

引用格式: PAN Sheng-da, ZHANG Su, ZHAO Ming, *et al.* Infrared Small Target Detection Based on Double-layer Local Contrast Measure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0110003

潘胜达, 张素, 赵明, 等. 基于双层局部对比度的红外弱小目标检测方法[J]. 光子学报, 2020, 49(1): 0110003

基于双层局部对比度的红外弱小目标检测方法

潘胜达, 张素, 赵明, 安博文

(上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

摘 要: 针对传统基于人类视觉系统的检测方法在复杂背景下容易造成检测虚警的问题, 提出一种基于双层局部对比度的红外弱小目标检测方法. 首先, 通过双层对角灰度差对比度分析机制, 充分利用小目标局部对比度的先验信息, 提高目标对比度的同时抑制背景杂波及噪声; 之后, 利用自适应阈值分割法获取待检测的真实目标. 实验结果表明, 与主流基于人类视觉系统的检测方法相比, 所提方法的背景抑制因子平均提高 9.3 倍以上, 信杂比率增益平均提高 7.8 倍以上, 在不同的复杂场景下均具有更好的检测性能.

关键词: 红外弱小目标; 目标检测; 人类视觉系统; 双层局部对比度; 对角灰度差

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204901.0110003

Infrared Small Target Detection Based on Double-layer Local Contrast Measure

PAN Sheng-da, ZHANG Su, ZHAO Ming, AN Bo-wen

(College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Traditional infrared small target detection methods based on the human visual system can easily cause false alarm detection in complex backgrounds. Therefore, to address this issue, an accurate and robust infrared small target detection method called Double-layer Local Contrast Measure (DLCM) was proposed. First, a double-layer-diagonal gray difference contrast was proposed to enhance the visual saliency of the target and alleviate the impact on background clutter and noise. After that, an adaptive threshold segmentation was used to obtain the real target. The experimental results show that, compared with the mainstream detection methods based on human vision system, the background suppression factor of the proposed method is increased by an average of 9.3 times and the signal to clutter ratio gain is increased by an average of 7.8 times, which have better detection performance in different complex scenarios.

Key words: Infrared dim target; Target detection; Human visual system; Double-layer local contrast Measure; Diagonal gray difference

OCIS Codes: 100.2000; 100.2960; 110.4155

0 引言

由于红外搜索跟踪(Infrared Search and Track,IRST)系统具有全天候成像、一定程度穿透雾以及探测距离远等优点,因此在精确制导以及预警等远距离目标探测场景中得到了广泛的应用^[1].但在实际的IRST系统中,目标在远距离情况下呈现出小目标特性,即在图像中所占比例很小且不具备纹理结构信息^[2].不仅如此,在复杂背景和低信杂比条件下,小目标极容易被背景杂波和噪声湮没.因此,在复杂背景下实现红外弱小目标的准确检测仍是一个具有挑战的研究课题.

在过去的二三十年间,相关学者对单帧弱小目标检测问题进行了大量的研究.早期的目标检测算法大多通

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61302132,61504078,41701523),国家重点研发计划项目((No.2017YFC1405402)

第一作者:潘胜达(1986—),男,讲师,博士,主要研究方向为遥感图像处理.Email:sdpan@shmtu.edu.cn

通讯作者:张素(1994—),女,硕士研究生,主要研究方向为红外小目标检测、图像处理.Email:1207904890@qq.com

收稿日期:2019-07-22;录用日期:2019-09-05

<http://www.photon.ac.cn>

过线性或非线性滤波来实现目标增强及背景抑制,如顶帽变换(Top-Hat)、二维最小均方(Two-dimensional Least Mean Square, TDLMS)滤波器、最大中值滤波器(Max-median filter)以及小波变换等^[3-6]。除滤波器方法外,也有学者将统计学模型应用于红外弱小目标检测中,如 XUE Yong-hong 等^[7]通过引入马尔可夫随机场(Markov Random Field, MRF)模型实现了背景与红外目标的二元分类,但是当先验信息不足时其算法性能很难得到保证。之后,另有学者将矩阵分解和张量分解理论应用于弱小目标检测中,如 GAO Chen-qiang 等^[8]将目标-背景分离问题转化为低秩和稀疏矩阵分解的问题,该类型算法实现时通常需要完成多次矩阵分解的迭代,因此算法实时性有待进一步提高^[9-10]。近两年,随着深度学习的兴起,卷积神经网络也被逐渐应用于小目标检测^[11]。但考虑到小目标的特征与普通目标相差较大,一般的网络模型很难直接应用小目标检测,因此还未得到广泛应用。

近年来,基于人类视觉机制(Human Visual System, HVS)的目标算法由于具备较好的检测性和实时性也引起了相关学者的广泛关注。在人类视觉机制中,人眼通过对比度而非亮度来获取视觉显著性区域,以此区分目标及背景^[12]。在红外图像中的局部邻域内,目标与周围背景之间一般存在一定的对比度信息,因此,相比亮度信息而言,局部对比度信息更适合应用于红外小目标检测^[13]。早期的 HVS 类算法通过目标与周围局部背景的灰度比值来计算对比度,如局部对比度测量(Local Contrast Measure, LCM)^[14]和改进 LCM(Improved LCM, ILCM)^[15]等,因此对噪声和背景抑制性能有限。之后众多学者对该类型算法进行了多方面的改进,如基于多尺度块的对比度测量(Multiscale Patch-based Contrast Measure, MPCM)^[16]通过引入生物启发的视觉机制实现了亮目标和暗目标的同时检测,新的加权图像熵(Novel Weighted Image Entropy, NWIE)、局部差分测量(Local Difference Measure, LDM)等算法通过引入信息熵的概念提高算法的背景抑制能力^[17-19]。新型 LCM(Novel LCM, NLCM)^[20]和相对 LCM(Relative LCM, RLCM)^[21]等算法通过引入图像块内的多极值有效减少了噪声对算法的影响,多尺度灰度和方差差分(Multiscale Gray and Variance Difference, MGVD)测量方法通过引入图像块灰度方差的概念进一步抑制噪声和背景^[22]。总体而言,该类型算法通常在背景变化比较缓慢的场景下具有较好的检测性能和实时性,但是,当场景中存在亮度较高的非目标干扰时,如高亮边缘以及高亮度复杂背景等,就无法对干扰进行有效抑制。另外,对于不同大小的目标,该类算法需要使用不同大小的子窗口进行遍历,实时性存在进一步提高的空间^[23]。

针对以上问题,本文在传统 LCM 算法的基础上进行改进,提出了基于双层局部对比度机制(Double-layer Local Contrast Measure, DLCM)的红外弱小目标检测算法。首先,通过双层对角灰度差对比度分析机制,充分利用目标对比度分布的先验信息,提高目标对比度的同时进一步抑制背景杂波和噪声的干扰,增强目标区域的视觉显著性。之后,利用自适应阈值分割方法获取待检测的真实目标。实验结果证明所提算法是一种结构简单、实时性高且有效的弱小目标检测算法。

1 传统 LCM 算法原理

在实际观察红外小目标图像时,人类视觉系统往往能够很准确地从复杂场景中发现小目标,这是因为目标的灰度强度在一定程度上高于其局部背景,而且目标周围存在环绕的低灰度区,因此目标与背景的局部对比度较大,具有孤立的显著性^[24]。传统基于人类视觉系统的算法利用这一特征提高目标区亮度并抑制背景。

标准 LCM 算法采用一个滑动窗口对整幅红外图像从左到右、至上而下进行逐像素遍历计算图像的局部对比度,其所使用的滑动窗结构如图 1。

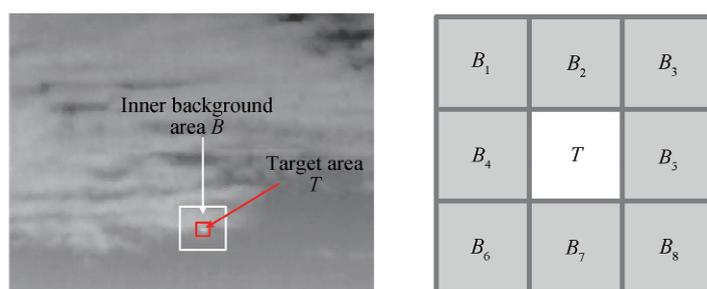


图 1 LCM 算法滑动窗结构
Fig.1 Nested structure of LCM

从图 1 可知,滑动窗口包含 3×3 共 9 个子窗.其中,位于中心的子窗 T 代表目标区域,位于四周的子窗 $B_1 \sim B_8$ 代表背景区域.每个子窗的平均灰度值 m_i 可表示为

$$m_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_u} P_j^i \quad (1)$$

式中, P_j^i 为第 i 个子窗中第 j 个像素的灰度值, N 为各子窗中像素的数量. $i=0, 1, 2 \dots 8$, 为子块的序号, 当 $i=0$ 时, m_0 代表为中心目标区域子窗 T 的灰度均值.

当窗口经过图像某一像素时,该像素的局部对比度量算子(LCM)可以用中心子窗和相邻的 8 个背景子窗口的灰度值表示,其表达式为

$$C = \min_i (L_0 \times c_i) = \min_i \left(L_0 \times \frac{L_0}{m_i} \right) = \min_i \left(\frac{L_0^2}{m_i} \right) \quad (2)$$

式中, L_0 为中心子窗 T 中所有像素灰度值中的最大值.使用滑动窗口模板遍历图像所有的像素点后得到整幅图像的 LCM 计算结果,之后进行阈值分割即可获取待检测目标.

从传统 LCM 算法的计算过程可以看出,其存在以下三个主要问题^[25]:

- 1) 由于其使用 T 子窗中的最大值灰度值来提升目标区的对比度,因此一旦中心块中存在较大的脉冲噪声时,平方运算会将噪声放大,从而造成强干扰.
- 2) 未能充分利用小目标对比度高斯分布的先验信息,在高亮度边缘情况下极易被干扰.
- 3) 为了对不同大小的目标进行检测,LCM 算法需要分别使用子窗口大小为 $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9$ 的滑动窗口对图像进行多尺度遍历,并将多尺度下求得的响应最大值作为最后输出,算法效率有提升空间.

2 基于双层局部对比度的小目标检测

2.1 双层对角灰度差对比度的计算

针对传统 LCM 算法存在的问题,本文引入基于双层滑动窗结构的对角灰度差对比度量来计算目标和背景的对比度特征.首先,采用双层滑动窗逐像素遍历图像,同时计算每个像素对应滑动窗的 DLCM 值.滑动窗经过图像四周边界时通过复制外边界的像素值来扩展图像,其具体结构如图 2.

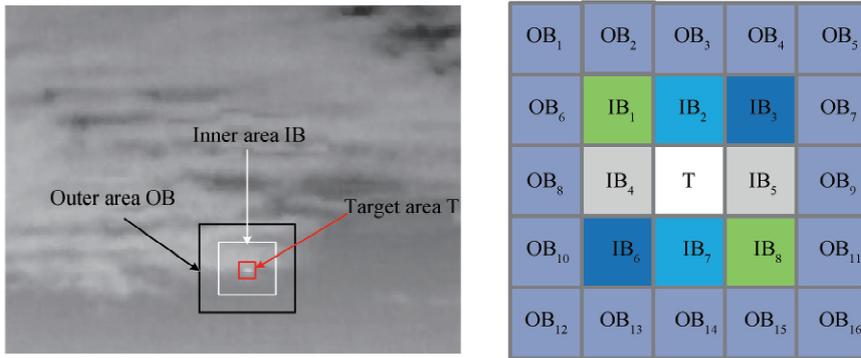


图 2 双层滑动窗结构

Fig.2 Nested structure of double layer

从图 2 双层滑动窗共包含 5×5 个子窗,每个子窗大小为 $n \times n$ 个像素,双层滑动窗的总大小为 $5n \times 5n$ 个像素.其中,位于中心的子窗 T 代表目标区域,位于 T 子窗四周的 $IB_1 \sim IB_8$ 8 个子窗为内层区域,内层区域外侧为 16 个外层区域子窗 $OB_1 \sim OB_{16}$.考虑到一般小目标的尺寸范围为 2×2 到 9×9 个像素,本文采用子窗大小为 3×3 的双层滑动窗结构.其中,内层子窗用于小尺寸目标的检测,双层子窗结构实现较大尺寸目标的检测.

之后,引入内层灰度差对比度 $d(T, IB_i)$ 和外层灰度差对比度 $d(T, OB_j)$.其中, $d(T, IB_i)$ 的表达式为

$$d(T, IB_i) = \begin{cases} m_0 - m_{IB_i} & \text{if } m_0 - m_{IB_i} > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式中, m_0 代表为 T 子窗的灰度均值, m_{IB_i} 代表内层区域子窗口 IB_i 的灰度均值.采用中心子窗与周围子窗口

的灰度均值差来计算对比度能够有效地减少高亮度背景的影响.

$d(T, OB_j)$ 的定义与内层灰度差对比度 $d(T, IB_i)$ 类似, 其表达式为

$$d(T, OB_j) = \begin{cases} m_0 - m_{OB_j} & \text{if } m_0 - m_{OB_j} > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

在红外图像中, 弱小目标形状一般为中心对称、向四周辐射的形状, 与二维高斯函数非常相似. 因此, 当双层滑动窗逐像素遍历图像时会表现出以下 2 个特征:

1) 经过目标像素时, 对应各方向的 $d(T, IB_i)$ 和 $d(T, OB_j)$ 通常都较大; 而经过背景区域的像素时, 存在一部分值较小的 $d(T, IB_i)$ 和 $d(T, OB_j)$; 即, 目标像素的 $d(T, IB_i)$ 和 $d(T, OB_j)$ 中的最小值会大于背景区域的最小值.

2) 经过高亮度边缘时, 由于边缘一般具备单边对称性, 因此位于对角的两个 $d(T, IB_i)$ 和 $d(T, IB_{9-i})$ 中通常存在一个等于 0, 如 $d(T, IB_1)$ 和 $d(T, IB_8)$ 中存在一个等于 0.

因此根据以上两个特征, 本文最终采用的 DLCM 的计算表达式为

$$DLCM = D_1 \times D_0 = \min_i [d(T, IB_i) \times d(T, IB_{9-i})] \times \min_j d(T, OB_j) \quad (5)$$

式中, D_1 为内层的灰度差对比度量, 其值等于位于对角位子窗的灰度差对比度 $d(T, IB_i)$ 和 $d(T, IB_{9-i})$ 乘积的最小值. D_0 为外层的灰度差对比度量, 等于 $d(T, OB_j)$ 中的最小值, 用于进一步抑制噪声和背景干扰并完成尺度操作.

根据式(5)的定义可知, 图像中小目标区域的 DLCM 值将大于非目标区域的值, 且部分非目标区域的 DLCM 值等于 0. 图 3(b) 和 3(c) 分别为图 3(a) 使用本文算法处理后得到的 DLCM 显著度图以及对应的归一化三维显示图.

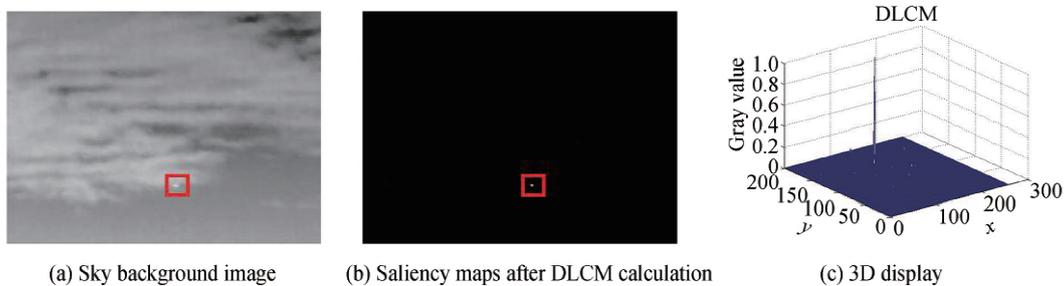


图 3 DLCM 的处理效果
Fig.3 The effect of DLCM

此外, 不同于传统 LCM 算法, 双层滑动窗在单尺度内通过双层子窗结构覆盖了一般小目标的尺度范围 (从 2×2 至 9×9 个像素). 因此, 只需要计算单尺度的双层对比度即可实现不同大小的小目标的检测, 算法效率得到了一定提高. 图 4 展示了目标大小分别为 9×9 、 7×7 、 5×5 、 3×3 像素, 且亮度服从二维高斯分布时, 目标图像经过 DLCM 处理后的结果. 从图 4 可知, 本文算法能够实现不同尺寸目标的有效检测.

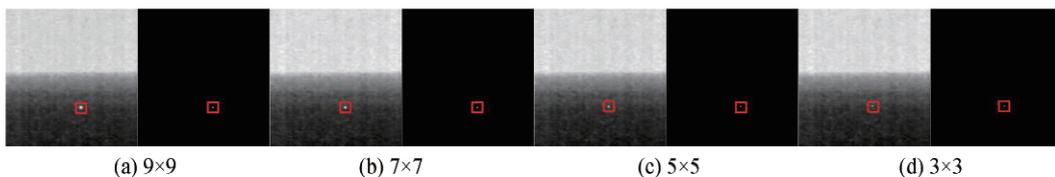


图 4 本文算法处理不同大小目标的效果
Fig.4 IR small target detection results of different size targets using DLCM method

2.2 红外小目标的自适应提取

在经过 DLCM 计算得到的显著度图中, 目标区域的亮度得到了增强, 包括背景、噪声等非目标区域都得到了充分抑制, 信杂比得到了明显提升. 因此, 在经过 DLCM 处理后的图像中, DLCM 值越高说明此处为小目标的概率越大. 为了便于后续处理, 还需对显著度图的值进行归一化, 使其分布于 $0 \sim 1$ 之间. 之后, 对归一

化的结果进行自适应阈值分割后即可提取待检测目标.本文中阈值分割所使用的阈值 τ 的表达式为^[26]

$$\tau = \mu + K\sigma \quad (6)$$

式中, μ 为 DLCM 显著度图的均值, σ 为 DLCM 显著度图的标准差. K 为分割系数, 一般取 20~50. 经过阈值 τ 分割后即可得到最终的检测结果. 图 5 为本文算法的总体流程.

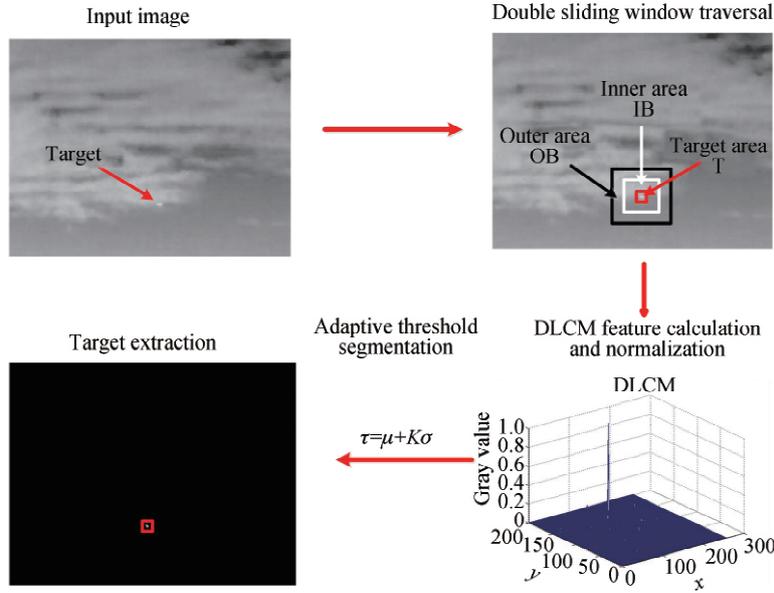


图 5 所提算法流程

Fig.5 Detection flow of the proposed method

3 实验测试及结果分析

3.1 实验设计

为了对所提算法进行全面的评估, 本文选用了 5 个较常见的弱小目标检测算法和本文算法进行比较, 具体包括: 经典算法 Top-Hat 以及 LCM、ILCM、MPCM、RLCM 等四个基于 HVS 的算法. 其中 Top-Hat 是传统非线性滤波方法的代表; LCM 和 ILCM 是早期 HVS 系算法的典型代表; MPCM 和 RLCM 为近期性能最为优秀的 HVS 系算法的代表.

在算法评价指标方面, 本文采用信杂比率增益 (Signal to Clutter Ratio Gain, SCRG)、背景抑制因子 (Background Suppression Factor, BSF)、接收者操作特征曲线 (Receiver Operating Characteristic Curve, ROC) 以及算法实时性四个指标对所有算法进行评估.

其中, SCRG 用于评估算法的目标增强性能, 其表达式为

$$SCRG = SCR_{out} / SCR_{in} \quad (7)$$

式中, SCR 用于衡量目标检测难度以及目标显著性, 下标 in 和 out 分别代表原图像以及分离的目标图像. 一般来说, 目标的 SCR 越高, 就越容易被检测到.

$$SCR = |\mu_t - \mu_b| / \sigma_b \quad (8)$$

式中, μ_t 为目标的平均像素值, μ_b 和 σ_b 分别是目标周围相邻区域的平均像素值和像素值的标准偏差值.

BSF 用于评估算法背景抑制的性能, 其表达式为

$$BSF = \sigma_{in} / \sigma_{out} \quad (9)$$

式中, σ_{in} 、 σ_{out} 分别为输入以及输出图像中背景杂波的灰度标准差. SCRG 和 BSF 的值越高, 说明一个算法对背景、杂波以及噪声的抑制性能越好.

3.2 目标检测效果

为了验证所提出的算法的检测效果, 本文采用 5 组不同的红外图像序列进行测试实验, 如图 6(a). 测试所用图像的特征如表 1. 为了能够正常展示, 所有图像均已缩放至相同大小.

表 1 5 组测试数据集的特征
Table 1 Details of five infrared target dataset for test

	Image resolution	Target size	Scenes description
Group1	133×170	4×4	Complex background interference
Group2	720×480	5×5	Complex background interference
Group3	128×160	4×7	Strong edge interference
Group4	228×280	6×5	Strong noise interference
Group5	200×256	4×5	Strong noise interference

图 6(b)~(g)分别给出了用 Top-Hat、LCM 等 5 种弱小目标检测算法以及本文算法 DLCM 获得的弱小目标图像结果图.从图 6 可知,若原始序列图像中存在高亮干扰和噪声,Top-Hat 以及四个基于 HVS 的算法处理后的图像仍然存在部分背景杂波与噪声,影响最终检测目标时的有效性.

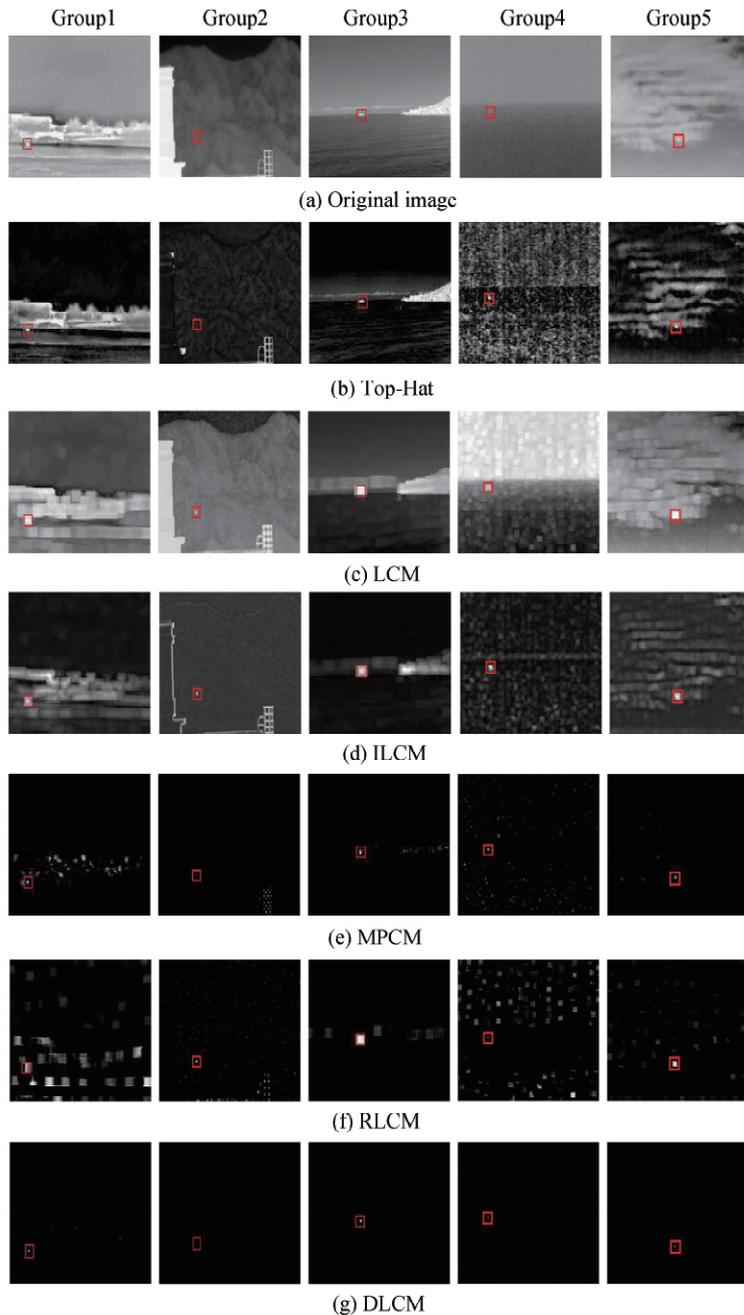


图 6 6 种算法的检测效果
Fig.6 Detection effect of six algorithms

3.3 算法评价指标性能分析

为了进一步验证本文算法的性能并量化比较不同算法的检测性能,表2分别给出了红外图像序列1至图像序列5经过6种不同弱小目标检测算法处理后的BSF以及SCRG值.由于当场景中存在高亮边缘以及复杂背景时,传统Top-Hat、LCM、MPCM等5种算法无法对其进行有效抑制.而本文算法对传统LCM算法进行了改进,使得目标更容易被检测到.因此从表2中的BSF值以及SCRG值可以明显看出,在不同场景下DLCM算法与其他5种弱小目标检测算法相比BSF平均提高9.3倍以上,SCRG平均提高7.8倍以上.

表2 5个不同场景下的SCRG与BSF
Table 2 SCRG and BSF of four different scenes

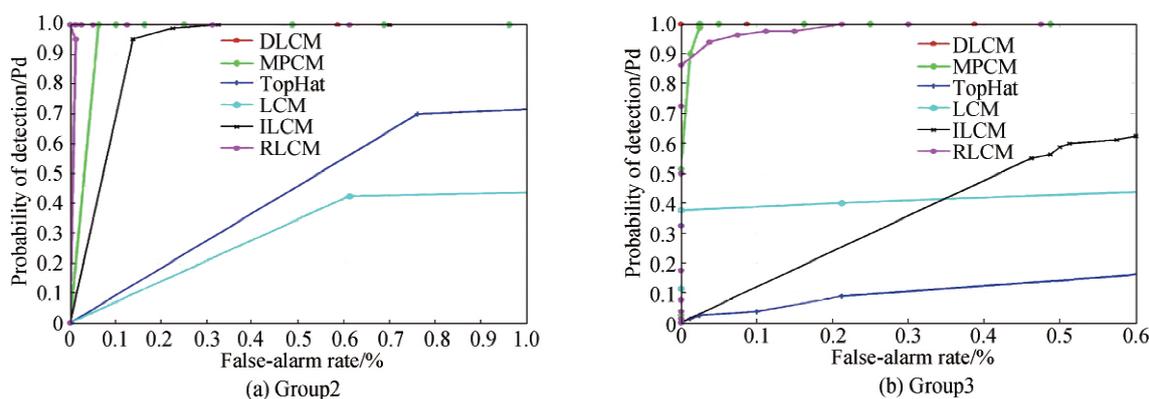
Method	BSF					SCRG				
	Group1	Group2	Group3	Group4	Group5	Group1	Group2	Group3	Group4	Group5
Top-Hat	0.762	3.330	1.190	2.280	0.821	2.227	26.114	8.016	10.644	9.134
LCM	0.759	1.244	1.153	1.003	1.024	3.226	13.335	11.701	1.199	3.735
ILCM	1.271	3.537	2.004	5.129	2.130	5.445	29.324	17.958	12.452	15.018
MPCM	4.855	13.216	18.797	13.410	17.634	24.906	2 087.9	198.859	51.753	174.23
RLCM	1.662	12.614	12.626	4.826	5.366	6.317	1 621.8	131.876	NAN	348.576
DLCM	35.583	193.908	162.590	82.957	182.69	90.387	4 559.4	640.287	142.976	1270.86

为了验证本文算法的实时性,采用基于3.40 GHz英特尔酷睿i7-4770处理器桌面电脑作为测试平台,其内存为8 GB,测试软件为MATLAB R2016a.测试首先从图像序列1~4中各自抽取10张图片,然后运行算法统计每个算法处理10张图片所用时间的平均值作为运行时间结果.从表3测试结果可知,Top-Hat算法虽然检测性能不佳,但是其具有最佳的实时性;RLCM由于需要进行较多排序操作,因此算法实时性最差.除Top-Hat之外,本文DLCM算法的实时性优于其他基于HVS的算法,说明DLCM算法的运行速度快、实时性高.

表3 6种算法的算法实时性比较(单位:s)
Table 3 Computation cost comparison of six methods (unit: s)

Group	Resolution	Top-Hat	LCM	ILCM	MPCM	RLCM	DLCM
Group1	133×170	0.018 4	0.070 8	0.078 3	0.078 9	2.925 4	0.064 5
Group2	720×480	0.082 6	0.390 1	0.383 1	0.401 5	56.828 2	0.364 9
Group3	128×160	0.020 2	0.078 2	0.085 5	0.084 2	2.730 9	0.059 8
Group4	228×280	0.023 3	0.096 6	0.116 3	0.103 5	9.909 9	0.089 9
Group5	200×256	0.020	0.091	0.096	0.107	7.280	0.081

此外,为了能够客观评估所提算法的小目标检测性能,本文采用ROC曲线作为最后一个评价指标.ROC曲线是关于检测概率和虚警概率的函数曲线,它以目标检测率为纵坐标、虚警率为横坐标绘制曲线,曲线以下包含的面积越大,则表示算法检测性能越好.图7为对红外图像序列2、3、4和5使用6种算法检测得到的ROC曲线.由图7可知,在4个不同场景下Top-Hat算法的检测性能最差;在序列2、序列3的强背景和边缘干扰场景下,LCM、ILCM、RLCM的ROC曲线均表现不佳;而MPCM算法虽在序列2、3、4和5的场景下表现良好,但对比本文DLCM算法,其ROC曲线仍表现欠佳.因此由图7可知,在四个不同场景序列下,当选



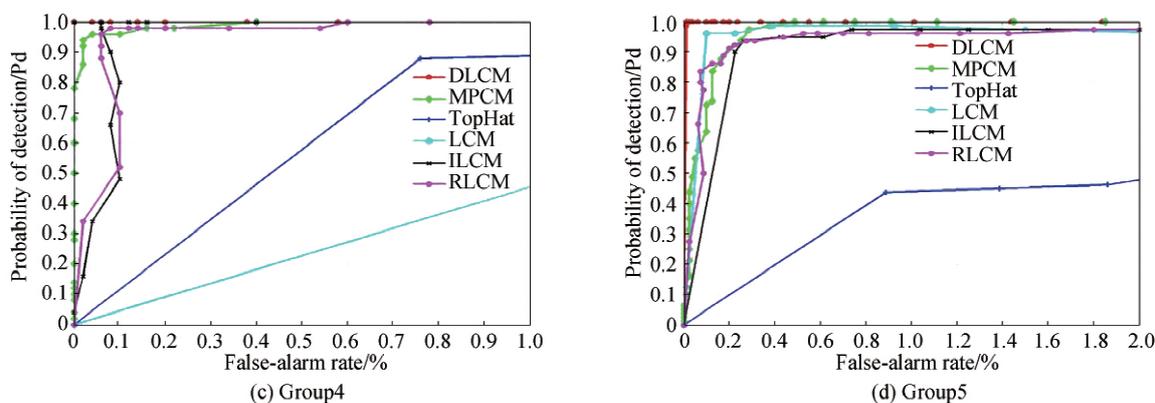


图7 不同场景下6种算法的ROC曲线

Fig.7 The ROC curves of six algorithms under different scenes

择相同的虚警率时,DLCM 算法的检测率基本都是最高的,这意味着本文算法优于其他 5 种弱小目标检测方法,具有更好的检测性能。

4 结论

本文算法在传统 LCM 基础上引入了基于双层滑动窗结构的对角灰度差对比度度量概念.其中,双层滑动窗结构在单尺度内通过双层结构覆盖了标准小目标的尺度范围.内层子窗便于小尺寸目标的检测,双层结构实现大尺寸目标的检测.只需计算单尺度的 DLCM 即可实现对于不同大小的小目标的检测.对角灰度差对比度度量充分利用目标局部对比度分布的先验信息,有效抑制边缘和背景的干扰.实验测试效果及数据结果均验证了本文算法在检测性能及实时性上的优势.可见,本文所提算法是一种可以应用于实际检测系统中的弱小目标检测算法,而开展进一步的工程应用优化是未来研究工作的重点。

参考文献

- [1] HOU Wang, SUN Xiao-liang, SHANG Yang, *et al.* Present state and perspectives of small infrared targets detection technology[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(1): 1-10.
侯旺,孙晓亮,尚洋. 红外弱小目标检测技术研究现状与发展趋势[J]. *红外技术*, 2015, **37**(1): 1-10.
- [2] YI Xiang, WANG Bing-jian, ZHOU Hui-xin, *et al.* Dim and small infrared target fast detection guided by visual saliency [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, **97**(2): 6-14.
- [3] ZHANG Bi-yin. Fast new small-target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(10): 106401.
- [4] HADHOUD M M, THOMAS D W. The two-dimensional adaptive LMS(TDLMS) algorithm[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1988, **35**(5): 485-494.
- [5] DESHPANDE S, MENG H Er, *et al.* Max-mean and max-median filters for detection of small targets[C]. SPIE, 1999, **3809**: 74-83.
- [6] WANG Wen-long, HAN Bao-jun, ZHANG Hong-ping, *et al.* A new algorithm of small target detection for infrared image in background of sea and sky[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 725-728.
王文龙,韩保君,张红萍. 一种海空背景下红外小目标检测新算法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 725-728.
- [7] XUE Yong-hong, RAO Peng, FAN Shi-wei, *et al.* Infrared dim small target detection algorithm based on generative Markov random field and local statistic characteristic[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, **32**(5): 431-436.
薛永宏,饶鹏,樊士伟,等. 基于生成 MRF 和局部统计特性的红外弱小目标检测算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2013, **32**(5): 431-436.
- [8] GAO Chen-qiang, MENG De-yu, YANG Yi, *et al.* Infrared patch-image model for small target detection in a single image[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(12): 4996-5009.
- [9] ZHANG Tian-fang, WU Hao, LIU Yu-han, *et al.* Infrared small target detection based on non-convex optimization with lp-norm constraint[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(5): 559.
- [10] ZHANG Xiang-yue, DING Qing-hai, LUO Hai-bo, *et al.* Infrared small target detection based on an image-patch tensor model[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, **99**: 55-63.
- [11] FAN Zun-lin, BI Du-yan, XIONG Lei, *et al.* Dim infrared image enhancement based on convolutional neural network [J]. *Neurocomputing*, 2018, **272**: 396-404.

- [12] WANG Xin, LV Guo-fang, XU Li-zhong. Infrared dim target detection based on visual attention[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, **55**(6): 513-521.
- [13] LV Ping-yue, SUN Sheng-li, LIN Chang-qing, *et al.* A method for weak target detection based on human visual contrast mechanism[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, **16**(2): 261-265.
- [14] CHENCP, HONG Li, WEI Yan-tao, *et al.* A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(1): 574-581.
- [15] HAN Jin-hui, MA Yong, ZHOU Bo, *et al.* A robust infrared small target detection algorithm based on human visual system[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, **11**(12): 2168-2172.
- [16] WEI Yan-tao, YOU Xin-ge, HONG Li. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target detection[J]. *Pattern Recognition*, 2016, **58**: 216-226.
- [17] LIU Jie, HE Zi-qing, CHEN Zuo-long, *et al.* Tiny and dim infrared target detection based on weighted local contrast [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, **15**(11): 1780-1784.
- [18] DENG He, SUN Xian-ping, LIU Mai-li, *et al.* Entropy-based window selection for detecting dim and small infrared targets[J]. *Pattern Recognition*, 2017, **61**: 66-77.
- [19] BAI Xiang-zhi, BI Yan-guang. Derivative entropy-based contrast measure for infrared small-target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, **56**(4): 2452-2466.
- [20] QIN Yao, Li Biao. Effective infrared small target detection utilizing a novel local contrast method[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016; 1-5.
- [21] HAN Jin-hui, LIANG Kun, ZHOU Bo, *et al.* Infrared small target detection utilizing the multiscale relative local contrast measure[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018; 1-5.
- [22] GAO Jin-yan, GUO Yu-lan, LIN Zai-ping, *et al.* Robust infrared small target detection using multiscale gray and variance difference measures [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, **11**(12): 5039-5052.
- [23] ZHANG Xiang-yue, DING Ding-hai, LUO Hai-bo, *et al.* Infrared dim target detection algorithm based on improved LCM[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(7): 1-7.
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): 1-7.
- [24] SHI Ya-fei, WEI Yan-tao, YAO Huang, *et al.* High-boost-based multi-scale local contrast measure for infrared small target detection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, **15**(1): 33-37.
- [25] WANG Gang, CHEN Yong-guang, YANG Suo-chang, *et al.* Detection of infrared dim small target based on image patch contrast[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(5): 1424-1433.
王刚,陈永光,杨锁昌,等. 采用图像块对比特性的红外弱小目标检测[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(5): 1424-1433.
- [26] WANG Chuan-yun, QIN Shi-yin. Adaptive detection method of infrared small target based on target-background separation via robust principal component analysis[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **69**: 123-135.