

文章编号:1001-5078(2024)10-1633-09

· 图像与信号处理 ·

# 基于双重增强局部对比度的红外小目标检测

孙心如, 耿蕊

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

**摘要:** 红外探测具有穿透力强、探测距离远和隐蔽性好等特点, 在红外小目标检测领域应用广泛。本文基于人类视觉机制的局部对比度方法, 提出一种基于双重增强局部对比度的红外小目标检测方法, 先以局部灰度均值对比度对噪声和背景进行抑制, 再由相对灰度梯度和局部方差对比结合对目标进行增强, 最终采用阈值分割的方式实现红外小目标的检测。算法对不同天空场景序列目标均有较高的检测率和较低的虚警率, 前者最高可达 100%, 后者为 0; 且相同复杂场景的目标检测性能相比其他同类方法明显提高, 信杂比增益与背景抑制因子也显著提升, 目标检测性能优异。

**关键词:** 红外小目标; 局部对比度; 多场景; 目标增强; 背景抑制

**中图分类号:** TP391; TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.019

## Detection of infrared small targets based on dual-enhanced local contrast measure

SUN Xin-ru, GENG Rui

(Beijing Information Science and Technology University, School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Infrared detection is widely used in the field of infrared small target detection due to its strong penetration, long detection distance and good concealment. In this paper, an infrared small target detection method based on dual-enhanced local contrast measurement is proposed on the basis of the local contrast method of human visual mechanism. Firstly, the noise and background are suppressed by local gray mean contrast, followed by target enhancement by a combination of relative grey scale gradient and local variance contrast, and the infrared small target is detected by threshold segmentation finally. The algorithm has higher detection rate and lower false alarm rate for different sky scene sequences, the former is up to 100%, and the latter is 0. The target detection performance of the same complex scene is significantly improved compared with other similar methods, signal-to-clutter ratio gain and background suppression factor are also significantly improved, resulting in excellent target detection performance.

**Keywords:** infrared small target; local contrast; multi-scenario; target enhancement; background suppression

### 1 引言

红外小目标检测技术在预警系统、制导武器、星

载监控/监视和反无人机等多个领域有着不可忽视的作用<sup>[1]</sup>。在红外图像中, 当待检测目标自身的尺

基金项目: 企业横向项目 (No. GXTC19630439) 资助。

作者简介: 孙心如 (1998 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为图像处理。E-mail: 15600986780@163.com

收稿日期: 2023-12-05; 修订日期: 2024-01-18

寸较小或在远距离下成像时,目标通常只呈现几个像素点,缺少明显的特征和纹理<sup>[2]</sup>。且在实际应用中,随着环境复杂度的升高,待检小目标会被背景杂波包围,如云层、建筑物和树木等,导致红外小目标检测出现漏检和误检的问题,限制了小目标的检测性能<sup>[3]</sup>。因此,精确检测复杂场景下的红外小目标仍然是当前具有挑战性的研究课题。

红外小目标成像通常满足高斯分布状态,有着中心区域最亮四周像素值逐渐降低的特点,受人眼机制的启发,Chen 等人<sup>[4]</sup>首先提出局部对比度测量(Local Contrast Method, LCM),利用目标子块最大像素值与周围 8 个背景子块平均值的比值,计算出目标增强因子,得到一种有效的红外小目标检测方法,但该算法容易受高噪声冲击的影响,且多尺寸的窗口检测耗时较长。因此,研究者们对 LCM 算法进行了一系列的改进,例如,Zhang 等人<sup>[5]</sup>提出了改进的 LCM 算法,将增强因子中的目标区域最大像素值替换为均值,减弱高噪声对检测结果的影响,但该算法容易平滑点像素目标。针对以上问题,文献<sup>[6]</sup>提出相对局部对比度测量(Relative LCM, RLCM),其利用目标子块与周边邻域的最大几个像素值比值作为目标的增强因子,能够有效增强亮目标区域。Shi 等人<sup>[7]</sup>通过滤波与局部对比度测量融合的方式,提出了一种高提升多尺度局部对比度测量(High Boost Based Multiscale LCM, HBMLCM),可以在增强高亮目标的同时抑制背景,RLCM 和 HBMLCM 算法都能增强高亮度目标,但容易受独立噪声的干扰。Han 等人<sup>[8]</sup>提出加权强化局部对比度测量(Weighted Strengthened LCM, WSLCM),通过加权的方法进一步提升算法的背景抑制能力,该算法适于短距离的高亮度小目标。此外,为弥补 LCM 算法在检测灰暗目标时的不足,Wei 等人<sup>[9]</sup>提出基于块的多尺度对比度测量(Multiscale Patch Based Contrast Measure, MPCM),通过合并对角方向的灰度差,实现暗目标的检测;Xu 等人<sup>[10]</sup>通过中值滤波和双层滑动窗口提出了一种双层滑动窗口结构的检测算法(OLCM),可以有效对图像中的灰暗目标区域进行增强,两种算法均能同时检测红外图像中的“亮”“暗”两种目标,但算法对明暗对比明显的区域较为敏感,在复杂场景中算法虚警率容易上升。Pan 等人<sup>[11]</sup>对双层滑动窗口结构进行改善,提出了三层局

部对比度测量(Double-layer LCM, DLCLM)算法,通过目标子块与双层邻域对角的灰度差值,完成红外小目标检测。之后,Ren<sup>[12]</sup>和 Chen<sup>[13]</sup>等人分别提出(Multi-directional Gradient IDLCM)MGIDLCM 算法和(Simplified Dual-weighted Three-layer Window LCM)SDWTLLCM 算法,增加了背景与目标之间的对比度,易于分割出小目标。该类算法可以有效实现多尺度小目标的检测,大大减少了算法的运算量,但对于环境复杂的远距离点像素目标,背景抑制效果不够,难以将小目标从背景中分离出来。

针对上述问题,本文提出了一种基于双重增强局部对比度测量(Double Enhanced Local Contrast Measure, DELCM)的红外小目标检测方法,采用不同局部灰度均值之间的差异抑制红外图像中的孤立噪声和方向性杂波,降低虚警;利用相对灰度梯度和局部方差对比增强目标;引入增强函数对目标区域做进一步显著性增强,以解决部分红外图像中目标与其邻域灰度差异较小的问题,进而提升不同复杂场景下的红外小目标检测效果。方法应用过程中不需要进行预处理消除高亮度背景,具有一定的鲁棒性。

## 2 局部对比度测量计算

局部对比度方法的小目标检测首先要通过滑动窗口扫描图像进行局部对比度的测量计算。本文采用的滑动窗口如图 1 所示,包括 9 个大小为  $L \times L$  像素的子块,分别是位于中心的“目标”子块 T 和其周围邻域的背景子块  $B_1 \sim B_8$ 。当窗口逐像素从左至右、从上到下遍历图像时,目标子块 T 可能会与真实目标、连续背景和孤立噪声等区域重合,因此,对 T、B 以及 T 与其周围 B 子块邻近的 n 层像素组成的 G 区进行特定的局部对比度计算,即可根据不同区域的灰度及分布特点,对连续背景与噪声进行充分抑制,得到真实目标的显著图像。

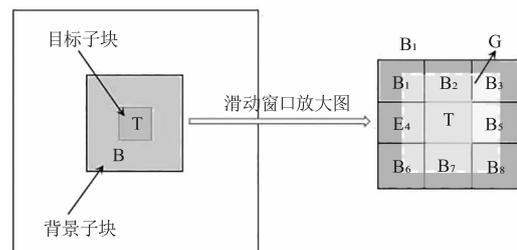


图 1 滑动窗口结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sliding window structure

利用滑动窗口  $T$  区与  $B$  区之间的灰度均值差异可以计算出对比度  $S$ :

$$S = \min\left(\frac{m_T - m_i}{m_i}\right), i = 1, \dots, 8 \quad (1)$$

式中,  $m_T$  和  $m_i$  分别是  $T$  与  $B_i$  子块前  $Z_1$  个最大灰度的均值, 公式如下:

$$m_i = \frac{1}{Z_1} \sum_{j=1}^{Z_1} H_i^j, i = T, 1, \dots, 8 \quad (2)$$

其中,  $H_i^j$  表示  $T$  或  $B_i$  子块的第  $j$  个最大灰度值。

在实际应用中, 考虑到点目标的像素个数较少且亮度较为集中, 因此公式(2)中的  $Z_1$  取值常小于9。当滑动窗口的  $T$  区经过真实小目标时, 中心亮度较高, 因此,  $m_T \gg m_i$ ,  $S$  值较大; 而当  $T$  区包含独立噪声点时, 均值  $m_T$  会使其集中在1~2个像素点上的高灰度值明显降低, 进而得到较小的  $S$  值; 当  $T$  区滑过方向性背景杂波时, 其与周围  $B$  子块的像素灰度分布基本一致,  $m_T \approx m_i$  或  $m_T < m_i$ ,  $S$  值较小。 $S$  的值越小, 说明目标子块与最大邻域子块的前  $Z_1$  个像素灰度均值越接近,  $T$  区域覆盖的噪声被抑制的效果越好。

目标与背景区灰度均值对比度  $S$  能够抑制红外图像中的孤立噪声和方向性背景杂波, 而依据红外小目标能量高斯分布的特点, 可以进一步引入相对灰度梯度对比度  $K$  与局部方差对比度  $V$  对目标进行显著性增强, 公式如(3)~(6)所示:

$$K = \max\left(\frac{T_0 - T_m}{T_m}, 0\right) \quad (3)$$

$$V = \frac{Var_T}{Var_C} \quad (4)$$

$$Var_T = \frac{1}{L^2} \sum_{j=1}^{L^2} (H_T^j - M_T)^2 \quad (5)$$

$$Var_C = \frac{1}{(L+n)^2} \sum_{j=1}^{(L+n)^2} (H_C^j - M_C)^2 \quad (6)$$

公式(3)式中,  $T_0$ 、 $T_m$  分别表示  $T$  子块的中心像素灰度值与其他像素点的灰度均值。公式(4)~(6)中,  $Var_T$  和  $Var_C$  分别是  $T$  区与  $G$  区覆盖像素的灰度方差值,  $M_T$  和  $M_C$  是其灰度均值;  $H_C^j$  与  $H_T^j$  相似, 表示  $G$  区域的第  $j$  个最大灰度值。

如图2(a)所示, 当  $T$  子块包含真实小目标时, 内部的像素灰度变化剧烈, 相对灰度梯度与局部方差对比都较为明显,  $K$ 、 $V$  值较大, 对目标区域起到增强作用; 当窗口经过连续背景时, 图2(b), 方向性噪声使得  $T$  子块内的像素灰度变化比较平缓, 此

时,  $K$  和  $V$  值均较小。因此通过灰度梯度对比度  $K$  与局部方差对比度  $V$  能够对目标区域进行增强。

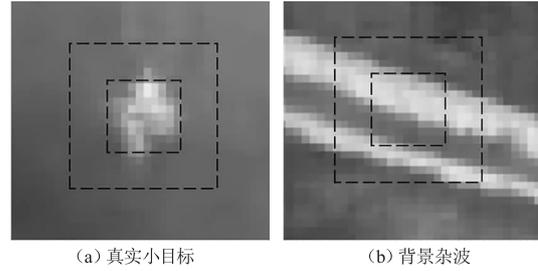


图2 红外小目标强度分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of intensity distribution of infrared small targets

灰度梯度对比度  $K$  与局部方差对比度  $V$  可以有效增强真实目标和周围邻域的对对比度, 提升其在图像中的显著性。但对于与周围邻域灰度差异较小的真实目标, 其增强效果不足, 因此, 可以使用下式所示的增强函数  $W$  对目标的显著性进一步加强:

$$W = \begin{cases} \frac{T_0}{B_0}, & \min(m_T - m_i) > 0, i = 1, \dots, 8 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$B_0 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 m_i, i = 1, \dots, 8 \quad (8)$$

式中,  $T_0$  与 8 邻域  $m_i$  平均  $B_0$  的使用可以进一步增大目标与背景区域的差异, 强化目标。最终, 在  $W$  函数的强化下, 将灰度均值对比度  $S$  与相对灰度均值对比度  $K$  和局部方差对比度  $V$  结合, 得到双重增强效果的局部对比度测量  $DELCM$ :

$$DELCM = S \cdot V \cdot K \cdot W \quad (9)$$

$DELCM$  的对比度计算流程与图像显著图的三维结果示意图如图3所示。显然, 经过  $DELCM$  算法的处理后, 红外图像中的目标区域得到明显增强, 背景杂波得到有效抑制。

### 3 基于 $DELCM$ 的红外小目标检测

上一节中提出的双重增强局部对比度测量方法能够有效实现红外图像中的背景抑制与目标增强,  $DELCM$  计算后图像中真实目标得以显著化, 这将非常有利于红外小目标的进一步检测。本节将在此基础上引入式(9)的阈值分割方法, 建立一个天空背景的红外弱小目标检测系统。系统采用 Matlab 软件编译, 在 Intel i5 2.9 GHz 处理器、16 GB 内存的计算机环境中运行, 且依据实际应用, 将  $DELCM$  中的  $L$  取值为3,  $n$  为2,  $Z_1$  为4。

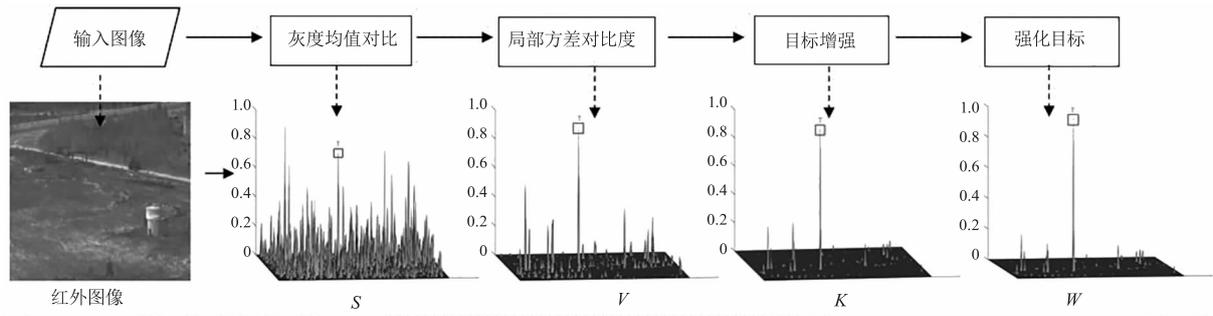


图3 DELCM 流程与局部对比度显著图(归一化)

Fig. 3 DELCM process and local contrast significance(normalized)

$$Th = \mu + k \cdot \sigma \quad (10)$$

式中,  $\mu$  和  $\sigma$  分别代表分割前显著性图 DELCM 的均值和标准差;  $k$  为可调节常数。

利用系统对公开数据集中的多种场景小目标进行检测, 并将结果与 RLCM<sup>[6]</sup>、BHMLCM<sup>[7]</sup>、WSL-

CM<sup>[8]</sup>、MPCM<sup>[9]</sup> 和 DLCM<sup>[11]</sup> 等算法的检测结果进行对比。首先选用南航 Dai<sup>[14]</sup> 发布的含有云层、建筑物和树木等单帧图像进行检测, 原图像及检测结果的归一化三维图如表 1 所示, 图中虚心方框表示真实目标, 实线方框为误检目标。

表 1 不同天空背景单帧图像检测结果示意图

Tab. 1 Schematic of the detection results of single-frame images with different sky backgrounds

组别	红外图像	MPCM 算法	RLCM 算法	BHMLCM 算法	WSLCM 算法	DLCM 算法	DELCM 算法
云层 1							
云层 2							
云层 3							
建筑物 1							
建筑物 2							
树木							

从结果图中可以明显看出, 对云层背景、建筑物背景和树木背景图像等, DELCM 算法均能有效检测出真实目标, 且几乎没有背景杂波的存在, 具有较好的检测效果和鲁棒性。各对比算法在不同场景中, 则展现出不同的检测特性。对天空背景而言, 由于背景较为连续平缓, 各算法均表现出良

好的检测效果, 然而, MPCM 算法和 RLCM 算法受厚云层的影响, 出现部分虚警问题。在建筑物图像中, 由于拐角区域容易被误检为目标, MPCM 算法、RLCM 算法、BHMLCM 算法和 DLCM 算法均出现了不同程度的虚警或漏警问题, 使检测效果下降。

考虑到检测方法在真实场景下的实用性,进一步选用包括地面背景、地空背景和天空背景在内的三种红外小目标序列验证算法的检测效果,并对单目标的序列检测结果进行定量统计与分析。图像序列的分类信息<sup>[15]</sup>如表2所示。

表2 序列图像数据集详细说明

Tab.2 Detailed description of the sequence image dataset

图像组别	帧数	分辨率/像素	背景描述	目标像素
天空背景	200	640 × 512	远距离	3 × 3
地面背景 1	228	256 × 256	由近及远	3 × 3
地面背景 2	300	256 × 256	由远及近	3 × 3
地面背景 3	100	256 × 256	目标由近及远	3 × 3
地空背景 1	200	256 × 256	目标机动、地空背景	3 × 3
地空背景 2	200	256 × 256	远距离、地空交界背景	3 × 3

序列目标检测完成后,采用检测率<sup>[16]</sup> ( $P_d$ ) 和虚警率<sup>[17]</sup> ( $P_f$ ) 等指标对各组图像的检测结果进行统计与定量分子,具体如公式(10)、(11)所示:

$$P_d = \frac{N_d}{N_i} \quad (11)$$

$$P_f = \frac{N_f}{M} \quad (12)$$

其中,  $N_d$  是算法在每组序列中正确检测出小目标的个数;  $N_i$  则是序列中真实小目标的数量总和;  $N_f$  是误检的小目标个数;  $M$  是图像序列的总帧数。算法能够在检测率高的同时保持较低的虚警率,则说明算法的检测性优越。

图4绘制了 DELCM 目标检测方法在表2序列图像下检测率和虚警率统计结果的分布情况。图中圆点表示其检测率,正方形表示其虚警率。

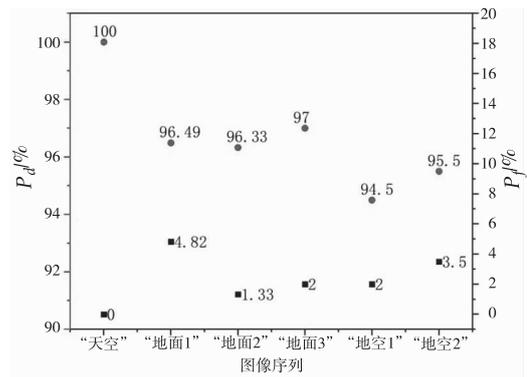


图4 DELCM 算法不同场景下的目标检测率和虚警率  
Fig.4 Target detection rate and false alarm rate of DELCM algorithm in different scenarios

图中数据表明, DELCM 目标检测系统在不同场景的序列图像中均能达到较高的检测率和较低的虚警率,尤其是在天空场景中表现最为卓越,到达了100%的检测率且没有产生虚警。随着简单到复杂场景的转变, DELCM 算法的虚警率虽略有上升,但仍保持下4.82%以下,且大多数的检测率在96%以上,有着较高的检测效果。这表明该方法对各种目标检测场景具有较强的适应性和鲁棒性。

表3是 DELCM 算法与各对比算法在不同场景序列图像下的小目标检测结果示例,虚线方框是真实目标,实线方框是误检目标。从表中最后一列的检测结果可以看出,相比参考算法, DELCM 算法在成功检出与无虚警方面明显表现出更好的检测效果。

表3 复杂场景下各算法的检测结果示意图

Tab.3 Schematic representation of the detection results of each algorithm in complex scenarios

组别	红外图像	MPCM 算法	RLCM 算法	BHMLCM 算法	WSLCM 算法	DLCM 算法	DELCM 算法
天空背景							
地面背景 1							

(续表)

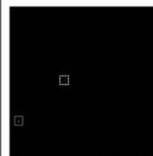
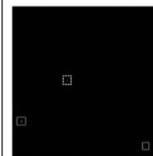
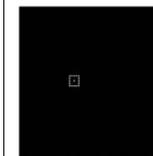
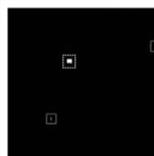
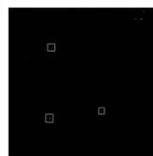
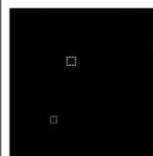
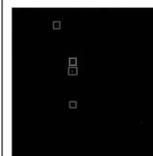
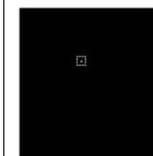
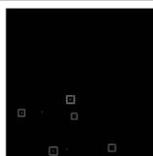
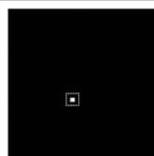
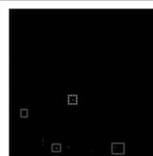
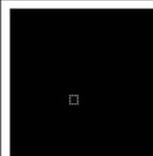
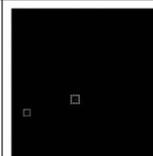
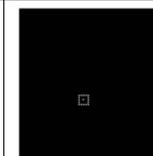
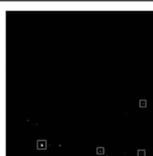
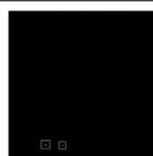
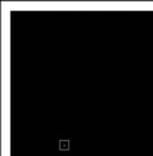
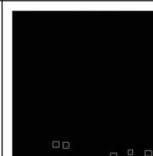
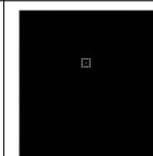
组别	红外图像	MPCM 算法	RLCM 算法	BHMLCM 算法	WSLCM 算法	DLCM 算法	DELPCM 算法
地面背景 2							
地面背景 3							
地空背景 1							
地空背景 2							

表 4 多种场景下各算法的检测率 ( $P_d$ )

Tab.4 Detection rate of various algorithms in multiple scenarios

图像组别	MPCM 算法/%	RLCM 算法/%	BHMLCM 算法/%	DLCM 算法/%	WSLCM 算法/%	DELPCM 算法/%
天空背景	95.00	100.00	100.00	98.00	100.00	100.00
地面背景 1	39.04	44.74	33.33	28.07	35.53	96.49
地面背景 2	65.67	28.67	80.33	53.00	14.33	96.33
地面背景 3	38.00	28.00	-	38.00	11.00	97.00
地空背景 1	93.00	92.00	71.00	78.00	83.00	94.50
地空背景 2	/	/	/	/	/	95.50

注：“/”表示检测失败。

表 5 多种场景下各算法的虚警率 ( $P_f$ )

Tab.5 False alarm rate of various algorithms in multiple scenarios

图像组别	MPCM 算法/%	RLCM 算法/%	BHMLCM 算法/%	DLCM 算法/%	WSLCM 算法/%	DELPCM 算法/%
天空背景	/	9.00	30.50	23.00	0	<b>0</b>
地面背景 1	/	62.28	/	90.79	80.70	<b>4.82</b>
地面背景 2	94.33	81.00	85.00	/	96.33	<b>1.33</b>
地面背景 3	/	78.00	/	99.00	99.00	<b>2.00</b>
地空背景 1	61.00	20.00	68.50	59.50	20.00	<b>2.00</b>
地空背景 2	/	/	/	/	/	<b>3.50</b>

注：“/”表示虚警率超过 100%。

表 4、表 5 列出了多种算法在不同场景下的红外目标检测率和虚警率。尽管在背景平缓、目

标显著的天空背景图像中各算法均表现出良好的检测率,但参考算法的虚警率相对较高,容易

造成目标的误检, DELCM 算法在实验中的虚警率统计结果为零。而随着背景环境和成像距离的变化, 小目标通常被淹没在大量的杂波中, 例如地面背景序列图像, 各对比算法在建筑物、树木和道路等干扰物的影响下, 检测率和虚警率都有明显劣化, 而 DELCM 算法的检测率仍高于 96%, 相较于同组其他算法提升 16% 以上, 且虚警率较低。地空背景图像中主要包含高亮山脉和建筑物, 目标检测难度加大, 尤其是在地空 2 图像序列中, 目标与邻域的灰度差异较小, 5 种经典算法均未检测出真实目标, 而 DELCM 算法充分利用红外小目标符合高斯分布的特点, 通过中心像素与周围区域灰度的梯度变化对弱小目标区域进行强化增强, 使检测率达到 95.5%, 展现出显著的目标增强效果。

除检测率和虚警率之外, 背景抑制因子 (BSF)<sup>[19]</sup> 和信杂比增益 (SCRG)<sup>[20]</sup> 也能够对算法的红外目标检测效果进行定量评价, 反映目标的增强效果和背景的抑制能力, 其值越高说明算法的性能越突出。SCRG 和 BSF 的定义式如下:

$$SCRG = \frac{SCR_{out}}{SCR_{in}} \tag{13}$$

$$BSF = \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{out}} \tag{14}$$

式中,  $SCR_{out}$  和  $SCR_{in}$  分别是图像的输出信杂比和输入信杂比;  $\sigma_{out}$  和  $\sigma_{in}$  分别是输出和输入图像的标准差。

本文算法与其他 5 种算法在六组不同场景中的 SCRG 值和 BSF 值如表 6、7 所示, 其中, 黑色粗体表示在本组序列中检测效果的最优值。

表 6 多种场景下各算法的 SCRG 值

Tab. 6 SNRG values of various algorithms in multiple scenarios

图像组别	MPCM 算法	RLCM 算法	BHMLCM 算法	DLCM 算法	WSLCM 算法	DELCM 算法
天空背景	51.88	63.05	137.27	158.81	422.85	<b>422.91</b>
地面背景 1	2.03	3.62	1.71	4.99	8.58	<b>49.99</b>
地面背景 2	6.40	1.80	6.18	5.29	2.56	<b>40.78</b>
地面背景 3	6.27	2.70	/	3.98	2.30	<b>65.45</b>
地空背景 1	22.15	9.55	13.01	28.06	64.18	<b>77.01</b>
地空背景 2	/	/	/	/	/	<b>2129.70</b>

注:“/”表示无。

表 7 多种场景下各算法的 BSF 值

Tab. 7 BSF values of various algorithms in multiple scenarios

图像组别	MPCM 算法	RLCM 算法	BHMLCM 算法	DLCM 算法	WSLCM 算法	DELCM 算法
天空背景	6924.57	2880.16	7896.37	11479.57	23858.81	<b>24215.91</b>
地面背景 1	1292.06	1308.15	1463.15	2831.80	3401.68	<b>4981.70</b>
地面背景 2	1391.08	1027.83	1477.97	2704.11	2839.94	<b>5397.29</b>
地面背景 3	1174.13	1181.56	/	2353.78	3251.88	<b>5347.37</b>
地空背景 1	3353.62	1021.22	2892.90	5665.42	5859.51	<b>8564.95</b>
地空背景 2	/	/	/	/	/	<b>15776.50</b>

注:“/”表示无。

结合两表数据可知, DELCM 算法目标检测的 SCRG 值和 BSF 值均表现为同组最高, 表现出其在红外小目标检测中的优越性。具体而言, DELCM 对 SCRG 的改善在地面背景 1 图像序列中相较于 BHMLCM 算法达到最佳, 增大 29.23 倍; BSF 则在

地空背景图像中相较于 RLCM 算法达到最优, 提高 8.39 倍。这表明 DELCM 算法与其他算法相比, 在目标增强与背景抑制能力方面均有显著提高, 展现了其在不同环境和目标条件下的鲁棒性和性能优越性, 是一种有效的红外小目标检测方法。

#### 4 结 论

针对多种复杂场景下红外小目标检测率低和虚警率高的问题,提出了一种基于双重增强局部对比度测量(DELFCM)的红外小目标检测方法。该方法利用局部灰度均值对比减少孤立噪声和背景杂波的干扰,并采用相对灰度梯度和局部方差对比联合的方式增强目标;同时,为降低不同亮度目标的虚警率,引入目标增强函数对目标做进一步强化,提高目标的显著性,再以阈值分割的方式完成红外小目标检测。对多种复杂天空场景图像的目标检测结果表明,双重局部对比度测量增强的引入能够有效提升红外图像中小目标的检测率、降低虚警率,如在复杂的地空场景下检测率最低达到94.5%,且虚警率仅为2%,对简单的高空背景检测率可达100%,虚警率为0。相比其他5种经典视觉对比度目标检测方法,同组图像检测率提高23.5%以上,虚警率大大降低,性能提升显著。此外,DELFCM方法的信杂比增益与背景抑制因子也明显提高,进一步展现了其在红外小目标检测应用中的优越性。这对复杂场景红外小目标的检测具有重要的现实意义。

#### 参考文献:

- [1] Li Junhong, Zhang Ping, Wang Xiaowei, et al. Overview of infrared dim small target detection algorithms[J]. Chinese Journal of Image and Graphics, 2020, 25(9): 1739 - 1753. (in Chinese)  
李俊宏,张萍,王晓玮,等. 红外弱小目标检测算法综述[J]. 中国图象图形学报, 2020, 25(9): 1739 - 1753.
- [2] Han Jinhan, Wei Yantao, Peng Zhenming, et al. Overview of infrared small and weak target detection methods[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 438 - 461. (in Chinese)  
韩金辉,魏艳涛,彭真明,等. 红外弱小目标检测方法综述[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 438 - 461.
- [3] Liu Xu, Cui Wennan. Infrared dim small target detection using human visual contrast mechanism [J]. Infrared Technology, 2020, 42(6): 559 - 565. (in Chinese)  
刘旭,崔文楠. 采用人类视觉对比机制的红外弱小目标检测[J]. 红外技术, 2020, 42(6): 559 - 565.
- [4] C. L. Philip Chen, Hong Li, Yantao Wei, et al. A local contrast method for small infrared target detection. [J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1).
- [5] 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): 270 - 276. (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): 270 - 276.
- [6] Han Jinhui, Kun Liang, Bo Zhou, et al. Infrared small target detection utilizing the multiscale relative local contrast measure[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(4): 612 - 616.
- [7] Shi Yafei, Wei Yantao, Yao Huang, et al. High-boost-based multiscale local contrast measure for infrared small target detection[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 15(1): 33 - 37.
- [8] Han Jinhui, Saed Moradi, Faramarzi Iman, et al. Infrared small target detection based on the weighted strengthened local contrast measure[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 18(9): 1670 - 1674.
- [9] Wei Yantao, You Xinge, Li Hong. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target detection [J]. Pattern Recognition, 2016, 58: 216 - 226.
- [10] Xū Xiaodong, Zhu Hui, Hao Xin, et al. Infrared bipolar small target detection method based on visual contrast mechanism[J]. Journal of Sensing Technology, 2021, 34(5): 596 - 603. (in Chinese)  
徐小东,朱慧,郝忻,等. 基于视觉对比度机制的红外双极性小目标检测方法[J]. 传感技术学报, 2021, 34(5): 596 - 603.
- [11] Pan Shengda, Zhang Su, Zhao Ming, et al. Infrared dim small target detection method based on double-layer local contrast[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(1): 184 - 192. (in Chinese)  
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): 184 - 192.
- [12] Ren Long, Pan Zhibin, Ni Yue. Double layer local contrast measure and multi-directional gradient comparison for small infrared target detection [J]. Optik, 2022, 258: 168891.
- [13] Chen Cancan, Xia Runqiu, Liu Yang, et al. A simplified dual-weighted three-layer window local contrast method for infrared small-target detection [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2023, 20: 1 - 5.

- [14] Dai Y, Wu Y, Zhou F, et al. Asymmetric contextual modulation for infrared small target detection[C]//2021 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). New York:IEEE,2021:945-958.
- [15] Hui Bingwei, Song Zhiyong, Fan Hongqi, et al. Infrared image weak aircraft target detection and tracking dataset under ground/air background[J]. China Science Data; Chinese English Online Version,2020,5(3):291-302. (in Chinese)  
回丙伟,宋志勇,范红旗,等.地/空背景下红外图像弱小飞机目标检测跟踪数据集[J].中国科学数据:中英文网络版,2020,5(3):291-302.
- [16] Wang Chuanyun, Qin Shiyin. 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.
- [17] Kou Renke, Wang Chunping, Fu Qiang, et al. Infrared small target detection based on the improved density peak global search and human visual local contrast mechanism[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15(6):6144-6157.
- [18] Duan Siwei, Wang Zhonghua, Ye Zheng. Infrared small target detection algorithm based on spatial weighted local contrast[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(10):1200-1206. (in Chinese)  
段思韦,王忠华,叶铮.空域加权局部对比度的红外小目标检测算法[J].激光与红外,2020,50(10):1200-1206.
- [19] Wei Yantao, You Xinge, Li Hong. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target detection[J]. Pattern Recognition,2016,58:216-226.