

基于相关滤波器的红外弱小目标检测算法

何玉杰¹ 李 敏¹ 张金利^{1,2} 邢宇航¹

¹中国人民解放军第二炮兵工程大学 908 教研室, 陕西 西安 710025

²中国人民武装警察部队工程大学信息工程系, 陕西 西安 710086

摘要 针对复杂背景下红外图像中低信噪比弱小目标实时检测问题, 提出一种基于相关滤波器的红外弱小目标检测算法。该算法将红外目标检测转化为模式分类问题, 在离线训练阶段, 利用二维高斯模型构造红外弱小目标训练集, 在此基础上训练得到对目标背景具有区分能力的相关滤波器, 在线检测阶段, 利用滤波器对图像分块进行滤波操作, 目标和背景的滤波响应有着显著的差异, 最后生成整幅图像的滤波响应置信图以此来判断图像中是否包含目标及其具体位置。在单帧单目标图像、序列图像多目标检测实验结果表明, 与经典检测算法相比, 所提方法不仅具有更高检测性能, 有效降低了虚警概率, 而且具有较好的实时性, 适用于复杂背景条件下弱小目标的实时检测。

关键词 测量; 机器视觉; 红外弱小目标检测; 相关滤波器; 置信图

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0512001

Infrared Small Target Detection Method Based on Correlation Filter

He Yujie¹ Li Min¹ Zhang Jinli^{1,2} Xing Yuhang¹

¹Department of 908, The Second Artillery Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China

²Department of Information Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an, Shaanxi 710086, China

Abstract To solve the infrared target real-time detection problems caused by low signal to noise ratio with complex background, an infrared small target detection method based on correlation filter is proposed. The small target detection problem is transformed into pattern classification task, which consists of two stages: off-line training and on-line detection. In training stage, a correlation filter is obtained using the training dataset produced by two-dimensional Gaussian model. It has ability to distinguish target and background. In detection stage, the sub-image blocks of the infrared image are extracted successively and the filtering response confidence map which indicates the target location is computed. The experiments under two conditions demonstrate that the proposed method not only has better detection performance with effective reduction of the false alarm rate, but also has better real-time performance.

Key words measurement; machine vision; infrared small target detection; correlation filter; confidence map

OCIS codes 120.1880; 150.0155; 330.7326; 110.2970

1 引 言

红外弱小目标的检测是红外制导武器系统和预警系统中的关键技术之一, 检测效果直接影响了应用系统的性能, 在军事领域有着重要的作用和研究意义, 已经成为该领域的研究热点问题^[1-2]。红外图像本身的成像机会导致图像中红外目标缺乏有用的纹理和形状信息, 并且由于远距离的探测以及大气传输效应的影响, 通常目标的信号较弱, 尺寸较小, 且极易被噪声和背景杂波所淹没, 这些不利因素使得红外小目标的检测变得更加困难^[3]。

目前, 各类不同的红外弱小目标检测算法不断地涌现, 主要分为基于多帧检测和单帧检测两大类^[4-5]。由于基于多帧检测的方法通常是以单帧图像检测为基础, 并且在很多高速运动检测平台上多帧检测算法无

收稿日期: 2015-11-27; **收到修改稿日期:** 2015-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(61102170)

作者简介: 何玉杰(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事红外图像处理方面的研究。E-mail: ksy5201314@163.com

导师简介: 李 敏(1971—), 女, 博士, 教授, 主要从事红外图像处理方面的研究。E-mail: clwn@163.com

法保持稳定的检测性能,因此基于单帧图像的红外弱小目标检测算法一直是相关领域的研究重点,其主要分为以下三种策略:1)背景抑制方法^[6-8],这类方法在对背景进行建模的基础上,利用背景图像与原图的做差实现目标分离。但背景较为复杂时,往往很难找到合适的背景模板适用于整个图像从而造成目标的丢失;2)目标奇异性分析方法^[9-10],是将图像中的小目标看作是信号中的奇异点进行处理,从而将其与背景分开。但这类方法在一定程度上损失了小目标的有效信息,当小目标较弱时,检测率相对较低;3)基于机器学习等智能算法的检测方法^[11-13],这类方法利用一系列数学工具将目标检测转化为模式分类等相关问题,完成检测任务。但往往其在线学习或信号处理计算量较大,限制了检测方法的实时性应用能力。

近期,随着模式识别技术的发展,机器学习相关的智能算法取得了较大的进步。尤其是相关滤波理论因其对目标形变以及噪声干扰的稳健性强,在可见光目标跟踪中得到了良好的应用^[14-16]。同时其计算复杂度非常低,实时性很高,非常适用于各类军事应用环境。因此,本文提出了一种基于相关滤波器的红外弱小目标检测算法,该方法将相关滤波器作为弱分类器进行离线训练,在此基础上利用目标背景成份的滤波响应差异生成能够表征目标位置的置信图,从而完成目标检测任务。不同条件下的实验表明,本算法不仅能够有效突出目标成份,增大目标背景对比度,提升检测效率,而且计算量较小、实时性较强,适用于复杂场景条件下目标的实时检测。

2 相关滤波器

相关滤波器在很多领域当中都已经有了广泛的应用,如行人检测、目标跟踪等,尤其是在目标跟踪方面更是取得了较好的效果。相关滤波器可以被看作是用以度量两个函数相关性的数学工具,其基本的运算公式为^[17]

$$g = fh, \quad (1)$$

式中, h 为相关滤波, f 为原始输入信号, g 为信号 f 在滤波 h 作用下的输出,可以作为 f 的另一种表现形式,为滤波运算。在很多图像处理应用当中使用卷积运算作为相关滤波操作。并且卷积运算自身有着速度快效率高的计算特性,空间域的卷积操作可以转化为频率域的乘积,利用快速傅里叶变换可以很快得到滤波结果。因此,通常情况下的相关滤波运算为

$$g = h \otimes f, \quad (2)$$

$$f \otimes h(x) = \sum_{dx=-\infty}^{\infty} f(dx)h(x-dx)。$$

在红外小目标检测问题中,(2)式中 $f \in R^{P \times Q}$ 代表一幅含有目标的图像,滤波器 $h \in R^{P \times Q}$ 可以将其映射为一个能够表征目标位置的置信图并同时抑制背景杂波。滤波过程中,图像数据和滤波器都应被映射到频域当中,这样时域的卷积运算在频域就可以被乘法运算所代替:

$$g = h \otimes f = \mathcal{F}^{-1}(F \times H)。 \quad (3)$$

即

$$G = F \times H, \quad (4)$$

式中, F, H 和 G 分别为 h, f 和 g 的频率域表示, \mathcal{F}^{-1} 表示快速傅里叶逆变换。最终在置信图上最大的响应信号位置就是目标的中心位置。

3 基于相关滤波的检测算法

由于红外制导武器和预警系统通常针对高速移动的应用平台,其对检测算法实时性和准确性都有着较高的要求,且实际环境中红外弱小目标的成像面积较小、边界模糊不清,场景中干扰源很多、背景辐射复杂,这对算法性能有着很大的影响。而相关滤波能够根据学习到的模板对相似目标产生较强响应信号,并且计算复杂度很低、运算速度较快,非常适合对实时性要求较高的应用场景。因此,提出一种基于相关滤波的红外弱小目标检测算法,该算法将红外弱小目标检测分为两个步骤:离线训练和在线检测。其主要工作流程如图1所示。

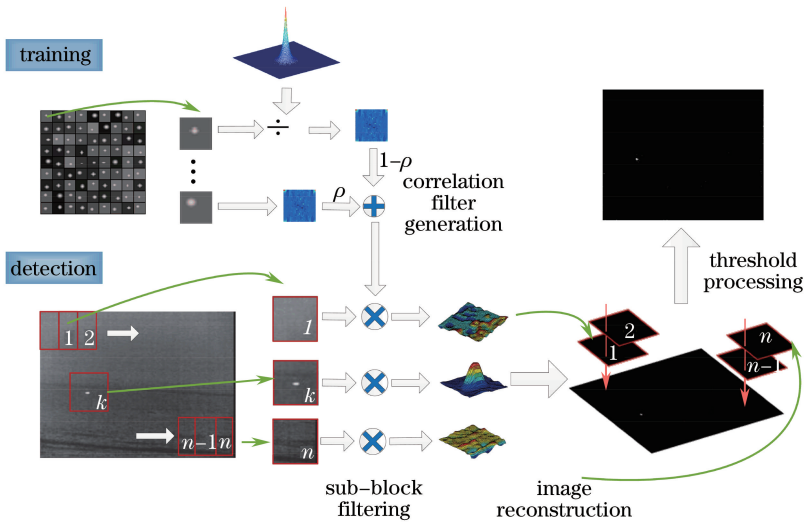


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of proposed method

在预训练阶段,利用构造的红外小目标数据集按照一种轻量级的学习方式对相关滤波器进行训练,得到能够对弱小目标产生较强响应的相关滤波器。在检测阶段,将测试图像进行分块提取,并计算每个图像块在滤波条件下的响应图,而后对每个响应图像块进行重组,最后通过阈值后处理得到红外弱小目标的检测结果。

3.1 滤波器训练

红外小目标的检测是利用已经学习到目标特性的相关滤波器对目标和背景进行区分,因此,对于滤波器的训练和弱小目标性状的学习是本方法的首要步骤。已有的相关滤波器算法之间的一项主要差异就在于滤波器的更新策略不同,比如:合成精确滤波器平均值(ASEF)^[14]就是将相关滤波器看作一个弱分类器,对每个样本响应的滤波进行平均使其具有对不同状态下目标的描述响应能力。而平方误差最小输出和(MOSSE)^[15]方法是通过最小化理想置信图数据和实际卷积结果之间的二乘差,并对其进行求解最终在线得到相关滤波器。

针对红外小目标检测的实际应用,相关滤波器采用离线训练的方式,这样滤波器的训练和构造是全程可控,对目标描述准确性较好,且可以根据不同的应用背景进行具体调整。由于目前红外目标数据采集多用于军事领域,且拍摄条件较为严格,相关图像难以获取,尚无公开使用的数据集和测试数据库。一般来说,红外系统的成像距离为 10 km 以上,空间分辨率约为 0.1~0.5 mrad,目标在所呈红外图像中只占 1 pixel×1 pixel~9 pixel×9 pixel。普遍的红外小目标在图像上呈现为一个亮斑或点状。因此,使用二维高斯模型来对红外小目标进行建模^[4,18],这种采用模拟生成的方式可以抓住小目标的几何结构特征,更加灵活。通过调节模型中的参数,来生成一系列红外小目标样本图像,继而构造红外弱小目标的训练集:

$$T(i, j) = I_{\max} \exp \left\{ -0.5 \left[\frac{(i - x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(j - y_0)^2}{\sigma_y^2} \right] \right\} \quad \text{s.t.} \begin{cases} t_1 < I_{\max} / \sigma_x^2 < t_2 \\ t_1 < I_{\max} / \sigma_y^2 < t_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中 I_{\max} 是目标中心点像素值, (x_0, y_0) 是图像中心点坐标, (i, j) 为图像其他的像素坐标, σ_x 和 σ_y 分别代表水平散布参数和垂直散布参数。通过调节 I_{\max} , (x_0, y_0) , σ_x 和 σ_y 4 个参数,即可以获得不同中心点位置,不同亮度,不同形状的红外小目标样本图像。 t_1, t_2 为常数用来对生成的小目标真实感进行约束。产生的红外小目标训练集如图 2 所示。

对于生成的第 t 个训练样本 d_t ,其目标中心位置在 (x_t, y_t) ,理想置信图为

$$g'_t(x, y) = \exp \left[- \left| \frac{(x - x_t) + (y - y_t)}{\sigma} \right| \right] \quad (6)$$

通过(6)式可以得到对第 t 个样本有较强响应的理想滤波:

$$h'_t = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{\mathcal{F}(g'_t)}{\mathcal{F}(d_t)} \right] \quad (7)$$

考虑前面所有样本训练结果对于滤波整体的影响,采用一种轻量级的滤波训练方式,实际的相关滤波

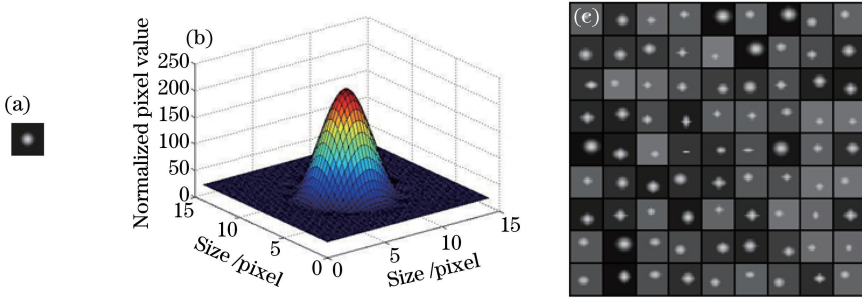


图 2 红外小目标训练集. (a)小目标样本; (b)小目标样本三维显示图; (c)训练集中的部分小目标

Fig. 2 Database of infrared small targets. (a) Sample of a target; (b)3D mesh of a target ; (c) part of the database

器为:

$$h_t = (1 - \rho)h_{t-1} + \rho h'_t, \quad (8)$$

式中, ρ 为更新因子. 这种滤波更新的方式简单易行, 且使得滤波器对于目标外形的变化更为稳健. 对于第一个训练样本而言, 初始化 $h_1 = h'_1$.

3.2 红外小目标检测

根据上述构造的红外小目标数据集, 训练得到对于目标背景具有区分能力的相关滤波器, 将输入图像分块, 对每块子图进行滤波操作, 得到其响应图像块, 通过对同一位置像素相邻响应图像块的中值操作, 最终生成检测结果图像并可以判断是否含有小目标, 从而完成检测任务. 具体的步骤如下:

- 1) 图像数据分块采样, 利用 $m \times m$ 的采样窗口从上到下从左到右按照一定步长进行遍历, 提取图像子块.
- 2) 对每个图像子块利用训练步骤学习到相关滤波进行滤波操作, 可以得到能够表征目标的响应图像块:

$$g_i = \mathcal{F}^{-1} [\mathcal{F}(h) \times \mathcal{F}(k_i)], \quad (9)$$

式中, g_i 为第 i 个响应图像子块, h 为预训练的相关滤波器, k_i 为第 i 个图像子块.

若图像子块中不含有目标只有背景, 则整个响应图像块趋于均匀, 并无突起亮点, 反之, 若图像子块中包含目标, 则响应图像块中含有较强的响应亮点, 能够表征目标的位置所在. 如图 3 所示, (a)为子块中不含有目标的响应图像块三维(3D)视图, (b)为子块中包含目标的响应图像块三维视图.

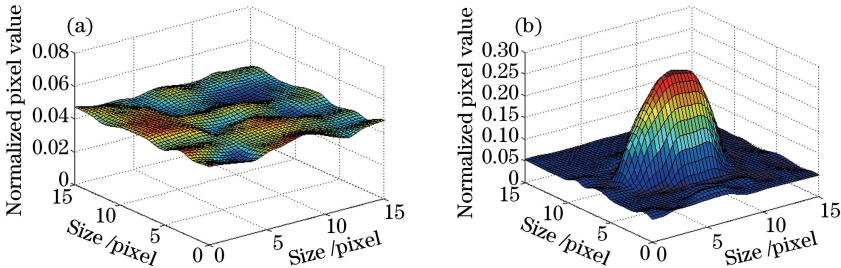


图 3 目标背景的滤波响应图像. (a)相关滤波在背景成份的响应; (b)相关滤波在目标成份的响应

Fig. 3 Response images of correlation filter for target background. (a) Response of filter in background component;

(b) response of filter in target component

3) 响应图像重构, 利用每个响应图像块生成整幅图像的置信图, 由于采样滑动步长通常小于窗口大小, 会造成同一位置像素 v 在相邻的 i 个响应图像子块中有不同的值 $x \in R^i$, 采用 $v = \text{median}(x)$ 对其进行计算, 重构得到能够表征目标位置的置信图 f .

4) 对置信图进行阈值后处理操作, 设定阈值 β , 令 M 为 f 中最大值点, 且如果 $\beta M \leq f(x, y)$, 则 (x, y) 点为目标点.

4 实验及结果分析

4.1 实验设计

为了验证算法的性能和检测效果, 进行两组小目标检测实验, 第 1 组为单帧图像单目标检测实验, 利用

所提算法对 5 幅不同背景的红外图像进行检测并给出直观检测结果。第 2 组为序列红外图像多目标检测实验,在 4 组红外视频图像序列中每一帧添加不同种类和数量的小目标,并通过客观评价指标与经典检测算法进行比较,得到客观对比结果。实验过程中,(5)式中参数 t_1 和 t_2 分别为 20 和 60,(6)式中 $\sigma=0.8$,小目标数据集和图像遍历窗口大小为 16×16 ,遍历步长为 4,检测阈值 $\beta=0.7$,滤波更新的参数 $\rho=0.08$ 。实验运行软件环境 Windows 7+Matlab 2012b,硬件环境 CPU 主频为 2.4GHz,内存为 2GB。

4.2 单帧单目标检测实验

如图 4 所示为本方法第 1 组单帧单目标检测实验效果图,图 4(a)为 5 幅原始红外测试图像,以海面、空中目标为主,可以看出第一幅图中噪声杂波较为严重,目标信号较弱几乎已经淹没在杂波当中。第 5 幅图背景中有大范围高亮度区域,其灰度值已经明显超过目标。第 3、4 幅红外图像中目标尺寸相较于其他图像更小,呈点状,容易被误认为高亮度的噪声点。图 4(b)为 5 幅红外图像的检测结果,图 4(c)为检测结果三维显示图,可以看出检测结果在目标所在位置处产生较强的滤波响应,而在其他平滑的背景区域响应较小。因此本算法可以在抑制背景杂波的同时,有效地增强目标的信号强度和目标背景的对比度,突出目标完成检测任务。

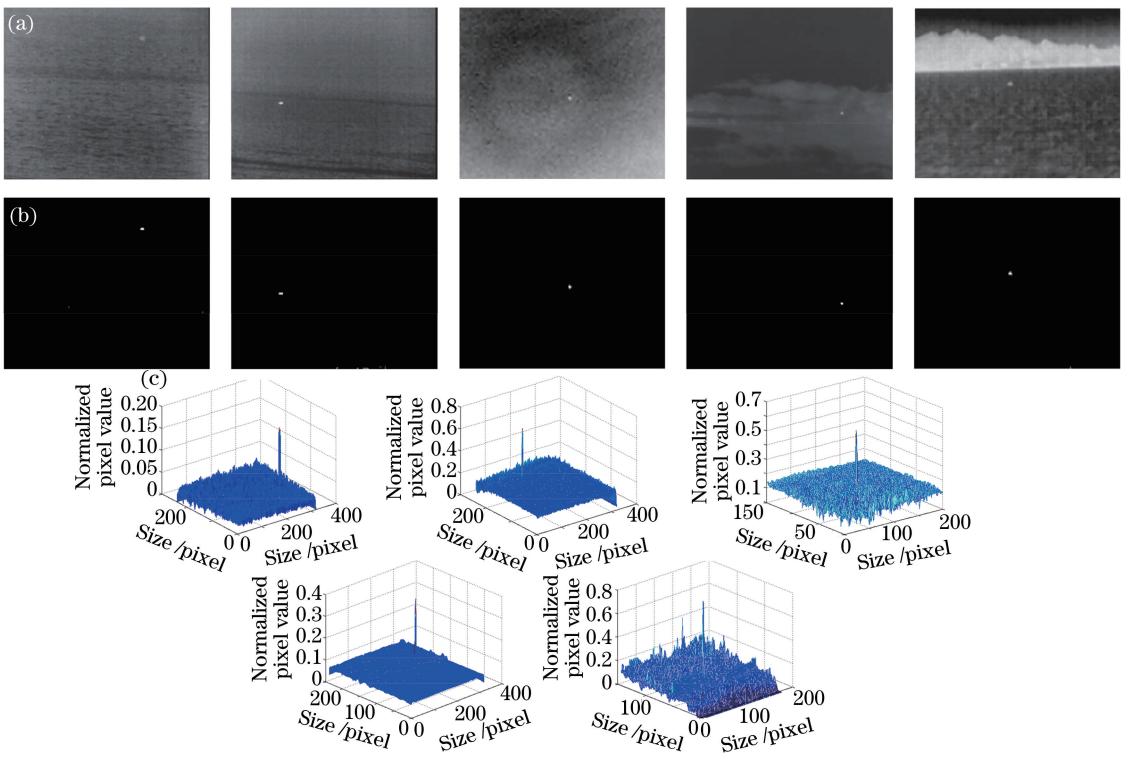


图 4 红外图像检测结果图。(a)5 幅待检测图像;(b)本算法检测结果;(c)检测结果的三维显示

Fig. 4 Detection results of infrared images. (a) Five original images; (b) detection results of proposed method; (c) 3D mesh of the results

4.3 序列图像多目标检测实验

为了更进一步说明本算法的性能,对 4 组红外视频序列图像进行多目标检测实验。由于目前并无公开和广泛使用的红外小目标检测数据库,因此,采用在真实红外视频图像中添加不同数量仿真目标的方法来完成实验数据的建立,形成含有多目标的红外图像集^[19]。

表 1 多小目标图像四序列信息

Table 1 Details of four sequences of multi-targets

	Seq 1	Seq 2	Seq 3	Seq 4
Number of frames	50	100	150	100
Number of targets	235	534	687	421
Average number of target pixels	21.4 pixel	43.5 pixel	61.3 pixel	32.7 pixel

合成的多小目标图像序列,按照图像背景的视频归属分为 4 组,共产生 1877 个红外小目标,具体情况如

表 1 所示。分别从各组中取出一张红外图像,如图 5 所示,可以看出仿真生成小目标大小不一,且由于嵌入位置随机使得目标局部信噪比各不相同,基本能够反映真实红外小目标的特性,可以作为实验数据集使用。从图中可以看出图 5(a)中有面积较大的厚云层遮挡,部分目标所处位置在云层和天空交接处,图 5(b)目标背景对比度极低,远处的目标肉眼几乎已经无法观察,图 5(c)和图 5(d)中少数目标也几乎被背景杂波所掩盖,尤其是图 5(c)中右下方由实红线框出的两个目标。

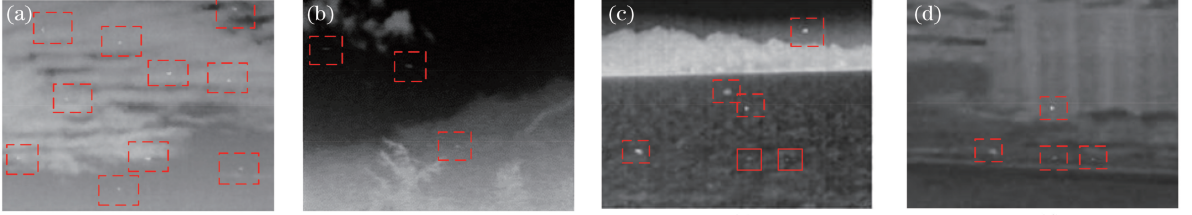


图 5 4 组红外图像序列的代表图像。(a) 视频 1; (b) 视频 2; (c) 视频 3; (d) 视频 4

Fig. 5 Representative images for four groups of synthetic image. (a) Seq 1; (b) seq 2; (c) seq 3; (d) seq 4

在生成红外测试数据集的基础上,将经典红外小目标检测算法 max-median、top-hat、二维最小均方差 (TDLMS)、红外块图像模型 (IPI)^[19] 和局部对比度量模型 (LCM)^[20] 算法作为实验对比算法,并采用受试者工作特征 (ROC) 曲线、局部信噪比 (LSNR)^[19] 和局部信噪比增益 (LSNRG) 作为算法性能客观评价指标。其中,ROC 曲线是检测概率 p_d 和虚警概率 F_a 的函数曲线,曲线以下包含的面积越大,表明算法检测性能越好。

$$p_d = N_r / N_T, \quad F_a = N_w / N_i, \quad (10)$$

式中, N_r 为小目标正确检测的个数, N_T 为小目标个数, N_w 为小目标错误检测的个数, N_i 为图像的个数。而局部信噪比如下式所示:

$$L_{SNR} = P_T / P_B, \quad (11)$$

式中, P_T 为局部区域内目标最大像素灰度值,选择局部区域大小为目标区域大小的 3 倍。 P_B 为目标区域内背景像素最大值。 L_{SNR} 值越大,表明局部区域内目标与背景的灰度对比值越大,目标相比背景而言就更为显著,因而检测效果就越好。

$$L_{SNRG} = L_{SNR_{out}} / L_{SNR_{in}}, \quad (12)$$

式中, $L_{SNR_{out}}$ 和 $L_{SNR_{in}}$ 分别为算法检测前后局部区域的 L_{SNR} 值, L_{SNRG} 越大,表示算法对图像的 L_{SNR} 增益效果越好。

图 6 为 6 种算法利用 4 组红外视频序列图像进行多小目标检测实验结果图,测试算法均调整参数使得其效果最优。从检测结果来看,视频 1 图像中,个别目标处在云层和天空的交汇处,被较厚的云层所遮挡,LCM、IPI 和本算法均能较好地突出目标,但后两种算法所残留的噪声杂波最少。视频 2 图像中,由于目标

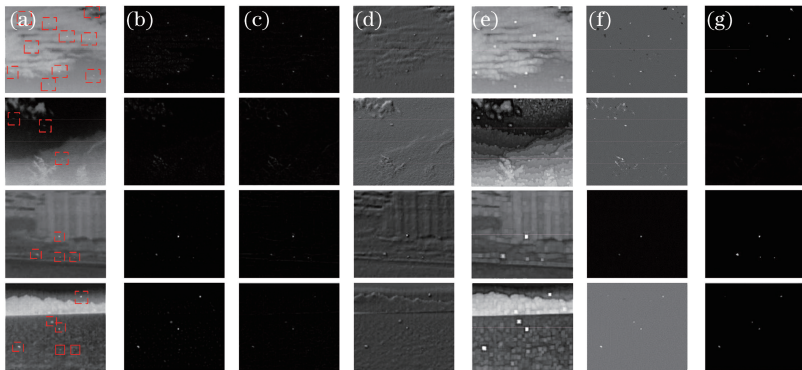


图 6 5 种算法处理结果。(a) 4 组图像序列的代表图像; (b) 滤波模板为 9×9 的 max-median 算法; (c) 滤波模板为 12×12 的 top-hat 算法; (d) $\mu = 10^{-6}$ 的 TDLMS 算法; (e) LCM 算法; (f) IPI 算法; (g) 本方法

Fig. 6 Results of five different methods. (a) Representative images for four groups of synthetic images; (b) max-median with filter size of 9×9 ; (c) top-hat with filter size of 12×12 ; (d) TDLMS with parameter $\mu = 10^{-6}$; (e) LCM; (f) IPI; (g) proposed method

较弱已经几乎淹没在背景中,6种算法对其的检测效果均不理想,在结果图像中都包含有大量的杂波,相比之下,IPI算法效果略好。视频3图像中,4个目标与背景原始对比度较高,6种算法都能够实现目标检测,但本算法对于右下角两个较弱的目标也能够有效检出,且噪声点最少,虚警率最低。视频4图像中,海洋背景杂波较为严重,右下角两个目标已经被严重淹没,6种算法基本对于这两个目标均无法实现有效检测,相比之下,IPI和本算法的效果优于其他方法。同时可以看出,LCM方法由于其区域对比度增强的特性,会导致在增强目标点的同时扩大其像素范围,在检测结果图像中产生块状的目标斑,这不仅增大了虚警率,而且无法保留目标的原始形状和轮廓信息,使得后续识别跟踪处理难以进行。而IPI算法的检测效果较好,部分目标的增强效果优于本方法,但其计算过程耗时较长,实时性较差如表2所示,不能适用于实时性要求较高的场所。总的可以看出,相比其他5种算法,本方法在凸出目标的同时,能够更为有效地减少背景的残余噪声和杂波,且更适用于实时要求高得应用环境。

表2 6种算法运算速度比较

Table 2 Calculation speed comparison of six methods

Method	Max-median	Top-hat	TDLMS	LCM	IPI	Proposed
Time/(s/frame)	2.57	0.96	1.56	5.81	25.4	0.87

表2给出了对于4组仿真图像序列经过5种算法的检测概率 P_d (虚警概率为2/frame)、平均LSNR以及平均LSNRG的对比结果。4组图像序列的原始目标平均LSNR分别为1.84、1.28、1.68、1.49。从表中可以看出,和其他4种算法相比,所提LRSR算法不仅在检测概率上而且在LSNR和LSNRG上均为最大,说明本方法具有更好的目标增强和背景抑制的能力。

表3 不同算法检测性能对比

Table 3 Performance comparison of different methods

		Seq 1	Seq 2	Seq 3	Seq 4
P_d	Max-median	0.81	0.59	0.88	0.79
	Top-hat	0.73	0.51	0.86	0.77
	TDLMS	0.67	0.39	0.79	0.70
	LCM	0.89	0.79	0.93	0.84
	IPI	0.95	0.88	0.96	0.89
	Proposed method	0.96	0.85	0.97	0.88
Average LSNR	Max-median	3.37	1.73	7.06	6.36
	Top-hat	3.07	1.59	6.21	5.77
	TDLMS	2.63	1.50	6.17	4.31
	LCM	6.56	3.02	7.39	5.12
	IPI	8.92	4.43	9.12	8.15
	Proposed method	9.06	4.12	9.31	8.52
Average LSNRG	Max-median	1.83	1.35	4.20	4.26
	Top-hat	1.67	1.24	3.69	3.87
	TDLMS	1.43	1.17	3.67	2.89
	LCM	3.56	2.35	4.40	3.43
	IPI	4.84	3.46	5.42	5.47
	Proposed method	4.92	3.22	5.54	5.71

图7为4组图像序列检测结果的ROC曲线图,从图7中可以看出,IPI方法和本方法相较于其他4种方法优势较为明显。而这两种方法的ROC曲线大部分相互重叠,性能相近,但本方法曲线下方包络面积略大于IPI方法,说明本方法在此4组视频序列中的检测性能是最优的。

5 总 结

针对红外小目标检测过程中的实际问题,提出一种基于相关滤波器的红外弱小目标检测算法,该方法利用相关滤波器对目标背景的响应差异实现对两者的区分,得到红外图像的滤波响应图像,进而对其进行后处

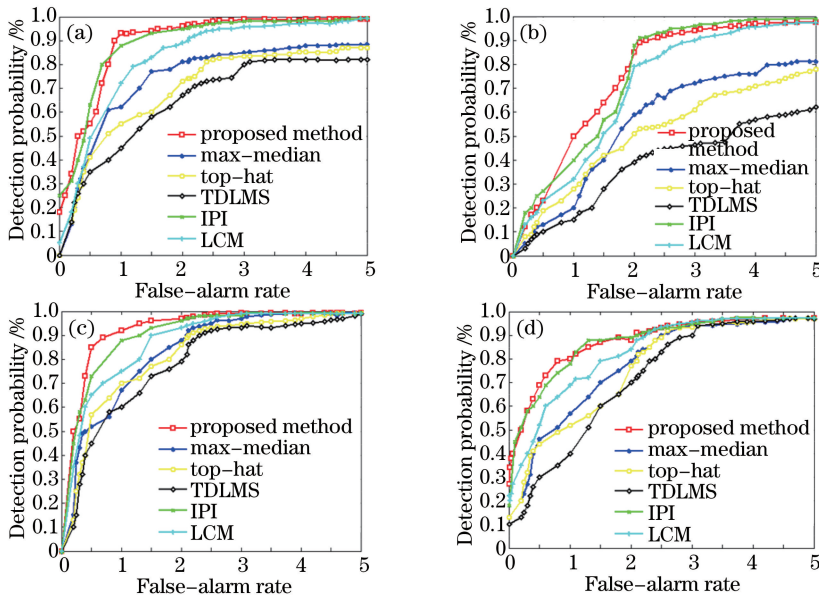


图 7 4 组图像序列检测结果 ROC 曲线图。(a) 视频 1; (b) 视频 2; (c) 视频 3; (d) 视频 4

Fig. 7 ROC curves of detection results of four groups image. (a) Seq 1; (b) seq 2; (c) seq 3; (d) seq 4

理阈值操作完成检测任务。从直观检测效果、局部信噪比、算法实时性以及 ROC 曲线 4 个方面将所提算法与经典算法相比较,取得了良好的实验结果。下一步将对于红外小目标的模型进行扩展和补充,以进一步提高本方法的普适性和准确性。

参 考 文 献

- 1 Yang Linna, An Wei, Lin Zaipin, *et al.*. Small target detection based on visual saliency improved by spatial distance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0715004.
杨林娜, 安 玮, 林再平, 等. 基于空间距离改进的视觉显著性弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0715004.
- 2 Cheng Gong, Guo Lei, Han Junwei, *et al.*. Infrared dim small target detection based on morphological band-pass filtering and scale space theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1015001.
程 焜, 郭 雷, 韩军伟, 等. 基于形态学带通滤波和尺度空间理论的红外弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1015001.
- 3 Fang Yiqiang, Zhu Bin, Fan Xiang, *et al.*. Air infrared target detection based on partial graying[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4):0404001.
方义强, 朱 斌, 樊 祥, 等. 局部灰度化的空中红外目标探测方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0404001.
- 4 Lin Chang, He Bingwei, Dong Shengsheng. An indoor object fast detection method based on visual attention mechanism of fusion depth information in RGB image[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1108005.
林 昌, 何炳蔚, 董升升. 融合深度信息的室内 RGB 图像视觉显著物体快速检测方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1108005.
- 5 He Y J, Li M, Zhang J L, *et al.*. Small infrared target detection based on low-rank and sparse representation[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2015, 68: 98-109.
- 6 M Zeng, Li J, Peng Z. The design of top-hat morphological filter and application to infrared target detection[J]. *Infrared Phys Technol*, 2006, 48(1): 67-76.
- 7 Wang P, Tian J, Gao C. Infrared small target detection using directional highpass filters based on LS-SVM[J]. *Electron Lett*, 2009, 45(3):156-158.
- 8 Cao Y, Liu R M, Yang J. Small target detection using two-dimensional least mean square (TDLMS) filter based on neighborhood analysis[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 29(2): 188-200.
- 9 Zheng C, Li H. Method of infrared target detection based on the characteristic analysis of the local grey level[J]. *Infrared Laser Eng*, 2004, 33(4): 362-365.
- 10 Deshpande S D, Meng H E, Ronda V, *et al.*. Max-mean and max-median filters for detection of small targets[J].

- SPIE, 1999, 3809: 74-83.
- 11 Liu Z J, Chen C Y, Shen X B. Detection of small objects in image data based on the nonlinear principal component analysis neural network[J]. *Opt Eng*, 2005, 44(9): 093604.
 - 12 Cao Y, Liu R, Yang J. Infrared small target detection using PPCA[J]. *Int J Infrared Millimeter Waves*, 2008, 29(4): 385-395.
 - 13 Liu R, Zhi H. Infrared point target detection with Fisher linear discriminant and kernel Fisher linear discriminant[J]. *J Infrared Millimeter Terahertz Waves*, 2010, 31(12): 1491-1502.
 - 14 Bolme D S, Draper B A, Beveridge J R. Average of synthetic exact filters[C]. *Proce of the 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2009: 2105-2112.
 - 15 Bolme D S, Beveridge J R, Draper B A, *et al.*. Visual object tracking using adaptive correlation filters[C]. *Proce of the 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*, 2010: 2544-2550.
 - 16 Martin D, Gustav H, Fahad S K, *et al.*. Learning spatially regularized correlation filters for visual tracking[C]. *Proce of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision(ICCV)*, 2015: 13-16.
 - 17 Bolme D S. Theory and applications of optimized correlation output filters[D]. Fort Collins: Colorado State University, 2011: 11-13.
 - 18 Zhao Jiajia, Tang Zhengyuan, Yang Jie, *et al.*. Infrared small target detection based on image sparse representation[J]. *J Infrared Millim Wave*, 2011, 30(2): 156-161.
赵佳佳, 唐峥远, 杨 杰, 等. 基于图像稀疏表示的红外小目标检测算法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(2): 156-161.
 - 19 Gao C Q, Meng D Y, Yang Y, *et al.*. Infrared patch-image model for small target detection in a single image[J]. *IEEE Tansactions on Image Processing*, 2013, 22(12): 4996-5009.
 - 20 Chen P C L, Li H, Wei Y T, *et al.*. A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Tansactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 574-580.