

文章编号:1001-5078(2023)07-0987-09

· 综述与评论 ·

视觉对比度机制小目标增强与背景抑制综述

李刚¹, 刘京生², 耿蕊³

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100016; 2. 陆装北京军代局驻北京地区第二军事代表室, 北京 100015;

3. 北京信息科技大学, 北京 1000192)

摘要:复杂背景中的红外弱小目标因亮度低、尺寸小、可用特征少而难以检测。如何在检测中抑制背景杂波、提高目标信噪比成为该领域的研究热点与难点。本文对基于人类视觉系统对比度机制的小目标增强与背景抑制技术的演进和性能进行了归纳与分析。局部对比度测度窗口由单尺度向多尺度,乃至动态或自适应尺度的发展,满足应用中对未知尺寸小目标同步快速检测的需要;局部对比度测度计算方法由简单到复杂、依据低阶信息到采用高阶信息的变化,有利于更全面地抑制复杂背景、进一步增强目标。因此,将成为未来人类视觉对比度机制小目标检测算法的发展方向。

关键词:弱小目标检测;人类视觉对比度;背景抑制;目标增强

中图分类号:TP391;TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.002

Review of small target enhancement and background suppression based on human visual contrast mechanism

LI Gang¹, LIU Jing-sheng², GENG Rui³

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100016, China;

2. Second Office of Beijing Representative Bureau of Army Equipment Department, Beijing 100015, China;

3. Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Infrared dim target in complex background is difficult to detect due to low brightness, small size and few available features. How to suppress background clutter and improve the target signal-to-noise ratio in detection has become a hot and difficult research area in this field. In this paper, the evolution and performance of small target enhancement and background suppression technologies based on contrast mechanism of human visual system are summarized and analyzed. The development of local contrast measurement window from single scale to multi-scale, and even dynamic or adaptive scale, meets the need of rapid synchronous detection of small targets of unknown size in applications. The calculation methods of local contrast measure change from simple to complex, based on low order information to using high order information, which is conducive to more comprehensive suppression of complex background and further enhancement of the target. Therefore, it will become the future direction for small target detection algorithms for human visual contrast mechanism.

Keywords: dim small target detection; human visual contrast; background suppression; target enhancement

1 引言

红外小目标检测在预警和空间跟踪等领域应用广泛。图像中的红外目标通常由于成像距离远而只

占少量像素,又因成像系统内的噪声和背景杂波较高而具有较低的信噪比,因此极易被淹没^[1-2]。形状和纹理特征的缺乏,也使得弱小目标可利用的特

征较少。此外,应用场景的复杂性也决定了红外小目标探测的背景具有很多挑战性的特征,例如,带有冰晶的卷云和海洋容易引起阳光反射,破碎的云和云边缘随着时间的推移而漂移^[1]。因此,红外弱小目标的检测仍然是实际应用中一项比较困难的工作^[3],抑制背景杂波、提高目标信噪比成为红外小目标检测识别中的关键环节,并且一直是该领域的研究热点与难点。

广大学者对小目标检测中背景抑制与目标增强技术的研究涉及空域及变换域滤波,时、空结合滤波以及信息熵加权等多个方面^[2,4-7]。特别是基于人类视觉系统(Human Visual System, HVS)^[8-9]的一系列空间方法在复杂背景抑制与图像增强方面应用广泛。

人眼视觉系统对复杂场景具有优越的背景抑制能力,主要利用对比度变化而非单一的亮度来获得视觉显著性区域,区分目标或背景^[3]。而红外小目标与其周围局部背景间通常存在一定的对比度信息。因此,局部对比度机制相比于亮度,更适合应用于探测红外弱小目标,获得较好的检测性能。一个具有代表性的 HVS 小目标检测方法是 Chen^[8] 等 2014 年提出的局部对比度测度(Local Contrast Measure, LCM)算法,由局部范围内的目标与周围背景之间的灰度比值来表示对比度参数,并由此检测目标。其后,在 LCM 的基础上,出现了许多改进的 HVS 对比度测度检测方法,如相对局部对比度测度(Relative LCM, RLCM)^[10]、改进的局部对比度测度(Improved LCM, ILCM)^[11]、新型局部对比度测度(novel LCM, NLCM)^[12]、基于多尺度块的对比度测度(Multiscale Patch-based Contrast Measure, MPCM)^[9]以及加权强化局部对比度测度(weighted strengthened LCM, WSLCM)^[13]和局部差异自适应测度(Local Difference Adaptive Measure, LDAM)^[14]等。

本文对基于 HVS 对比度测度的小目标检测方法中的背景抑制与目标增强技术进行了总结。阐述了应用于小目标检测的经典 HVS 对比度测度的基本原理,并在此基础上对其相关衍生技术的演进和性能,特别是背景抑制与目标增强效果,进行了深入的分析对比;最后对目前 HSV 小目标检测技术的发展前景进行了展望。

2 HVS 对比度测度计算的基本原理

基于局部对比度测度的一系列算法,采用特

定结构的滑动窗口逐像素遍历红外图像并计算覆盖区域的局部对比度参数,从而获得图像的视觉显著性结果,实现目标检测,其结构如图 1(a)所示^[15],滑动窗口一般由 3×3 个子窗口组成,包括位于中心的目标 0 区域和其周围的 1~8 邻域如图 1(b)所示。

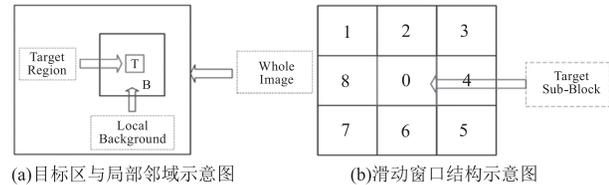


图 1 LCM 系列算法

Fig. 1 LCM series algorithms

窗口滑动过程中,算法以图像中的每一个像素为中心计算局部对比度测度。最早的传统 LCM^[8],由中心目标区域像素最大灰度值 L_0 的平方与其邻域均值 m_i 之比表示目标与局部背景之间的对比度差异:

$$LCM = \min_{i=1,2,\dots,8} \frac{L_0^2}{m_i} \quad (1)$$

后来,为改善比值运算对高亮度背景和噪声的额外增强,RLCM 算法^[10]引入差值运算并在比值运算中以均值 m_0 代替峰值 L_0 来抑制高亮背景:

$$RLCM(i, j, n) = \min_{i=1,2,\dots,8} \left(\frac{m_0}{m_i} m_0 - m_i \right) \quad (2)$$

然而,上述算法遍历时滑动窗口的大小是固定的,不利于多尺度目标的检测计算。因此, MPCM 算法^[9],又在滑动窗口中引入尺度可以根据目标尺寸进行调整的“块”的概念,此时目标子块及其周围邻域背景子块分别记为 T 和 $B_k (k = 1, 2, \dots, 8)$ 。 MPCM 的局部对比度测度以 T 与 B_k 的像素灰度均值之差 $d(T, B_k)$ 为基础,首先通过其在相反方向上的乘积,计算出目标和背景子窗在 k 方向的局部灰度差:

$$\tilde{d}_k = d(T, B_k) \cdot d(T, B_{k+4}), \quad k = 1, 2, \dots, 4 \quad (3)$$

随后,由此确定 MPCM 的局部对比度:

$$MPCM = \min_{k=1,2,\dots,4} \{ \tilde{d}_k \} \quad (4)$$

MPCM 算法中,滑动窗的子窗大小可以根据真实场景中小目标的尺度范围而设置成 2 到 9,分别对应像素 2×2 到 9×9 的小目标。因此,可以实现多尺度的目标增强及小目标检测。

3 HVS 局部对比度机制小目标增强与背景抑制的演进与性能分析

传统 LCM 算法的局部对比度计算(公式(1)),虽然能够增强图像信杂比,提高小目标的检测率,但极易引起高亮点噪声的增强,产生干扰。因此,针对性能提升的 LCM 算法改进研究一直受到学者们的广泛关注。2017 年,张祥越等^[16]提出了一种以中心子窗灰度均值与周围所有邻域子窗总灰度均值之比表示像素点局部对比度特性的改进 LCM 算法。算法还将得到的比值对比度图 $C(x,y)$ 与原图像 $I(x,y)$ 作差,获取目标的显著性图像 $S(x,y)$ 。从实验结果看,经比值-差值显著图处理后的红外小目标图像的信杂比增益(Signal Clutter Ratio Gain, SCRG)与背景抑制因子(Background Suppress Factor,BSF)相比传统 LCM 算法均有提升。

3.1 多尺度小目标的快速检测

由于实际中的红外小目标尺寸通常是不确定的,LCM 单一尺度的滑动窗口需对不同尺度目标分别遍历检测导致算法效率下降;而能够实现多尺度计算的 MCMP 和 RLCM 等方法又存在计算量大、耗时长等问题。因此,针对未知尺寸目标的快速检测方法受到越来越多的关注,如单尺度计算实现多尺度目标检测的方法^[3,17],自适应尺度调整的检测方法^[17]等。

其中,以单尺度计算实现多尺度检测的双层局部对比度测度(Double-layer Local Contrast Measure, DLCM)算法^[3]的滑动窗口结构如图 2 所示。

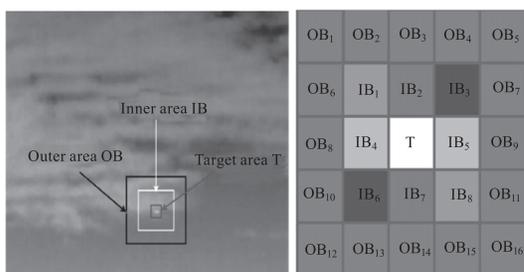


图2 DLCM 双层滑动窗口结构

Fig.2 The sliding window of DLCM algorithm

包括位于中心的目标子窗 T 及其四周的内层子窗 IB_i 和外层子窗 OB_j ,分别用于在滑动窗遍历图像时,计算各像素对应的 $d(T, IB_i)$ 与 $d(T, OB_j)$,即内、外层灰度差对比度。随后,即可依据红外图像中弱小目标辐射的高斯型特点,由公式(5)得出每个像素对应滑动窗的 DLCM 值。滑动窗的内、外两层结构确保了其在逐像素扫描时对小、大尺

寸目标的同步检测覆盖。

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

式中, D_i 用于度量内层的灰度差对比度,其值是内层子窗中各对角位灰度差对比度乘积的最小值;而 D_o 用于度量外层的灰度差对比度,大小为外层子窗灰度差对比度的最小值。

根据公式(5),窗口滑过小目标区域得到的 DLCM 值将大于非目标区域的计算结果,且非目标区域的 DLCM 值有可能为 0。因此,算法处理后的 DLCM 显著图将极大地增强目标、抑制背景,示例如图 3(b)、3(c)^[3]。DLCM 在与其他同类算法的定量对比中,表现出了复杂场景目标检测的优秀性能,平均提高 BSF 9.3 倍以上、SCRG 7.8 倍以上。

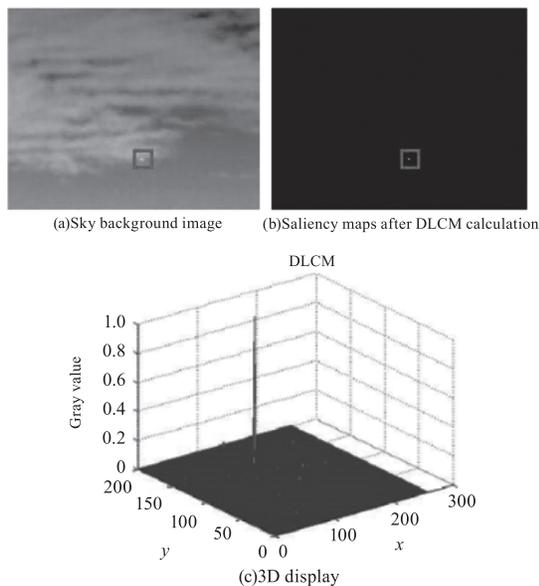


图3 DLCM 的处理效果

Fig.3 The processing effect of DLCM

更进一步,韩金辉^[18]等考虑到光学系统的弥散效应,认为真实目标的主要能量通常集中在中心附近的小区域内,提出了一种三层滑动窗口结构,并由此实现了三层局部对比度测度(Three-layer Local Contrast Measure, TLCM)红外弱小目标检测。如图 4 所示的窗口结构中,用于采集小目标主要能量的中心层与获取目标周围背景强度的最外层之间,存在一层过渡的中间层结构,它的主要作用是隔离能量,即在目标较大时,防止目标的外围部分进入最外层被当成背景。中间隔离层的存在,确保了目标大小变化时窗口的通用性。只要目标能量没有超过中间层的区域,窗口的大小就不需要改变。



图 4 三层滑动窗口结构

Fig. 4 Three-layer sliding window

除增加中间隔离层外,三层滑动窗口在遍历图像像素计算局部对比度时,还对中心层和最外层分别引入高斯滤波与最接近滤波,从而使中心目标区域得以增强、外围高亮背景得到部分均衡。然后,由目标增强图 I_{mf} 和背景估计图 B ,利用公式(6)进行 TLCM 计算^[8],并引入非负约束进一步抑制杂波。

$$TLCM(i,j) = \max \left[\frac{I_{mf}(i,j)}{B(i,j)} I_{mf}(i,j) - I_{mf}(i,j), 0 \right] \quad (6)$$

表 1 比差联合 TLCM 算法 SCRG 和 BSF 提高倍数表

Tab. 1 Table of SCRG and BSF improvement multipliers for the combined ratio-difference TLCM algorithm

	DoG	I LCM	N LCM	R LCM	M P C M	W L D M	M D T D L M S	T C F	S T L C F
序列 SCRG	41.4	23.6	80.9	12.9	25.6	42.4	45.2	15.4	6.2
序列 BSF	3.6×10^4	3.1×10^3	4.7×10^6	1.2×10^4	7.2×10^6	6.9×10^3	3.2	5.5×10^3	1.1×10^6
单帧 SCRG	14.2	6.5	9.3	9.0	16.0	2.6	51.6	/	/
单帧 BSF	4.1×10^3	3.6×10^2	3.7×10^4	1.0×10^3	1.1×10^4	139.5	11.4	/	/

从表中数据可以看到,TLCM 相对于 9 种对比度型算法的信杂比率增益 SCRG 和背景抑制因子 BSF 都有明显提高。其中,SCRG 平均提高 6.2 倍(序列图像)和 2.6 倍(单帧图像)以上;BSF 平均提高 3.2 倍(序列图像)和 11.4 倍(单帧图像)以上,特别是 BSF 相对多数参考算法的提高都非常可观,达到上千量级。这再次印证了比差联合 TLCM 算法优秀的目标增强与背景抑制能力。

除采用多层窗结构实现对大、小目标的检测覆盖之外,还可以通过预估目标尺寸并自适应调整目标子窗大小的方式,减少计算量,提高检测效率。Qiu 等^[17]就在 MPCM 的基础上,提出了一种自适应尺度区块对比度测量(Adaptive Scale Patch-based Contrast Measure,ASPCM)的红外小目标检测方法。该方法通过引入潜在目标中心及尺寸的估计机制,使得 PCM 滑动窗口的中心子窗可以根据目标的

与 DLCM 方法类似,经算法处理后,单帧及序列图像示例中的小尺寸、低亮度目标均得到了明显增强;点噪声、高亮背景、背景边缘中的绝大部分也都得到了很好的抑制。这些都可以从比差联合的 TLCM 显著图及其三维显示效果中直观看出^[18]。以上述 TLCM 显著图为基础的阈值目标检测结果也未出现任何虚警与漏警。

文中比差联合 TLCM 算法与 DoG (Difference of Gaussians)、ILCM、NLCM、RLCM、MPCM、WLD (Weighted Local Difference Measure)、MDTDLMS (Multi-Directional Two-Dimensional Least Mean Square)^[19]、TCF (Temporal Contrast Filter)^[20]、及 STLCF^[6]等 9 种对比度型算法性能指标的定量对比结果显示,除极个别情况外,前者的 SCRG 值和 BSF 值都是最大的,算法对目标增强和背景抑制性能的提高十分明显。表 1 给出了 TLCM 算法相对于上述 9 种算法 SCRG 和 BSF 的平均提高倍数,分别对应于序列和单帧图像的实验结果。

预估大小而自适应调整。从而可以获得更快的检测速度与更好的目标增强效果。

利用红外目标区域内部渐变和边缘突变的特点,算法采用 3×3 的 Sobel 滤波器模版进行边缘检测,并根据边缘图像 $F(i,j)$ 估计潜在目标的位置与大小。获得潜在目标中心坐标 (x,y) 及其尺寸信息 L_k 后,一个以坐标 (x,y) 为中心的滑动窗口结构如图 5 所示。

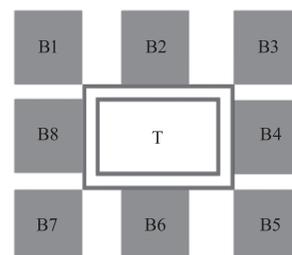


图 5 ASPCM 滑动窗结构

Fig. 5 The sliding window of ASPCM algorithm

其中, T 子窗仅定义为潜在目标区域边缘内的部分,

由8个大小固定的背景子窗 B_k 包围。因此,当窗口在整幅图像上滑动时,仅对潜在目标中心像素计算局部对比度,且计算的 ASPCM 就带有了尺寸信息 L_k 。

与 MPCM 类似,潜在目标所在中心子窗与周围背景子窗在8个不同方向的局部灰度差值为:

$$d_i = d(T, B_i) = m_T(x, y) - m_{B_i}(x, y), \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (7)$$

检测亮目标时,可以写成:

$$d_i = \begin{cases} m_T(x, y) - m_{B_i}(x, y) & m_T > m_{B_i} \\ 0 & m_T < m_{B_i} \end{cases} \quad (8)$$

因此,目标和背景的程度差

$$D(x, y) = \min\{d_i^2\}, \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (9)$$

结合目标在局部区域的显著性 $P(x, y)$, 像素 (x, y) 的 ASPCM 定义为:

$$ASPCM = P(x, y) \cdot D(x, y) \quad (10)$$

式中,携带潜在目标尺寸信息的 $D(x, y)$ 能够更准确地测量目标与其周围环境的对比度,从而有效增强目标;而 $P(x, y)$ 的值则仅在像素 (x, y) 同时满足边缘距离要求与尺寸范围约束而成为潜在目标时为1,否则为0,因此可以抑制更多的背景杂波,大大降低小目标检测时的虚警率。

利用公式(10)计算每个像素的 ASPCM,就得到处理后的增强图像。显然,ASPCM 值越高的像素越可能是真正的小目标。文献中对示例图像的处理结果表明,ASPCM 相比 ILCM、MPCM、RLCM,以及 AACDD (Absolute Average Difference Weighted by Cumulative Directional Derivatives)^[21] 和 NRAM (Non-Convex Rank Approximation Minimization)^[22] 等方法都表现出了更优的背景抑制与目标增强效果,平均背景抑制因子 BSF 最多提高约40倍,对比度增益 CG (Contrast Gain) 最高增强5.7倍。此外,算法对潜在目标尺寸和位置的预估计,非常有效地提升了算法的计算速度,使得算法在同等检测精度的情况下拥有了更少的运行时间和更高的运行效率。因此,该方法能有效地探测到复杂背景和重噪声条件下的小红外目标。

3.2 时空结合的小目标检测

由于红外小目标单帧检测方法在斑点噪声和小破碎云抑制方面表现不佳,而时间检测方法在漂移

云边缘抑制方面表现不佳^[1],时间、空间相结合的小目标检测方法逐渐涌现^[6,23-24],这些算法对时域特征的处理都从不同程度上改善了检测中的小目标增强与背景抑制效果,但在长距离探测时,有时仍会因高亮度背景的影响而产生虚警。

TVPCF (Temporal Variance and Spatial Patch Contrast Filter) 算法^[1]结合空间对比度测度滤波器和时间方差滤波器 (Temporal Variance Filter, TVF),实现小目标检测中的背景抑制与目标增强。对粗背景(如云边缘),依据其与目标边缘的分布差异,利用 MPCM^[9] 对角线方向的局部灰度对比度(公式(3))实现抑制。文中实验结果表明,MPCM 与其他局部对比度小目标检测方法相比,具有更好的目标增强效果和更少的背景杂波残差,如图6所示。随后,利用 TVF 的时间相关性进一步在精细水平上去除序列图像中的碎云和随机散斑噪声,从而使得复杂背景下的小目标检测结果得到明显改善。相比 STLCF 等序列目标检测方法,TVPCF 在所有示例图像序列上都取得了最好的目标增强和背景抑制效果。

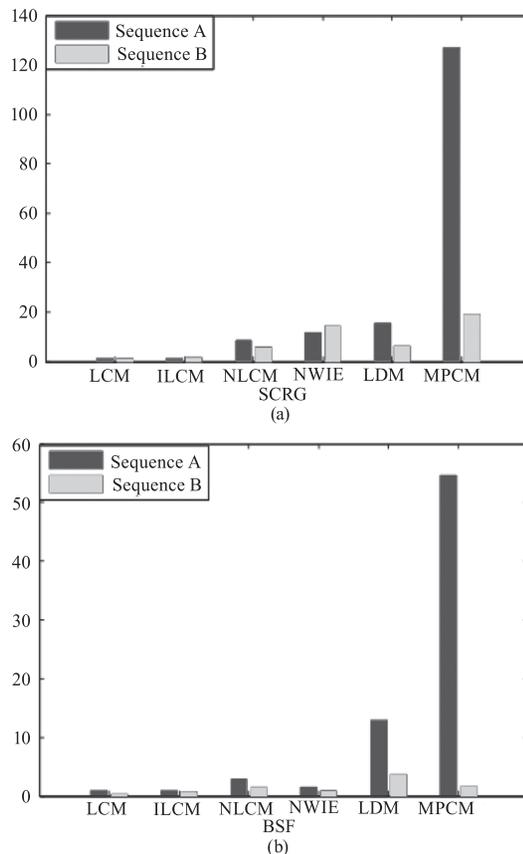


图6 不同局部对比度机制的平均 SCR 与 BSF 对比图
Fig. 6 Diagram of the average SCR and BSF results for different local contrast measure methods

此外,将空域 RLCM 与时域局部差分(Temporal Local Difference Algorithm, TLCD)结果相结合,利用目标的时、空相关性获取时空相对局部对比度图(Spatial-Temporal Relative Local Contrast Map, STRLCM)^[15],对小目标检测图像的背景抑制作用和目标增强效果也都有明显提升。

用 STRLCM 处理图 7(a)所示的低信噪比、高亮度边缘图像,得到其目标的空域 RLCM、时域 TLCD 以及 STRLCM 融合增强结果分别如图 7(b)、(c)、(d)所示,图中红色方框为目标所在位置。图中对比结果表明,时域局部差分算法 TLCD 的引入可以有效抑制空域 RLCM 方法在高亮度背景去除后的残余噪点,进一步增强目标相对背景的显著效果。

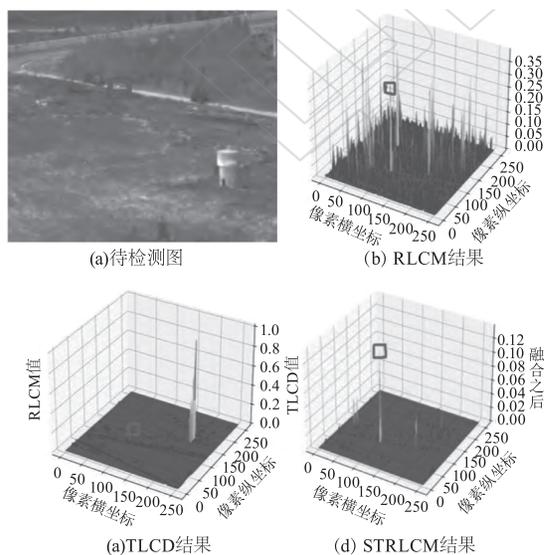


图 7 STRLCM 滤波各阶段三维图

Fig. 7 Three-dimensional images of STRLCM filtering result in steps

对比该时空融合算法与 STLCF(Spatial-Temporal Local Contrast Filter)^[6]、STLCM(Spatial-Temporal Local Contrast Map, STLCM)^[25]、STLDM(Spatial-Temporal Local Difference Measure, STLDM)^[23]的 SCRG 和 BSF 值可以发现,除个别图像序列的 SCRG 值以 STLDM 算法最高(且差距很小)之外,融合 STRLCM 算法的 SCRG 和 BSF 都是最大的。这说明,相比较其他算法,这一基于相对局部对比度的时空融合算法不仅能很好地增强目标,而且能够更好地抑制高亮背景。

3.3 局部对比度测度计算的新方法

为进一步提升 HVS 局部对比度机制小目标检测算法的目标增强与背景抑制能力,张巍等^[24]采用无监督聚类的局部窗口结构遍历图像,并将聚类结

果应用于目标与背景邻域之间亮度差异的计算,形成新型局部对比度测度。算法首先采用与 MPCM 相同的滑动窗口扫描计算待检测图像,并对得出的对比度结果图进行阈值分割,得到聚类的候选像素集合。再构造一个大小 15×15 像素、基于无监督聚类的窗口,其以候选像素 (x, y) 为中心时如图 8 所示。图中,目标区域 T 和亮、暗背景区域 B_1 、 B_2 的形状由无监督聚类的结果决定; (x_j, y_j) 则对应目标区域的边缘点坐标。

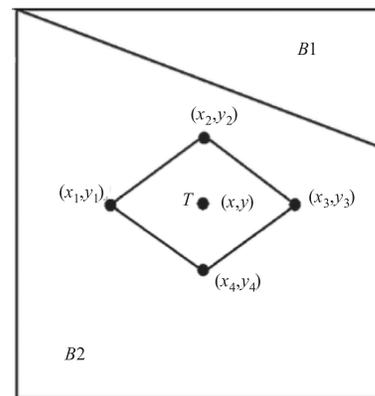


图 8 无监督聚类窗口结构

Fig. 8 The window for unsupervised clustering

随后,使用模糊 C 均值算法(Fuzzy C-Means, FCM)对候选像素集合进行聚类,将局部区域分为小目标、亮背景与暗背景三类,并由此对每个候选像素的局部对比度进行计算。描述目标与背景亮度差别的 FCM_LCM 定义为^[24]:

$$FCM_LCM = \begin{cases} (M_T - M_{B_1})^2, & M_{B_1} > M_{B_2} \\ (M_T - M_{B_2})^2, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中, M_T 、 M_{B_1} 、 M_{B_2} 为对应区域的亮度平均值。计算后得到的 FCM_LCM 显著图移除了几乎所有的背景干扰,相比 LCM、ILCM 和 MPCM 等高性能的检测算法,表现出了更好的检测性能和背景抑制效果。

如前所述,自 LCM 出现开始,基于 HVS 对比度机制的小目标检测技术得到了长足的发展,目标增强与背景抑制的性能不断提升。然而,在这些方法中,目标与背景的差异度是通过计算由简单图建模的局部成对关系来构建的。而两个子块之间的这种两两差异可能会受到背景杂波的显著影响,并不足以获取目标与其周围环境之间的高阶亲和关系。因此, Lu^[26]等在 2022 年提出了一种称为局部超图相

异度测度 (Local Hypergraph Dissimilarity Measure, LHDM) 的新型 LCM 算法,首次将超图建模引入到小目标检测过程中。由于利用了高阶邻域信息,该方法在处理背景杂波时具有较强的鲁棒性;可以显著增强小目标,并有效抑制背景杂波。

依据算法流程, LHDM 的得出首先要建立概率超图相异度的数学表示。以顶点集 V 、超边集 E 与超边权重 $w(e)$ 表示的概率超图为 $G = (V, E, w)$ 。由于超边由一组顶点组成,因此超图比简单图更具有鲁棒性,如图 9 所示。

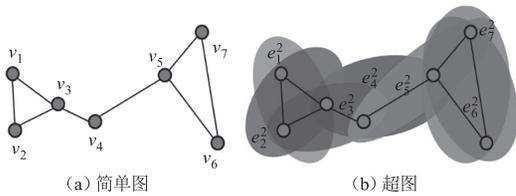


图 9 简单图与超图对比

Fig. 9 Comparison between simple graph and hypergraph

受局部对比度测量方法的启发^[8-9], LHDM 算法仍以大小为 $3p \times 3p$ 的嵌套滑动窗口来获取中心区域与其周围邻域之间的相对关系,并构造 kNN (k-Nearest Neighbor) 超图用于嵌套窗口对相应的邻域信息进行编码。窗口中的每个像素由顶点 v 表示,其与灰度空间中的 k 个最邻近像素构成一个超边 e^k 。为了在满足计算要求的同时更精确地增强局部对比度,选择中心顶点 v_0 和 8 个关键顶点 $v_1 \sim v_8$ 进行计算,如图 10 所示。

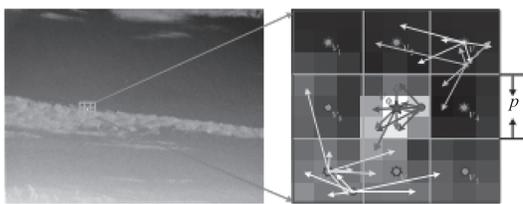


图 10 超图中心顶点 v_0 和环绕顶点 v_i 的分布

Fig. 10 Distribution of the reference vertex v_0 and all surrounding vertices v_i

超图建立后,可以计算任意 2 顶点之间的 kNN 超图相异度 $d_s(v_i, v_j)$ ^[26],并借鉴 MPCM 算法对目标与背景子窗在 k 方向的局部灰度差的计算公式(3),得到中心目标顶点 v_0 与背景顶点在第 i 个方向上的差异度:

$$d_{s_i} = d_s(v_0, v_i) \cdot d(v_0, v_{i+4}), \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (12)$$

最终,图像在特定尺度下的局部超图相异度 LHDM 定义为上述差异度 d_{s_i} 在所有方向的最小值。

$$LHDM = \min_{k=1,2,\dots,4} \{d_{s_i}\} \quad (13)$$

当改变窗口大小时,可以获得对不同目标尺寸有效的 LHDM 显著图。在此基础上,对一组多尺度的 LHDM 执行最大池化,可以构建出最终的显著性映射 $LHDM_m$ 。

文献中基于 SCRG 和 BSF 的定量评价结果表明,与其他算法相比, LHDM 算法对大多数图像序列都能得到最佳或次最佳的目标增强与背景抑制结果。这可以归因于引入概率超图的局部差异度量的构建,它使得图像中的高阶亲和信息得到了有效利用。

4 结论

红外弱小目标成像背景复杂、形状纹理特征缺乏等特点,使其检测成为一项非常具有挑战性的工作。国内外学者提出了大量的检测算法,从不同角度对抑制背景杂波、提高目标信噪比这一关键技术环节进行研究。基于人类视觉系统的局部对比度测度相关算法在复杂背景抑制与目标增强方面发展迅速。它的发展主要经历了:(1)局部对比度计算由单尺度向多尺度,乃至动态尺度和自适应尺度演进,这使得红外小目标检测在实现杂波抑制与目标信噪比提高的同时确保了检测速度的优越性;(2)局部对比度测度定义方法由简单向复杂、使用低阶信息向高阶信息演变,如无监督聚类局部窗口结构和超图相异度测度等的引入,这有利于更加深入的抑制复杂背景、增强目标。因此,有利于提取目标与背景邻域深层对比度信息的高阶对比度测度算法以及实现多尺度目标同步检测的快速空间滤波方法,将成为未来人类视觉对比度机制小目标检测算法的发展方向。

参考文献:

[1] Gao Jinyan, Lin Zaiping, An Wei. Infrared small target detection using a temporal variance and spatial patch contrast filter [J]. IEEE Access, 2019. 7 (March): 32217 - 32226.

[2] Xiangzhi Bai, Yanguang Bi. Derivative entropy-based contrast measure for infrared small-target detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56

- (4):2452-2466.
- [3] Pan Shengda, Zhang Su, Zhao Ming, et al. Infrared small target detection based on double-layer local contrast measure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1):0110003-1-9. (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):0110003-1-9.
- [4] Duan Siwei, Wang Zhonghua, Ye Zheng. An infrared small object 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.
- [5] Marvasti Fereshteh Seyed, Mosavi Mohammad Reza, Nasiri Mahdi. Flying small target detection in ir images based on adaptive toggle operator[J]. *IET Computer Vision*, 2018, 12(4):527-534.
- [6] Deng Lizhen, Zhang Jieke, Zhu Hu. Infrared moving point target detection using a spatial-temporal filter[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 95:122-127.
- [7] Li Xinlong, ALI Xin-long, Askar Hamdulla. Infrared dim-small target tracking algorithm based on local similarity[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(5):668-674. (in Chinese)
李鑫隆, 艾斯卡尔·艾木都拉. 基于局部相似的红外小目标跟踪算法[J]. *激光与红外*, 2021, 51(5):668-674.
- [8] Chen C L Philip, Li Hong, Wei Yantao, et al. A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(1):574-581.
- [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] Han Jinhui, 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, 15(4):612-616.
- [11] Han Jinhui, Yong Ma, Bo Zhou, et al. A robust infrared small target detection algorithm based on human visual system[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2014, 11(12):2168-2172.
- [12] Qin Yao, Li Biao. Effective infrared small target detection utilizing a novel local contrast method[J]. *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.*, 2016, 13(12):1890-1894.
- [13] Han Jinhui, Moradi Saed, 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.
- [14] Li Lin, Li Zhengzhou, Li Yongsong, et al. Small infrared target detection based on local difference adaptive measure[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 17(7):1258-1262.
- [15] Chen Ziqiang, Liang Chen. Infrared dim target detection algorithm with low false alarm rate[J]. *Telecommunication Engineering*, 2021:1-7. (in Chinese)
陈紫强, 梁晨. 低虚警率的红外弱小目标检测算法[J]. *电讯技术*, 2021:1-7.
- [16] Zhang Xiangyue, Ding Qinghai, Luo Haibo, et al. Infrared dim target detection algorithm based on improved LCM[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7):0726002-1-7. (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):0726002-1-7.
- [17] Qiu Zhaobing, Ma Yong, Fan Fan, et al. Adaptive scale patch-based contrast measure for dim and small infrared target detection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19:7000305-1-7000305-5.
- [18] Han Jinhui, Dong Xinghao, Jiang Yawei, et al. Infrared small dim target detection based on local contrast mechanism[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(4):357-366. (in Chinese)
韩金辉, 董兴浩, 蒋亚伟等. 基于局部对比度机制的红外弱小目标检测算法[J]. *红外技术*, 2021, 43(4):357-366.
- [19] Han Jinhui, Liu Sibang, Qin Gang, et al. A local contrast method combined with adaptive background estimation for infrared small target detection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(9):1442-1446.

- [20] Sun S G, Kim K T, Kim S. Highly efficient supersonic small infrared target detection using temporal contrast filter[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(2): 81 – 82.
- [21] Aghaziyarati Saeid, Moradi Saed, Talebi Hasan. Small infrared target detection using absolute average difference weighted by cumulative directional derivatives[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 101: 78 – 87.
- [22] Zhang Landan, Peng Lingbing, Zhang Tianfang, et al. Infrared small target detection via non-convex rank approximation minimization joint l_2, l_1 norm[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1821.
- [23] Du Pen, Hamdulla Askar. Infrared moving small-target detection using spatial-temporal local difference measure [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(10): 817 – 1821.
- [24] Zhang Wei, Tang Gengbiao, Lin Liyu. Infrared small target detection based on unsupervised clustering[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2021, 41(12): 188 – 190, 204. (in Chinese)
张巍, 唐耿彪, 林立宇. 基于无监督聚类的红外小目标检测 [J]. *舰船电子工程*, 2021, 41(12): 188 – 190, 204.
- [25] Zhao Bendong, Xiao Shanzhu, Lu Huanzhang, et al. Spatial-temporal local contrast for moving point target detection in space-based infrared imaging system[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 95: 53 – 60.
- [26] Lu Ruitao, Yang Xiaogang, Jing Xin, et al. Infrared small target detection based on local hypergraph dissimilarity measure[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 7000405-1-7000405 – 5.