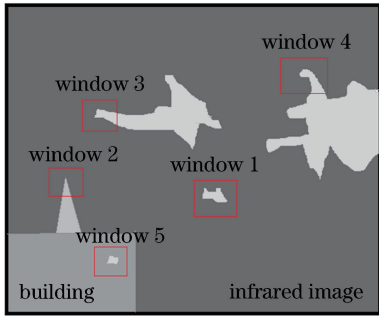


图3 桥梁方法示意图

Fig. 3 Bridge method diagram

### 3 检测步骤

当滑动窗口  $V$  从左上角开始逐行逐列滑动时, 开始进行以下步骤来判断  $V$  内是否包含小目标(当  $u$  恰好覆盖住小目标时,  $V-u$  则代表小目标邻域的背景)。

步骤一: 计算窗口内整体均值, 然后更新背景均值。

$$m_{V\text{-old}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^n f_{i,j}}{n}, \quad (1)$$

式中:  $m_{V\text{-old}}$  为  $V$  范围内的均值;  $n$  为  $V$  范围内像素个数;  $f_{i,j}$  为  $(i, j)$  位置像素的灰度。

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1, j=1}^n (f_{i,j} - m_{V\text{-old}})^2}{n}, \quad (2)$$

式中:  $\sigma^2$  为  $V$  范围内像素值的方差。

$$B = \{(i, j) \mid (i, j) \in V_{n_1 \times n_1}\}, \quad (3)$$

式中:  $B$  为窗口范围内所有像素位置的集合(大小为  $n_1 \times n_1$ )。

$$C = \{(i, j) \mid (i, j) \in V_{(n_1-1) \times (n_1-1)}\}, \quad (4)$$

式中:  $C$  为以  $B$  中心点为中心, 大小为  $(n_1 - 1) \times (n_1 - 1)$  的所有像素位置的集合。

利用(1)式和(2)式来计算窗口范围内哪些像素点大于一定程度的均值, 并把这些像素点分开存入两个不同的集合, 计算公式表示为

$$A_{\text{old}} = \{(i, j) \mid f_{i,j} > K \times m_{V\text{-old}}, (i, j) \in B\}, \quad (5)$$

式中:  $A_{\text{old}}$  为  $V$  范围内符合条件的像素位置集合;  $f_{i,j}$  为  $(i, j)$  位置像素的值,  $K$  为经验数。

其中对于不同窗口的  $\sigma^2$  对应不同的  $K$ , 给出  $K$  的经验取值范围:

$$\begin{cases} K > 2.1, & \sigma^2 > 439 \\ 2.1 \geq K \geq 1.72, & 439 \geq \sigma^2 \geq 187 \\ 1.72 > K \geq 1.33, & 187 > \sigma^2 \geq 35 \\ 1.33 > K \geq 1.1, & \sigma^2 < 35 \end{cases} \quad (6)$$

背景像素点均值的计算表达式为

$$m_{V\text{-new}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^h f_{i,j}}{h}, (i, j) \in (B - V_{A_{\text{old}}}), \quad (7)$$

式中:  $(B - V_{A_{\text{old}}})$  为窗口范围内背景像素位置的集合;  $h$  为集合  $(B - V_{A_{\text{old}}})$  元素数量。

步骤二: 根据背景均值找出窗口范围内疑似目标点并存入集合内。

求基于背景均值更新符合条件一的点的位置, 计算表达式为

$$A_{\text{new}} = \{(i, j) \mid f_{i,j} > K \times K_1 \times m_{V\text{-new}}, (i, j) \in B\}, \quad (8)$$

式中:  $A_{\text{new}}$  为根据  $m_{V\text{-new}}$  更新的符合条件一的像素位置集合;  $K_1$  为经验系数, 建议  $K_1$  取 1.1~1.6 之间数字。

步骤三: 判断步骤二的疑似目标是否符合条件二。

基于两个条件判断这个窗口范围内有无小目标(假如这块区域确实是属于小目标的而且和窗口边界有交集, 则放弃这个窗口, 总有一个窗口是符合两个条件的)。这样做的目的是为了消除背景物体的干扰, 如果不是上述两个条件同时满足, 那么检测到的目标可能会是建筑物的一个墙角。计算表达式为

$$D = \{(i, j) \mid L\{[A_{\text{new}} \cap (B - C)] \& (A_{\text{new}} \neq \emptyset)\} = 1, (i, j) \in B\}, \quad (9)$$

式中:  $L\{\cdot\}$  为指示函数;  $A_{\text{new}} \cap (B - C)$  为条件一;  $A_{\text{new}} \neq \emptyset$  为条件二。如果条件一和条件二同时成立,  $L\{[A_{\text{new}} \cap (B - C)] \& (A_{\text{new}} \neq \emptyset)\} = 1$ 。

### 4 目标筛选

为了使不同背景条件下检测效果更好, 本文提

出了3个筛选理论。理论一,小目标区域和其邻域背景区域各自的内部是稳定的,可以通过检验这种稳定性来筛选目标。理论二,在某个包含红外小目标的窗口范围内,灰度值最高的点属于目标像素,和这个最高点的值差不多的点也属于目标像素,其他的则属于背景像素。理论三,提取的目标连通域应为圆形或者类似方形,凡是其他类型的都认为不是真目标。基于上述理论,对红外图像进行小目标筛选,有如下筛选方式。

#### 4.1 统计特征筛选方式

通过目标区域方差、均值进行窗口范围内筛选,计算表达式为

$$m_{V\text{-object}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^h f_{i,j}}{h}, (i, j) \in D, \quad (10)$$

式中: $m_{V\text{-object}}$ 为目标区域像素值的均值。

$$\sigma_{V\text{-object}}^2 = \frac{\sum_{i=1, j=1}^w (f_{i,j} - m_{V\text{-object}})^2}{\tau w}, (i, j) \in D, \quad (11)$$

式中: $\delta_{V\text{-object}}^2$ 为目标区域像素值的方差。

对于稳定性达标的疑似目标,本文予以保留,计算表达式为

$$D = \begin{cases} D, & \sigma_{V\text{-object}}^2 < K_2 \\ \emptyset, & \text{others} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: $K_2$ 为经验值,建议取0.7~1.7之间数字。当候选目标区域内的灰度值非常稳定时,认为候选目标为正确目标。

#### 4.2 局部极值筛选方式

如果 $D \neq \emptyset$ 的话,计算均值比值:

$$K_m = \frac{m_{V\text{-new}}}{m_{V\text{-object}}}. \quad (13)$$

为了找出含有目标窗口区域的最大像素灰度值

表1 不同背景条件下对应的筛选方式

Table 1 Screening methods corresponding to different background conditions

Background condition	Screening approach
Common building background	Local extreme screening
Cloud background	Statistical characteristic screening or turn off screening
Gray difference between walls and windows of building is large	Connected domain shape in image

#### 4.5 噪点问题

本文通过限制 $\text{size}(D)$ 来消除噪点。通常小于一定数量像素的,本文认为是噪点。通过实验发现,先进行中值滤波也可以有效地去除噪点,但会增加程序运行时间。

及其位置,计算

$$f_{\max}(i, j) = \{f, (i, j) \mid f = \max(f_{i,j}), (i, j) \in B\}, \quad (14)$$

式中: $\max(\cdot)$ 为取矩阵元的最大值。

把窗口范围内和最大值像素差距不大的像素的位置送到 $M$ 集合(包括最大像素值在内的位置)

$$M = \{(i, j) \mid f_{i,j} > 0.85 \times K_m \times f_{\max}(i, j) \in B\}, \quad (15)$$

$$L = \frac{\text{size}(M \cap D)}{\text{size}(D)}, \quad (16)$$

式中: $\text{size}(\cdot)$ 为取集合的元素个数; $L$ 为 $M$ 和 $D$ 集合的重合度。

通过重合度 $L$ 来判断目标是否合格,如果合格予以保留。

$$D = \begin{cases} M, & L > 0.8 \\ \emptyset, & \text{others} \end{cases}. \quad (17)$$

#### 4.3 全图连通域形状筛选方式

在多次实验过程中,发现图中包含远距离建筑物并且建筑物上窗户与墙之间灰度值差距较大时,检测结果存在虚警率较高的问题。检测的非目标区域多为不规则多边形。为此本文采用了通过连通域的长宽比特征来筛选目标。如果满足以下两个条件,则放弃此连通域。

$$\frac{\max(L_1)}{\min(L_1)} > K_3, \quad (18)$$

式中: $L_1$ 为连通域边界两个点的距离; $K_3$ 为经验值,建议取值1.8~2.2。

$$\text{size}(D) > K_4, \quad (19)$$

式中: $K_4$ 为经验值,建议取值13~23。

#### 4.4 3种筛选方式的选择

根据多次的实验发现,各筛选方式在不同的背景条件下的检测效果不同。因此,本文把不同条件下对应的筛选方式列于表1中。

## 5 实验结果与分析

为了验证所提算法,选取了3幅不同时间拍摄的红外图像,其尺寸为256 pixel×320 pixel,其波段8~12 μm,其背景是云层,其目标是客机,其地点是

机场附近,其难点是小目标灰度值与云层灰度值差距较小,噪点较多,如图4所示。

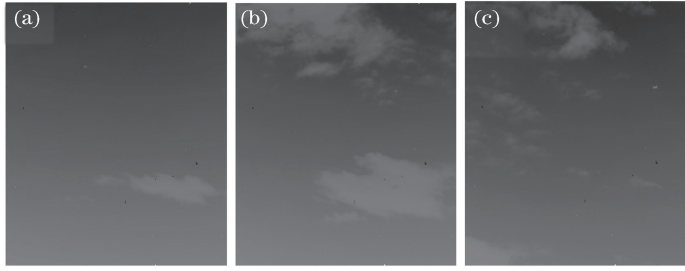


图4 实验用红外图像。(a)第1时刻的客机图像;(b)第2时刻的客机图像;(c)第3时刻的客机图像

Fig. 4 Infrared images used in experiment. (a) The first moment of plane image; (b) the second moment of plane image; (c) the third moment of plane image

本文实验的硬件条件和软件条件如表2所示。

表2 实验用的软硬件环境

Table 2 Hardware and software conditions used in experiment

Hardware condition	Software condition
Intel Core i3-2120 CPU	Windows 10 professional
2.00 GB memory	Visual studio 2015
NVIDIA GeForce GT 430	opencv-3.4.0
Infrared camera in photoelectric equipment	

### 5.1 算法性能比较

根据多次实验,发现 $K_1$ 、 $K_2$ 分别为1.46、0.85( $K_3$ 、 $K_4$ 和 $K_m$ 未使用),滑动窗口大小为 $11 \times 11$ 时检测效果最好。对图4的3幅图像检测结果分别如图5的3幅图像所示。

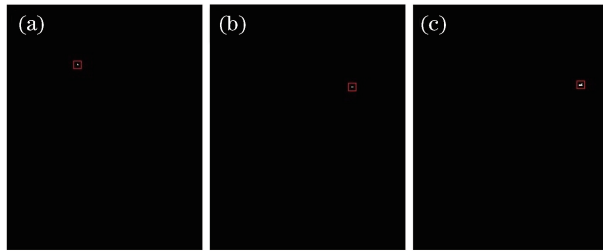


图5 所提算法检测结果。(a)图4(a)的检测结果;(b)图4(b)的检测结果;(c)图4(c)的检测结果

Fig. 5 Detection results by proposed algorithm. (a) Detection results of Fig. 4(a); (b) detection results of Fig. 4(b); (c) detection results of Fig. 4(c)

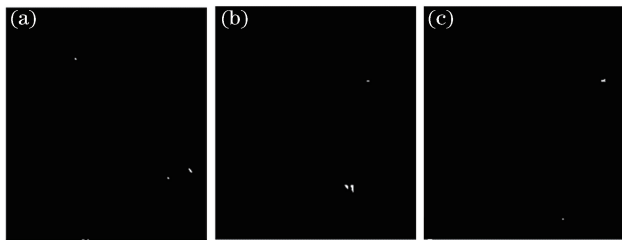


图6 文献[22]算法的检测结果。(a)图4(a)的检测结果;(b)图4(b)的检测结果;(c)图4(c)的检测结果

Fig. 6 Detection results by algorithm in Ref. [22]. (a) Detection results of Fig. 4(a); (b) detection results of Fig. 4(b); (c) detection results of Fig. 4(c)

对比文献[22]算法,使用虚警率为两种方法的评价因子,定义为

$$f = \frac{N_n}{N_a}, \quad (20)$$

式中: $f$ 为虚警率; $N_n$ 为非目标连通域数量; $N_a$ 为所有连通域数量。

对图4的3幅图像检测结果分别如图6的3幅图像所示。经过多次实验,发现文献[22]的窗口大小设定为 $15 \times 15$ 、滤波方式选择中值滤波时效果最好。文献[22]的虚警率分别为0.667,0.667,0.500,本文的虚警率分别为0,0,0。除了性能上的比较,本文也在计算速度上与文献[22]进行了对比,文献[22]对应程序的平均运行时间为1.154 s,所提算法对应的程序平均运行时间为0.127 s。

另外,本文分别用以上两种算法对与图 4 类似的剩余 20 幅红外图像进行了性能比较,如图 7 所示。

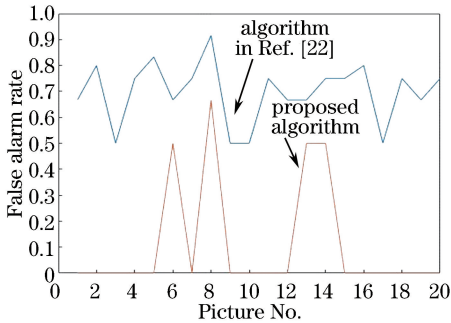


图 7 算法性能对比图

Fig. 7 Performance comparison of algorithms

## 5.2 结果分析

与文献[22]进行检测结果对比可知,在现有硬件条件下,所提算法的虚警率提高 58% 以上,运行速度也提高 9 倍左右。所提算法特别加入了(9)式的判断条件,它能防止把背景物体的某个小部分误检测成为小目标,所以相对于其他算法,所提算法能有效地降低检测虚警率。云与云之间往往有着一定的联系,或者小云朵相对于局部背景较暗淡,凡是有“桥梁”的目标全部从疑似目标库中删除,从而能保证所提算法的虚警率较低。另外,对于丢失的目标进行了分析,发现如果非目标的灰度值、大小非常接近目标的话,所提算法有目标丢失的情况。本文认为它的原因是目标无法提取形状等额外特征,只根据现有特征来判断目标是否存在是不够的<sup>[23]</sup>。另外在程序中使用了动态内存的方式调用图片的元素,未来会改用指针的方式来提高运行速度。

## 6 结 论

通过更新均值的方法来找到背景像素点,利用统计特性来提取弱小目标;通过“桥梁”来判断真假目标;通过 3 种筛选方式的其中一种进行目标筛选。对比目前的成熟算法,所提方法有效地降低了虚警率,并提高了运行速度。但是在实验所用的硬件条件下,所提算法的实时性距离 30 frame/s 还存在一定差距。

把滑动窗口大小改为自适应并配合前几帧的目标位置信息来降低目标丢失率是下一步研究的方向。

## 参 考 文 献

[1] Gao J L, Li H, Zheng C Y. Multiwavelet multi-

resolution texture analysis based small detection in infrared image [J]. *Infrared Technology*, 2003, 25 (6): 25-27.

高景丽, 李红, 郑成勇. 基于向量小波多尺度纹理分析的红外小目标检测 [J]. *红外技术*, 2003, 25(6): 25-27.

[2] Sun Y Q, Li S L, Tian J W, *et al.* LS-SVM based dim and small infrared target dual-band fusion detection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6795: 67953J.

[3] Gao J L, Wen C L, Liu M Q. Robust small target co-detection from airborne infrared image sequences [J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2242.

[4] Sokolnikov A. Time series modeling for automatic target recognition [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8391: 839104.

[5] Wang X, Bi D Y. Dim targets detection based on local character information measurement [J]. *Computer Engineering*, 2007, 33(12): 19-21, 24.

王勋, 毕笃彦. 一种新的基于局部特征统计的小目标检测方法 [J]. *计算机工程*, 2007, 33(12): 19-21, 24.

[6] Wu T, He W Z, Chen X L. Detection algorithm of single frame infrared small target based on local features [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(3): 368-371.

吴涛, 何文忠, 陈晓露. 基于局部特征的单帧红外小目标检测算法 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(3): 368-371.

[7] Wu Y Q, Ji S X, Zhan B C. Infrared dim target detection based on nonsubsampling Contourlet transform and independent component analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0510002.

吴一全, 纪守新, 占必超. 基于无下采样 Contourlet 变换和独立分量分析的红外弱小目标检测 [J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0510002.

[8] Qi S X, Ma J, Tao C, *et al.* A robust directional saliency-based method for infrared small-target detection under various complex backgrounds [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 495-499.

[9] Wu Y Q, Zhou Y, Long Y L. Small target detection in hyperspectral remote sensing image based on adaptive parameter SVM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0928001.

吴一全, 周杨, 龙云淋. 基于自适应参数支持向量机的高光谱遥感图像小目标检测 [J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0928001.

- [10] Quan L, Pei D, Wang B, *et al.* Research on human target recognition algorithm of home service robot based on Fast-RCNN [C] // International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, October 9-10, 2017, Changsha. New York: IEEE, 2017: 369-373.
- [11] Chen C L P, Li H, Wei Y T, *et al.* A local contrast method for small infrared target detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52(1): 574-581.
- [12] Zhao J F, Feng H J, Xu Z H, *et al.* Real-time automatic small target detection using saliency extraction and morphological theory [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 47(4): 268-277.
- [13] Wang X Y, Peng Z M, Zhang P, *et al.* Infrared small target detection via nonnegativity-constrained variational mode decomposition [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(10): 1700-1704.
- [14] Yang C C, Ma J Y, Zhang M F, *et al.* Multiscale facet model for infrared small target detection [J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 67: 202-209.
- [15] Mao X, Diao W H. Criterion to evaluate the quality of infrared small target images [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009, 30(1): 56-64.
- [16] Liu J, Ji H B. An improved robust estimation algorithm for small IR target detection [C] // IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications, October 4-6, 2009, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE, 2009: 394-398.
- [17] Shi Y F, Wei Y T, Yao H, *et al.* High-boost-based multiscale local contrast measure for infrared small target detection [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(1): 33-37.
- [18] Wang Y H, Xu X P, Yue N N, *et al.* Small target detection using edge-preserving background estimation based on maximum patch similarity [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(6): 1-11.
- [19] Dong X B, Huang X S, Zheng Y B, *et al.* Infrared dim and small target detecting and tracking method inspired by Human Visual System [J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 62: 100-109.
- [20] Zhang Y, Shi Z G, Qiu T W. Infrared small target detection method based on decomposition of polarization information [J]. Journal of Electronic Imaging, 2017, 26(3): 033004.
- [21] Bi Y G, Bai X Z, Jin T, *et al.* Multiple feature analysis for infrared small target detection [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(8): 1333-1337.
- [22] Deng H, Sun X P, Liu M L, *et al.* Infrared small-target detection using multiscale gray difference weighted image entropy [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(1): 60-72.
- [23] Li A D, Lin Z P, An W, *et al.* Infrared small target detection in compressive domain based on self-adaptive parameter configuration [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1008003.
- 李安冬, 林再平, 安玮, 等. 基于自适应改进的压缩域红外弱小目标检测 [J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1008003.