

基于局部对比度的自适应 Top-Hat 红外小目标检测

刁腾彦¹, 袁丽华^{1*}, 王树鹏²¹南昌航空大学测试与光电工程学院无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;²中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000

摘要 Top-Hat 的检测性能受限于固定单一的结构元素, 导致对复杂背景的抑制能力差。针对该方法的不足, 提出两种具有递进关系的改进 Top-Hat 算法。首先依据小目标与其邻域灰度值差异, 改进了 Top-Hat 变换, 提出了一种具有双结构元素的 Top-Hat 算法, 分别为膨胀和腐蚀操作设计了各自的结构元素, 并且调整了开运算的运算顺序, 以提高对红外小目标的检测性能。在此基础上, 又提出一种基于局部对比度的自适应双结构 Top-Hat 红外小目标检测方法, 通过计算局部对比度得到显著图, 获得先验信息, 自适应地改变双结构元素的大小, 利用目标区域及其邻域的灰度值差异来抑制背景和增强目标。与同类方法和非同类方法进行对比实验研究, 结果表明, 所提基于局部对比度的自适应 Top-Hat 方法在 5 种评价指标中均表现突出。

关键词 红外图像; 小目标检测; 局部对比度; Top-Hat

中图分类号 TN219

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222850

Adaptive Top-Hat Infrared Small Target Detection Based on Local Contrast

Xi Tengyan¹, Yuan Lihua^{1*}, Wang Shupeng²¹Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, College of Testing and Optoelectronic Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;²China Aviation Development Shenyang Liming Aero Engine Co., Ltd., Shenyang 110000, Liaoning, China

Abstract The detection performance of Top-Hat is limited by a fixed single structural element, resulting in poor suppression for complex background. This paper proposes two improved Top-Hat algorithms with a progressive relationship. First, the Top-Hat transform is enhanced according to the gray value difference between small targets and their neighborhoods, and a Top-Hat algorithm with two structural elements is demonstrated. The structural elements are designed for dilation and erosion operations, and the operation sequence of the open operation is adjusted to get better the detection performance for small infrared targets. Based on the upgraded method, a Top-Hat infrared small target detection method with adaptive dual structure based on local contrast is present. The prior information can be obtained, and the size of the dual structure elements can be adaptively changed by calculating the local contrast to obtain the saliency map. The gray value difference between the target region and its neighborhood is used to suppress the background and enhance the target. The results show that the proposed adaptive Top-Hat method based on local contrast performs best in the five evaluation indexes compared with similar and non-similar methods.

Key words infrared image; small target detection; local contrast; Top-Hat

1 引言

红外搜索与跟踪 (IRST) 系统在军事领域有着极高的应用价值, 在民用领域同样有着广泛的应用, 例如森林预警、民航监控等^[1]。红外小目标检测是 IRST 中的关键技术之一, 由于红外成像原理的特殊性以及成

像过程中的光学衍射、复杂天气的影响, 目标在红外图像中呈现斑点状, 缺少目标纹理结构等信息, 再者由于成像距离远、探测器硬件等影响, 红外图像杂波较多、背景复杂, 因此红外小目标检测一直都是一个研究难点。

红外小目标检测一般分为单帧图像检测和序列图

收稿日期: 2022-10-20; 修回日期: 2022-11-14; 录用日期: 2022-11-25; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(51865038)

通信作者: *lihuayuan@nchu.edu.cn

像检测,其中单帧检测是研究基础。早期常见的方法通过设计空域或者频域滤波器来抑制红外图像背景,例如 max-mean^[2]、max-median^[2] 及小波变换^[3]。这些方法具有实现简单、时效性高等优点,但都是建立在背景和背景分别分布在高频或低频空间的假设基础上的,在实际应用中的复杂背景下,该类方法会有较高的虚警率。形态学 Top-Hat^[4] 由于计算量小、鲁棒性强等优点,许多学者在其基础上提出了改进方法^[5-6]。例如 Bai 等^[7] 提出一种具有环形结构元素的新型 Top-Hat (NETH),并将其应用于红外小目标检测领域。这类方法存在两个不足:一个是需要先验信息对结构元素进行预设置,从而最大程度地发挥检测性能,而在实际应用中难以得知图像的先验信息;另一个则是简单的结构元素无法利用局部信息来抑制复杂背景和增强目标。Gao 等^[8] 根据红外图像的非局部自相关特性,假设目标分布在稀疏矩阵成分中,对原始图像进行成分分解,构建了红外块图像 (IPI) 模型,将小目标检测问题转换为矩阵恢复优化问题。但是这类方法在强烈边缘噪声情况下受噪声干扰严重,而且由于使用迭代方法对模型进行求解,会有实时性较差的问题。Dai 等^[9] 利用空间相关性,引入张量恢复方法至红外小目标检测领域,提出了重加权红外块张量 (RIPT) 模型,及其基础上使用非凸低秩约束张量核范数 (PSTNN) 模型^[10]。这类方法虽然解决了实时性差的问题,但是由于与小目标特性相似的边缘噪声和一些尖锐背景容易被分解至稀疏成分中,因此这类方法对这种干扰噪声异常敏感。

基于人类视觉系统 (HVS) 的方法假设目标是图中最为显著的区域,根据小目标区域与其邻域的灰度值差异,扩大目标区域与邻域的灰度对比度。Chen 等^[11] 基于上述思想提出局部对比度方法 (LCM)。在此基础上,改进的方法包括相对局部对比度 (relative LCM)^[12] 以及基于 High-Boost 多尺度局部对比度 (HBMLCM)^[13] 等。此类方法遇见多目标相距较近的情况时容易造成重影现象。另外一种基于 HVS 的方法是用目标图像块和背景图像块的差异来定义局部对比度 (MPCM)^[14]。但是在许多的场景中,目标并不是最显著的区域,而且当背景中出现边缘背景和高亮背景时,这类方法同样会增强边缘部分以及噪声的对比度。

平均绝对灰度差分 (AAGD) 法^[15] 根据小目标的灰度值特性以及小目标不同于背景杂波和噪声的局部特征来抑制背景和增强目标,对高强度边缘背景非常敏感。为了解决此问题,在其基础上进行改进,相关的方法有累计方向导数加权的绝对灰度差 (AADCCD) 法^[16] 和绝对方向均值差 (ADMD) 法^[17]。这类方法根据局部平均特性抑制背景,增强小目标,因为只通过局部平均和减法运算实现,所以具有较好的实时性;但是由于利用了局部背景窗口,当目标接近高强度背景时,

容易造成目标漏检的情况。

为了解决上述不足,本文提出一种基于局部对比度的自适应 Top-Hat (ATHLC) 红外小目标检测方法。首先,通过计算目标区域与其邻域的局部灰度值差异来增强目标,并提取目标的感兴趣区域,获取目标大致尺寸的先验信息;之后,改进 Top-Hat 变换,利用目标与背景之间的灰度差异,分别设计了膨胀和腐蚀操作的结构元素,并改变开运算的运算顺序,对局部对比度映射图进行开运算;根据获得的目标先验信息,自适应设置两种结构元素的大小,极大地抑制了目标区域的背景和噪声,然后对原始图像与开运算结果进行差分得到最终检测结果;最后为了提高目标区域的对比度,对目标进行膨胀操作,显著提高了信杂比 (SCR)。

2 相关理论

2.1 局部对比度

红外图像中目标所在的区域不同于其邻域,目标在局部区域中是较为明显的。局部对比度方法^[11] 根据小目标区域与其邻域的灰度值差异,扩大目标区域与邻域的灰度对比度。如图 1 所示, u 代表小目标区域,根据国际光学工程学会 (SPIE) 定义,其面积小于总图像大小的 15%,其大小不超过 9×9 个像素点^[18]。而 v 是局部背景区域,其窗口大小一般为小目标区域的 3 倍。将滑动窗口 v 遍历整个图像,得到若干图像块,所得图像块可以由 9 个单元格表示。图 1 中“0”表示窗口 v 的中心像素点,即目标可能出现的点,其余点的灰度均值 $m_k (k = 1, 2, 3, \dots, 8)$ ^[11] 为

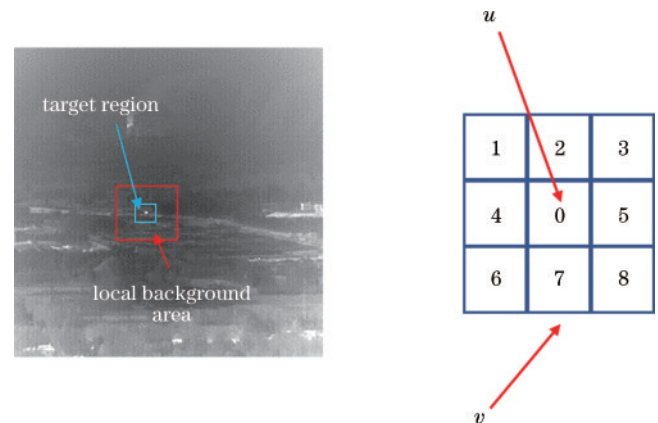


图 1 目标区域示意图

Fig. 1 Schematic of target area

$$m_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_k, \quad (1)$$

式中: N 为第 k 个图像块包含的像素个数; p_k 是区域的第 i 个像素点的灰度值。中心区域像素点与邻域第 i 个像素点之间的对比度 C_i^k 为

$$C_i^k = \frac{L_k}{m_k}, \quad (2)$$

式中: L_k 为第 k 个图像块的中心区域的最大灰度值。

为了突出小目标,中心区域的局部对比度 C_k 可变化为

$$C_k = \min L_k \times C_i^k = \min L_k \times \frac{L_k}{m_k} = \min \frac{L_k^2}{m_k} \quad (3)$$

C_k 越大,则是小目标的可能性越高,之后用 C_k 取代中心像素点的值。计算所有图像块局部对比度之后,生成显著图,如图 2 所示。分别使用 3×3 、 5×5 、 7×7 滑动窗口对原图进行多尺度遍历,图像目标区域有着明显增强,但是,其他高亮的噪声部分也相应被增强。

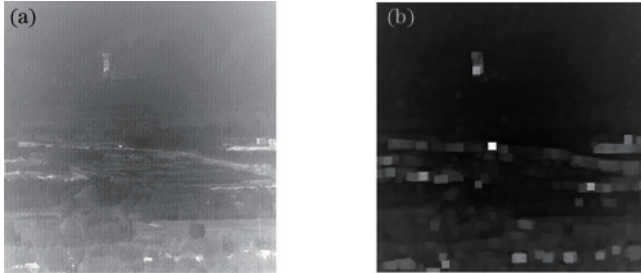


图 2 原图与 LCM 显著图。(a)原图;(b)LCM 显著图
Fig. 2 Original image and LCM map. (a) Original image; (b) LCM map

2.2 传统 Top-Hat

在传统 Top-Hat^[4]中,将原始图像减去开运算结果,得到检测结果。开运算和传统 Top-Hat 分别定义为

$$(f \circ B)(x, y) = (f \ominus B) \oplus B, \quad (4)$$

$$T_{\text{Hat}}(x, y) = f(x, y) - (f \circ B)(x, y), \quad (5)$$

式中: f 代表原始图像; \circ 表示开运算; \oplus 和 \ominus 分别代表膨胀和腐蚀操作; B 表示结构元素。在形态学中,膨胀

和腐蚀操作本质上都是取最值,在进行最值运算过程中,膨胀操作后的图像灰度值比原始图像灰度值要更大,腐蚀操作后的要更小。膨胀操作能增强明亮区域,而腐蚀操作能减少暗区域。开运算是先腐蚀后膨胀,可以平滑图像中明亮的小块区域。将结构元素看作一个卷积模板,它决定了应用于形态学运算的窗口大小和形状,因此结构元素能够很大程度上影响最终的效果。

3 所提方法内容

3.1 改进双结构元素 Top-Hat

红外图像中目标区域的灰度值通常高于周围背景区域的灰度值,而且与其局部背景邻域的灰度值没有空间相关性。经典 Top-Hat^[4]在进行膨胀和腐蚀操作时使用的是相同的结构元素,忽略了目标区域与周围背景区域之间的差异信息。为了解决这个问题,分别设计了两种适配膨胀和腐蚀操作的结构元素,具体如图 3 所示。

图 3 中左侧为膨胀和腐蚀运算的结构元素示意图,右侧是对应的像素点的示意图。膨胀运算的结构元素由一个圆形结构元素 B_i 和方形结构元素 B_o 组成, B_i 镶嵌在 B_o 的中心位置。腐蚀运算的结构元素 B_e 同样是圆形结构元素,但是由于圆形结构元素在遍历图像时,会出现图像边缘无法遍历的区域,因此将其补齐成一个外接方阵。由于在像素点中没有圆形的概念,因此引入计算机图形学中的 Bresenham 算法^[19],在像素点中构建一个圆形结构元素(图 3 中 B_i 半径为 4, B_e 半径为 3)。

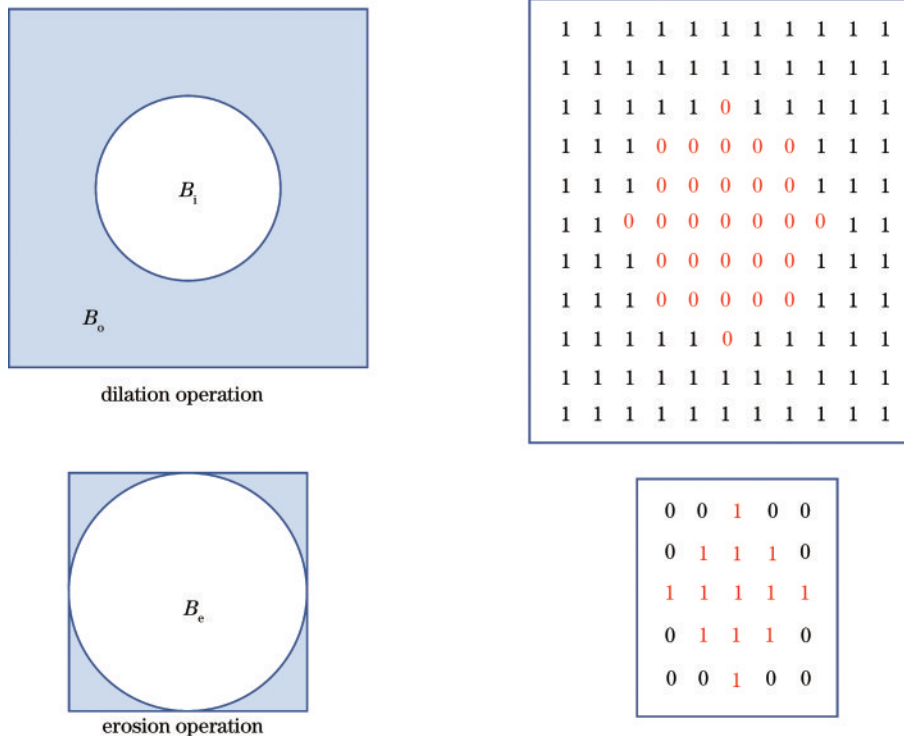


图 3 结构元素示意图
Fig. 3 Schematic of structural elements

与传统 Top-Hat 不同的是,所提方法为了适配两种结构元素,改变了开运算中腐蚀和膨胀操作的顺序,表达式为

$$\left[f(x, y) \circ B_{i \circ e} \right] = (f \oplus B_{i \circ}) \ominus B_e, \quad (6)$$

式中: $f(x, y)$ 代表原始图像; $B_{i \circ e}$ 是图 3 中两种结构元素的统称; $B_{i \circ}$ 和 B_e 分别是膨胀和腐蚀操作的结构元素。因此改进的 Top-Hat 定义为

$$N_{\text{Top-Hat}}(x, y) = f(x, y) - (f \circ B_{i \circ e})(x, y). \quad (7)$$

在 $f(x, y) \circ B_{i \circ e}$ 运算中,首先使用 $f \oplus B_{i \circ}$ 将目标区域的像素替换为周围背景区域的像素,然后 \ominus 运算只针对周围背景区域的像素,这将减少参与运算的像素数量,从而抑制噪声的影响。结构元素 $B_{i \circ}$ 将邻域像素替换目标像素,若处理的区域是非目标区域,则无法确定处理区域的像素及其邻域像素之间的关系,从而可能会导致改进 Top-Hat 运算中产生负值,因此可将式(7)运算变形为

$$N_{\text{Top-Hat}} = \max \left[f(x, y) - (f \circ B_{i \circ e})(x, y), 0 \right] = \max \left[f(x, y) - (f \circ B_{i \circ e})(x, y), f(x, y) - f(x, y) \right] = f(x, y) - \min \left[(f \circ B_{i \circ e})(x, y), f(x, y) \right], \quad (8)$$

令 $O_{i \circ e}(x, y) = \min \left[(f \circ B_{i \circ e})(x, y), f(x, y) \right]$, 从而将所提 Top-Hat 变换为

$$N_{\text{Top-Hat}}(x, y) = f(x, y) - O_{i \circ e}(x, y). \quad (9)$$

在形态学中,使用大尺寸的结构元素进行运算可以平滑大面积的区域。因此,若固定膨胀结构元素 $B_{i \circ}$ 的尺寸,则结构元素运算的边缘区域也是固定的,根据膨胀和腐蚀操作取最值的性质,腐蚀结构元素 B_e 尺寸越大,则 $(f \circ B_{i \circ e})(x, y)$ 运算平滑背景的能力越强,抑

制噪声的能力也越强。若 $B_{i \circ} \neq B_e$, $(f \circ B_{i \circ e})(x, y)$ 运算将会改变图像中区域的大小。膨胀操作增大了图像中明亮区域,并随着结构元素尺寸的增大减小了图像中暗区域的大小。此外,腐蚀操作减小了明亮区域的大小,并随着结构元素尺寸的增大增加了暗区域的大小。然后, $(f \circ B_{i \circ e})(x, y)$ 运算将通过 $B_{i \circ}$ 和 B_e 改变明亮区域和暗区域的大小。若 $B_{i \circ} \neq B_e$, 参与运算的图像区域大小的增减是不同的;相反,如果 $B_{i \circ} = B_e$, 则不会改变图像中区域的大小。

提出的改进 Top-Hat 首先通过 $B_{i \circ}$ 将目标区域的像素替换为邻域像素,再通过小于 $B_{i \circ}$ 的结构元素 B_e 进行腐蚀操作,最后通过差分运算输出目标与邻域灰度值的差值,并且 B_e 可以改变计算目标区域的大小。因此,无论目标区域与邻域灰度值的差值有多少,都能输出这个差值,从而提高对红外小目标的检测性能。

3.2 基于局部对比度的自适应 Top-Hat

计算局部对比度之后得到显著图,图中最突出的区域可能是目标。因此,采用自适应阈值分割,得到目标大致的尺寸,阈值 $T^{[11-12]}$ 定义为

$$T = \bar{I}_{in} + k' \times S_{in}, \quad (10)$$

式中: \bar{I}_{in} 和 S_{in} 分别表示输入图像的平均值和标准差; k' 是一个经验常数,为了不遗漏目标,取值较小,本文 k' 为 3~5^[11]。

得到目标的大致尺寸后,自适应设置两个结构元素的大小。膨胀运算结构元素 $B_{i \circ}$ 的半径比最大疑似目标半径长 2 个单位长度,腐蚀运算结构元素 B_e 半径比 $B_{i \circ}$ 中的内置圆形结构元素 B_i 半径短 2 个单位长度,如图 4 所示,实线框代表 B_e ,虚线框代表 $B_{i \circ}$ 。

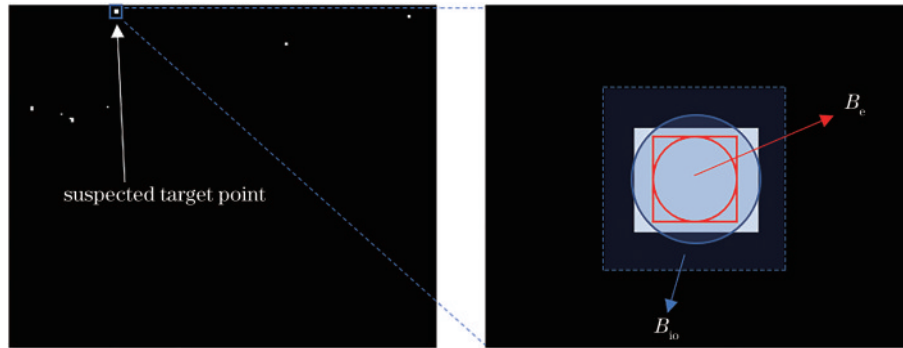


图 4 结构元素尺寸设置示意图

Fig. 4 Schematic of size setting of structural elements

计算局部对比度会提高图像中的明亮区域的灰度值,用计算出的 C_k 替代区域中心像素点的灰度值。由

式(2)可知, $C_k = \frac{L_k^2}{m_k}$, 有

$$C_k - m_k = \frac{L_k^2 - m_k^2}{m_k} \geq 0. \quad (11)$$

所以对于经过计算局部对比度之后生成的显著

图,整体的灰度值相较于原始图像有所提高,特别是明亮区域,此类区域是目标区域的可能性也越大;再经过取最大最小值的膨胀和腐蚀操作,目标区域更加突出。对处理过的图像与原图像进行差分后,结果表明所提 ATHLC 能显著抑制背景和噪声。

为了提高目标对比度,对结果进行一次膨胀操作,所以目标看上去为方形,整体流程如图 5 所示。

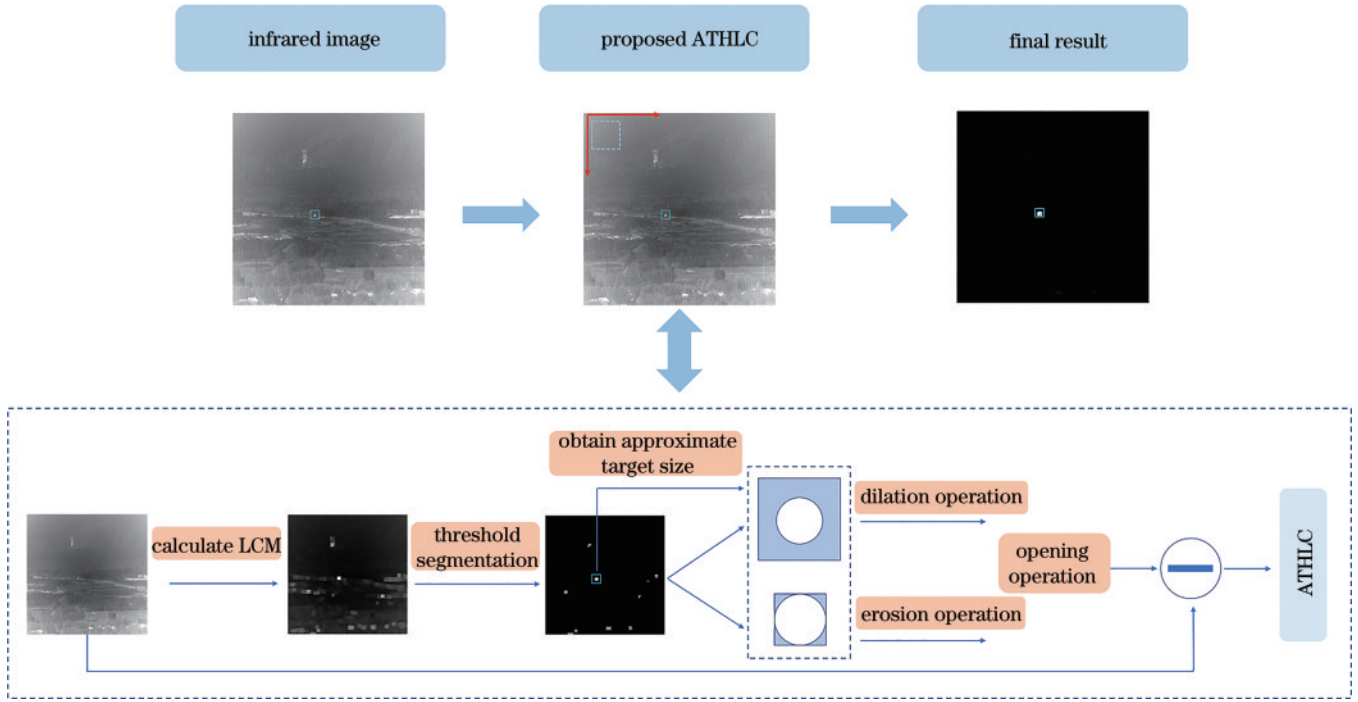


图 5 ATHLC方法整体流程

Fig. 5 Overall process of ATHLC method

4 实验与分析

对红外图像数据进行实验与分析,实验使用的是一台具有 16G 运行内存、Intel (R) Core (TM) i7-11800H@2.30 GHz 的计算机。

4.1 评价指标

实验的评价指标采用的是信杂比增益(SCRG)、背景抑制因子(BSF)^[20]及对比度增益(CG)^[21],具体定义为

$$R_{SCR} = \frac{|\mu_t - \mu_b|}{\sigma_b}, \quad (12)$$

$$R_{SCRG} = \frac{R_{SCR_{out}}}{R_{SCR_{in}}}, \quad (13)$$

$$R_{BSF} = \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{out}}, \quad (14)$$

$$R_{CG} = \frac{|\mu_t - \mu_b|_{out}}{|\mu_t - \mu_b|_{in}}, \quad (15)$$

式中: μ_t 和 μ_b 分别代表目标区域像素平均值和目标周围背景像素平均值; σ_b 代表周围背景区域像素的标准差; σ_{out} 和 σ_{in} 表示输出图像和输入图像中除目标区域外的图像像素标准差。如图6所示,目标尺寸大小为 $a \times b$,局部区域的大小为 $(a + 2d) \times (b + 2d)$,本文中 $d=15$ 。SCR越大,表示小目标越明显,越容易被检测到。BSF越大,表示抑制背景的效果越好。在一些具有较好性能的算法中,会出现SCRG无穷大(Inf)的情况,从定义看,若周围背景被完全剔除,则 σ_b 会出现无限趋于0,从而造成如上的情况。因此引入CG这一评价指标,由于不需要除以周围背景区域像素的标准差,

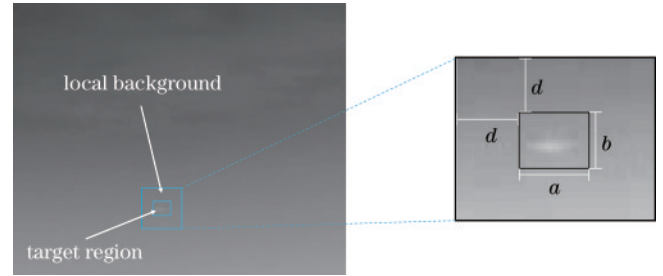


图 6 目标区域示意图

Fig. 6 Schematic of target area

所以避免了上述情况。

此外还采用接受者工作特性曲线(ROC)和精确率-召回率变化曲线(PRC)来检验实验的效果。用真阳性率(TPR)和伪阳性率(FPR)绘制一个序列图像在不同阈值下的ROC曲线,用精确率(precision)和召回率(recall)绘制同一个序列在不同阈值下的PR曲线。它们的定义^[21]分别为

$$R_{TPR} = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}} \times 100\%, \quad (16)$$

$$R_{FPR} = \frac{N_{FP}}{N_{TN} + N_{FP}} \times 100\%, \quad (17)$$

$$R_{precision} = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FP}} \times 100\%, \quad (18)$$

$$R_{recall} = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}} \times 100\%, \quad (19)$$

式中:TP、FN、FP和TN分别代表样本的不同类别。检测结果中,目标为真样本,虚警点为假样本;所有点至目标区域的中心点(GT)的像素距离小于某一阈值为

正样本, 否则为负样本^[22](通常这个阈值为 5, 本文为 3)。在 ROC 曲线和 PR 曲线中, 曲线下面积(AUC)越大, 代表算法性能越好。AUC 可以通过顺序连接的点 $\{(x_1, x_1), (x_2, x_2), (x_3, x_3), \dots, (x_m, x_m)\}$ 来估计, 定义为

$$R_{AUC} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m-1} [(x_{i+1} - x_i) \times (y_i + y_{i+1})] \quad (20)$$

4.2 各阶段实验结果

为了更好地说明所提方法的有效性, 每个阶段的

仿真结果如图 7 所示, 选择了 3 张河流、天空以及城市建筑背景的红外图像^[21]。图 7(a) 表示三种不同背景的原图, 方框表示目标在图中的位置; 图 7(b) 是经过局部对比度计算得到的显著图; 图 7(c) 是经过自适应阈值分割得到的二值图像, 图中有较多类似目标的虚警点, 从中提取目标的大致尺寸; 图 7(d) 和图 7(e) 分别是改进的具有双结构元素的 Top-Hat 中的膨胀和腐蚀操作得到的图像; 图 7(f) 是最终的检测结果, 背景和虚警点基本被剔除。

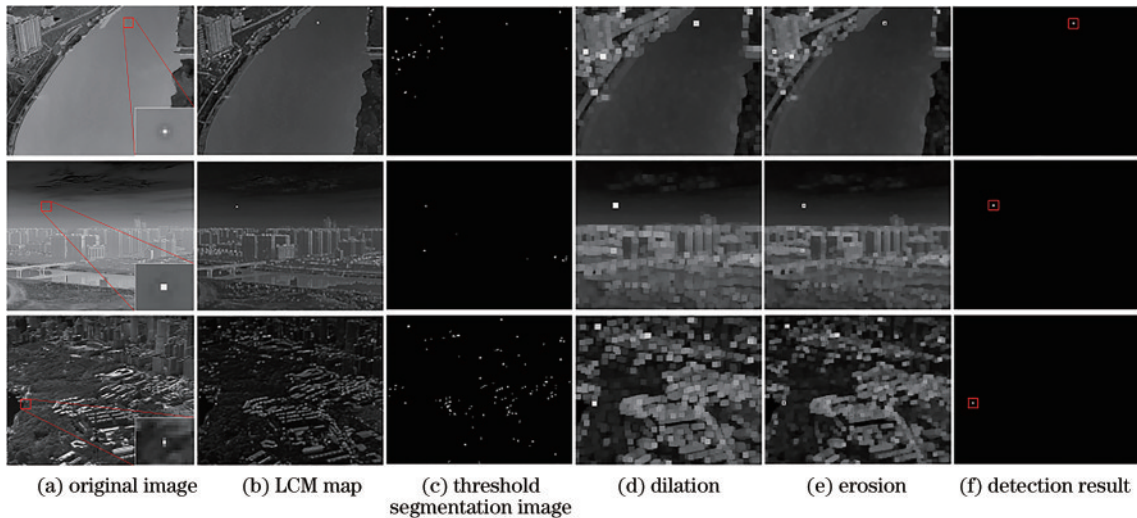


图 7 三种背景各阶段的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of three backgrounds at each stage

4.3 同类方法对比实验

所有实验数据的 6 个红外序列图像^[16,21], 包括复杂云层背景、复杂地面背景以及复杂城市建筑背景, 具体信息如表 1 所示。为了验证所提方法的优越性, 对

经典 Top-Hat^[4]、NWT^[7]、改进的 Top-Hat(PITH)、基于局部对比度的自适应 Top-Hat(ATHLC) 进行对比, 结果如图 8 所示, 对比方法的实验参数如表 2 所示。

表 1 序列图像信息

Table 1 Sequence image information

Sequence No.	Target size	Number of frames	Image size	Average SCR	Image description
Seq1	5×5	30	256×200	0.62	The cloud background, mostly covered by scattered clouds, has a fixed perspective and small targets from left to right.
Seq2	3×3	30	256×256	0.36	The complex ground background, mostly covered by vegetation and mountains, has a sloping dividing line from the moving perspective.
Seq3	3×3	30	256×256	1.46	Complex ground background, partially covered by mountain forest and ground, moving perspective.
Seq4	3×3	30	640×512	0.91	River and building background, the bridge span from top left to bottom right, with a fixed perspective, and the target are from top left to bottom right.
Seq5	1×1	30	640×512	1.08	Sky and architectural background, fixed perspective, target from right to left.
Seq6	3×3	30	640×512	0.26	The sky background, mostly covered by clouds, has a fixed viewing angle and targets from right to left.

图 8(a) 和图 8(b) 分别是原始图像和其灰度值三维表示图, 图 8(c) ~ (f) 分别是 Top-Hat、NWT、PITH 及 ATHLC 处理得到的灰度三维图。从灰度三维图中可以明显看出: PITH 在使用改进的双结构元素进行形态学运算后, 图像的目标区域及其邻域的背

景和杂波大部分被剔除, 相较于 Top-Hat, 具有更好的抑制背景的能力, 但仍然有小部分噪声残留, 与 NWT 相比, 未见明显优势; ATHLC 经过局部对比度计算获得目标感兴趣区域, 自适应设置膨胀操作结构元素 B_{σ} 大于目标, 计算局部对比度能增加目标区域

表 2 对比方法的参数设置

Table 2 Parameter settings of comparison methods

Method	Parameter setting
Top-Hat	Structuring type is disk; structuring element size is 5×5
NWTH	$R_o=9, R_i=4$ for sequences 1-3; $R_o=7, R_i=3$ for sequences 4-6
PITH	$B_o=9, B_i=4, B_e=3$ for sequences 1-3; $B_o=7, B_i=3, B_e=2$ for sequences 4-6
ATHLC	$B_o=11, B_i=5, B_e=4$ for sequences 1-3; $B_o=9, B_i=4, B_e=3$ for sequences 4-6; scale is 3, 5; window size is 3×3 ; $k'=4$

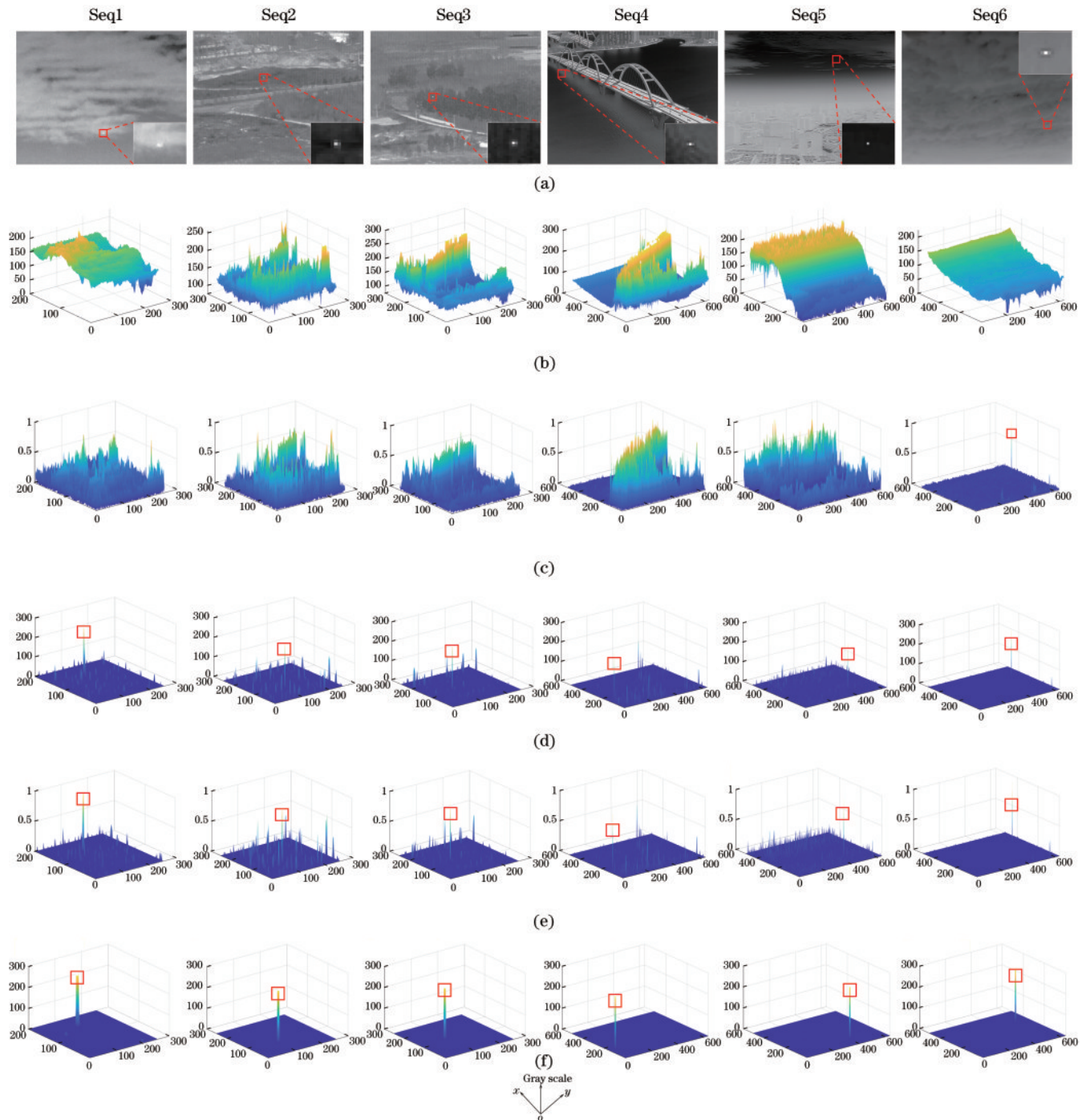


图 8 同类方法实验结果。(a)原始图像;(b)原始图像三维灰度图;(c)Top-Hat;(d)NWTH;(e)PITH;(f)ATHLC

Fig. 8 Experimental results of similar methods. (a) Original images; (b) 3D gray scale images of original image; (c) Top-Hat; (d) NWTH; (e) PITH; (f) ATHLC

的灰度值,同时也增加了背景区域的灰度值,经过开运算处理再与原始图像进行差分运算后,背景得到显著

抑制,通过灰度值三维图可以看出,只残留很小部分的噪声,ATHLC在最后阶段通过一个膨胀运算增大了

目标对比度。此外,为了定量分析,统计了 4 种方法的 SCRG、BSF 以及 CG 的数据,结果如表 3 所示,最优结果用粗体表示。从表 3 可以看出:ATHLC 方法对 6 个序列的 SCRG、BSF 以及 CG 均为最优值;PITH 方法对

4 个序列图像的 SCRG 达 Inf,对 6 个序列的 BSF 优于 NWTH 和 Top-Hat;Top-Hat 的 CG 优于 NWTH 和 PITH。

表 3 同类方法的 SCRG、BSF 及 CG
Table 3 SCRG, BSF, and CG of similar methods

Sequence No.	Top-Hat SCRG/BSF/CG	NWTH SCRG/BSF/CG	PITH SCRG/BSF/CG	ATHLC SCRG/BSF/CG
Seq1	15.66/1.08/8.53	Inf /10.00/4.83	Inf /11.78/4.59	Inf/Inf/16.24
Seq2	16.04/0.88/9.12	345.99/5.66/9.01	434.45/6.76/8.90	Inf/Inf/29.73
Seq3	3.60/1.23/2.32	23.97/10.83/1.97	27.45/12.25/1.95	Inf/Inf/6.78
Seq4	4.16/1.57/1.70	Inf /31.79/1.87	Inf /34.45/1.87	Inf/300.58/9.90
Seq5	5.31/2.99/3.59	Inf /50.40/3.59	Inf /55.09/3.60	Inf/1550.09/19.79
Seq6	179.92/9.46/52.28	Inf /134.77/40.12	Inf /149.33/40.26	Inf/310.57/573.06

4.4 不同类方法对比实验

为了验证所提方法的优越性和鲁棒性,对其与现有 6 种方法进行对比,6 种方法包括 ADMD^[17]、

AADCDD^[16]、HBMLCM^[13]、RLCM^[12]、MPCM^[14]及 PSTNN^[10]。所有方法的实验参数设置如表 4 所示,对比结果如图 9 和图 10 所示。

表 4 不同类方法的参数设置
Table 4 Parameter settings for different classes of methods

Method	Parameter setting
ADMD	Scale is 3, 5, 7, 9; window size is 3×3
AADCDD	Scale is 3, 5, 7, 9; window size is 3×3
HBMLCM	Scale is 3, 5, 7, 9; window size is 15×15
RLCM	Scale is 3; $k_1=2, 5, 9$; $k_2=4, 9, 16$
MPCM	Scale is 3, 5, 7, 9; mean filtering size is 3×3
PSTNN	Patch size is 40×40; sliding step is 40; $\lambda = \frac{1}{\sqrt{\max(m, n)}}$
ATHLC	$B_o=11, B_i=5, B_e=4$ for sequences 1-3; $B_o=9, B_i=4, B_e=3$ for sequences 4-6; scale is 3, 5; window size is 3×3; $k'=4$

图 9 为对比实验结果,为了排版美观,将所有图像设置成相同大小,图 9(a)为原始图像的 6 个序列,方框为目标在图像中的位置。为了更加直观地对比检测性能,对所有方法的检测结果进行灰度值三维化,如图 10 所示。在背景复杂的序列 2 至序列 5 中,由于目标像素在图像中占比小,一些基于灰度值的滤波方法容易出现目标漏检的情况,而且出现大量虚警点,例如 ADMD 以及 AADCDD。基于 HVS 的方法在序列 2 至序列 5 中同样出现了上述情况,HBMLCM 在序列 2、序列 4 及序列 5 中出现了未检测到目标的情况;另一种基于 HVS 的方法 RLCM 在检测性能上表现优异,但是该方法增加了目标对比度,同样也增加了背景的对比度,所以残留了部分噪声。MPCM 处理的 6 个序列图像中残留大量背景杂波。基于矩阵恢复的 PSTNN 算法在具有不规则边界背景的序列 2 和序列 3 图像中残留有部分的背景噪声。在 6 个序列图像中,ATHLC 由于经过局部对比度计算增大了目标的灰度值,再经过取最大值运算的膨胀操作最大程度地提升目标区域的灰度值,然后经过取最小值运算的腐蚀操作弱化目标邻域的背景,与原始图像进行差分运算后,

极大程度地抑制了目标区域外的背景,最后通过膨胀操作,增大了目标的对比度。

此外,为了定量分析各种方法的性能,统计了所有方法的 SCRG、BSF、CG 及运行时间,结果如表 5~8 所示,所有数据均为各方法在 6 个序列图像中的平均值。ATHLC 的 SCRG 在 6 个序列图像中均达 Inf(Inf 表示背景被完全抑制),BSF 同样为最大值;在序列 1 中,基于矩阵恢复的 PSTNN 方法的 BSF 达 Inf;RLCM 方法对序列 1 和序列 3 的 CG 表现最优。在运行时间方面,ADMD 和 HBMLCM 处理最快。

为了进一步进行定量比较,对 ATHLC 与其他方法进行 ROC 曲线和 PR 曲线比较,结果如图 11 和图 12 所示。在 ROC 曲线中,ATHLC 方法除序列 1 外对其余所有序列均表现最好,AUC 值最大,在序列 1 中 AUC 值也仅次于 RLCM 和 HBMLCM 方法。在 PR 曲线中,ATHLC 方法在序列 1 和序列 6 中排第三,在其余四个序列中均为最优。PITH 在 ROC 曲线和 PR 曲线中,对序列 2 至序列 6 的表现均优于同类型形态学方法 NWTH 和 Top-Hat。一些基于灰度值的滤波方法和基于 HVS 的方法都有明显的性能恶

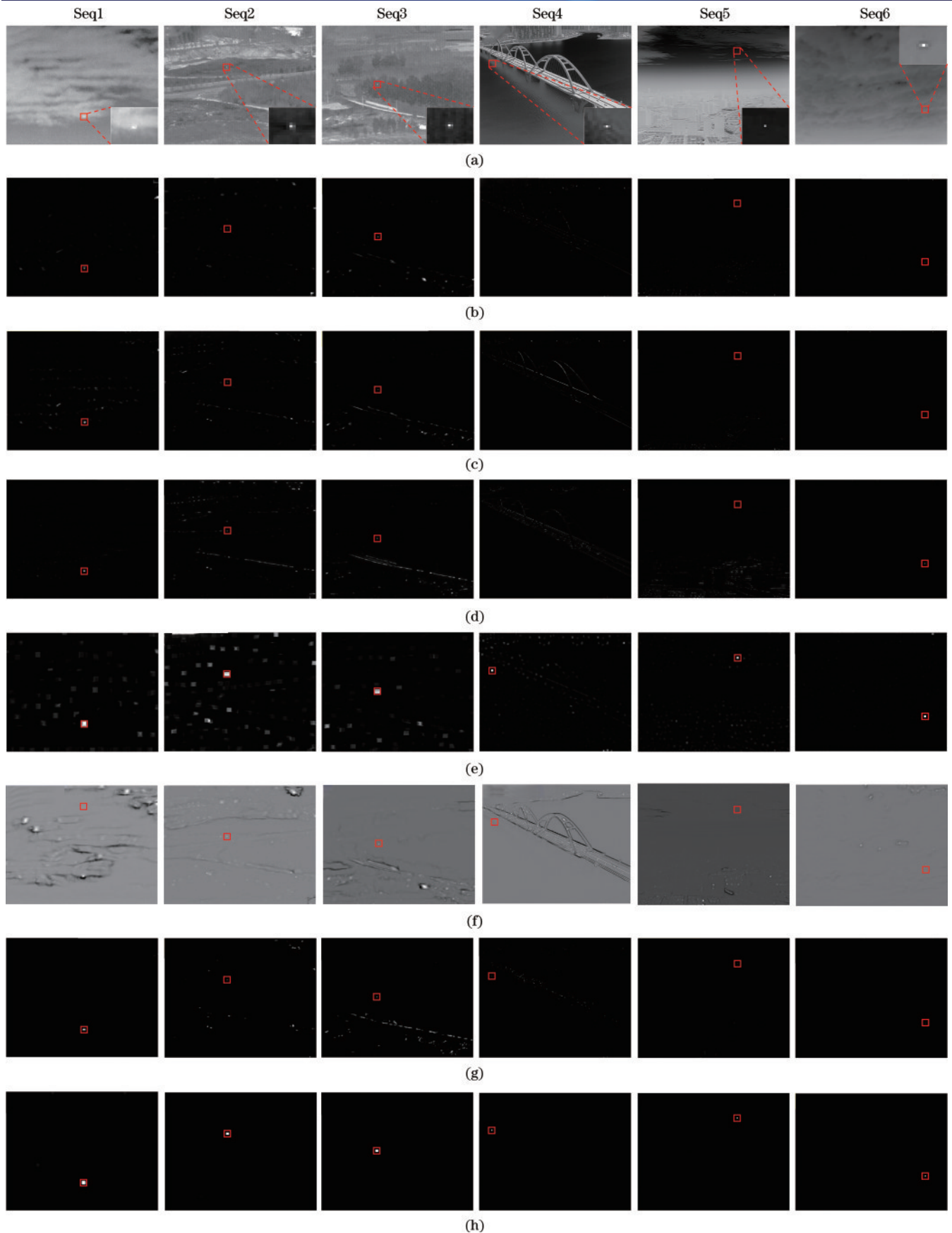


图 9 不同类方法对比示意图。(a)原始图像;(b)ADMD;(c)AADCCD;(d)HBMLCM;(e)RLCM;(f)MPCM;(g)PSTNN;
(h)ATHLC
Fig. 9 Comparison diagrams of different classes of methods. (a) Original images; (b) ADMD; (c) AADCCD; (d) HBMLCM;
(e) RLCM; (f) MPCM; (g) PSTNN; (h) ATHLC

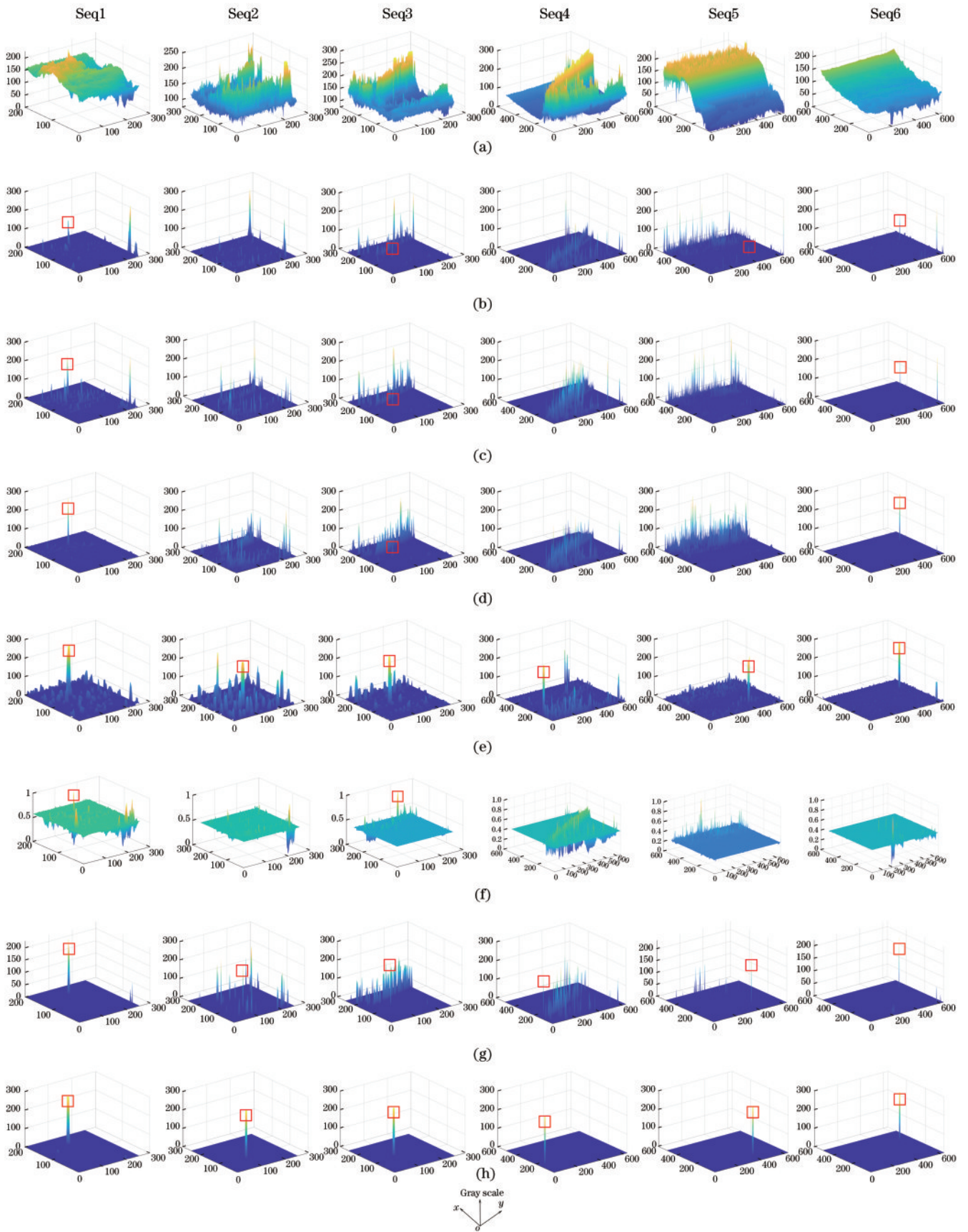


图 10 不同类方法的三维灰度表示图。(a)原始图像；(b)ADMD；(c)AADCCD；(d)HBMLCM；(e)RLCM；(f)MPCM；(g) PSTNN；(h)ATHLC

Fig. 10 Three dimensional gray scale representation of different classes of methods. (a) Original images; (b) ADMD; (c) AADCCD; (d) HBMLCM; (e) RLCM; (f) MPCM; (g) PSTNN; (h) ATHLC

表 5 不同类方法的 SCRG

Table 5 SCRG of different classes of methods

Method	Seq1	Seq2	Seq3	Seq4	Seq5	Seq6
ADMD	224.59	Inf	30.71	Inf	Inf	3816.40
AADCDD	255.53	Inf	59.11	Inf	Inf	Inf
HBMLCM	89.14	120.94	29.66	49.78	82.70	1384.73
RLCM	112.66	48.78	27.98	120.97	Inf	Inf
MPCM	3.35	1.15	1.28	0.17	1.14	34.28
PSTNN	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
ATHLC	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf

表 6 不同类方法的 BSF

Table 6 BSF of different classes of methods

Method	Seq1	Seq2	Seq3	Seq4	Seq5	Seq6
ADMD	15.16	4.53	5.02	13.23	22.03	28.93
AADCDD	9.55	4.91	4.82	7.30	26.88	116.93
HBMLCM	24.31	3.18	3.41	8.15	13.36	107.05
RLCM	4.08	1.73	4.78	7.06	12.78	25.71
MPCM	2.10	3.26	4.04	4.21	18.17	8.07
PSTNN	Inf	4.08	3.35	15.02	33.92	130.54
ATHLC	Inf	Inf	Inf	300.58	1550.09	310.57

表 7 不同类方法的 CG

Table 7 CG of different classes of methods

Method	Seq1	Seq2	Seq3	Seq4	Seq5	Seq6
ADMD	2.63	3.12	2.39	0.67	2.99	182.73
AADCDD	3.71	1.88	1.20	0.19	0.88	36.62
HBMLCM	3.82	5.51	2.62	0.77	2.83	317.84
RLCM	17.86	26.84	9.28	9.60	18.37	231.67
MPCM	2.30	0.67	0.94	0.30	0.78	34.86
PSTNN	6.21	6.43	1.89	1.49	3.07	45.57
ATHLC	16.24	29.73	6.78	9.90	19.79	573.06

表 8 不同类方法的运行时间

Table 8 Running time of different classes of methods unit: s

Method	Seq1	Seq2	Seq3	Seq4	Seq5	Seq6
ADMD	0.0253	0.0152	0.0130	0.0380	0.0370	0.0358
AADCDD	0.0260	0.0271	0.0265	0.0939	0.0940	0.0923
HBMLCM	0.0153	0.0147	0.0131	0.0543	0.0556	0.0470
RLCM	0.9791	1.3668	1.3906	7.1697	7.5835	6.7185
MPCM	0.0335	0.0423	0.0446	0.1742	0.1789	0.1779
PSTNN	0.0423	0.1697	0.1883	0.9150	0.7672	0.5253
ATHLC	0.0242	0.0367	0.0327	0.1331	0.1335	0.1289

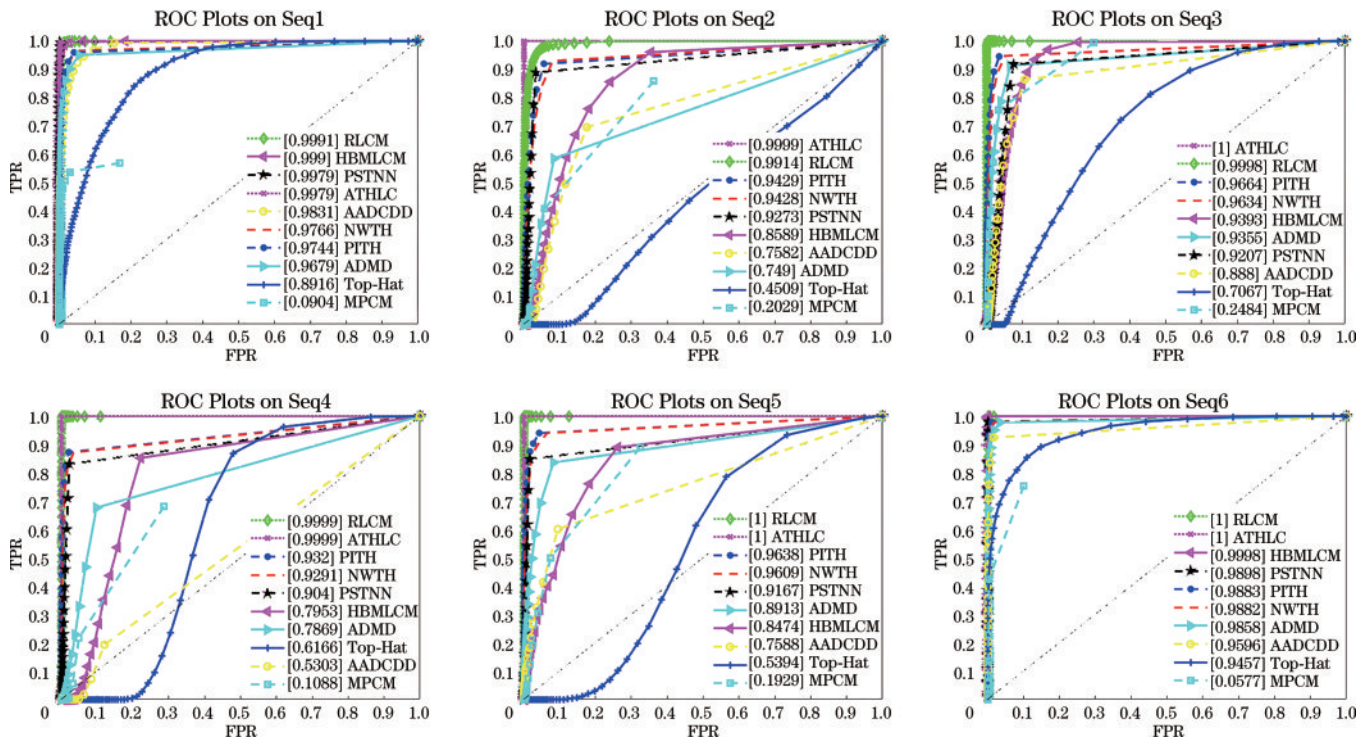


图 11 不同方法的 ROC 曲线
Fig. 11 ROC curves of different methods

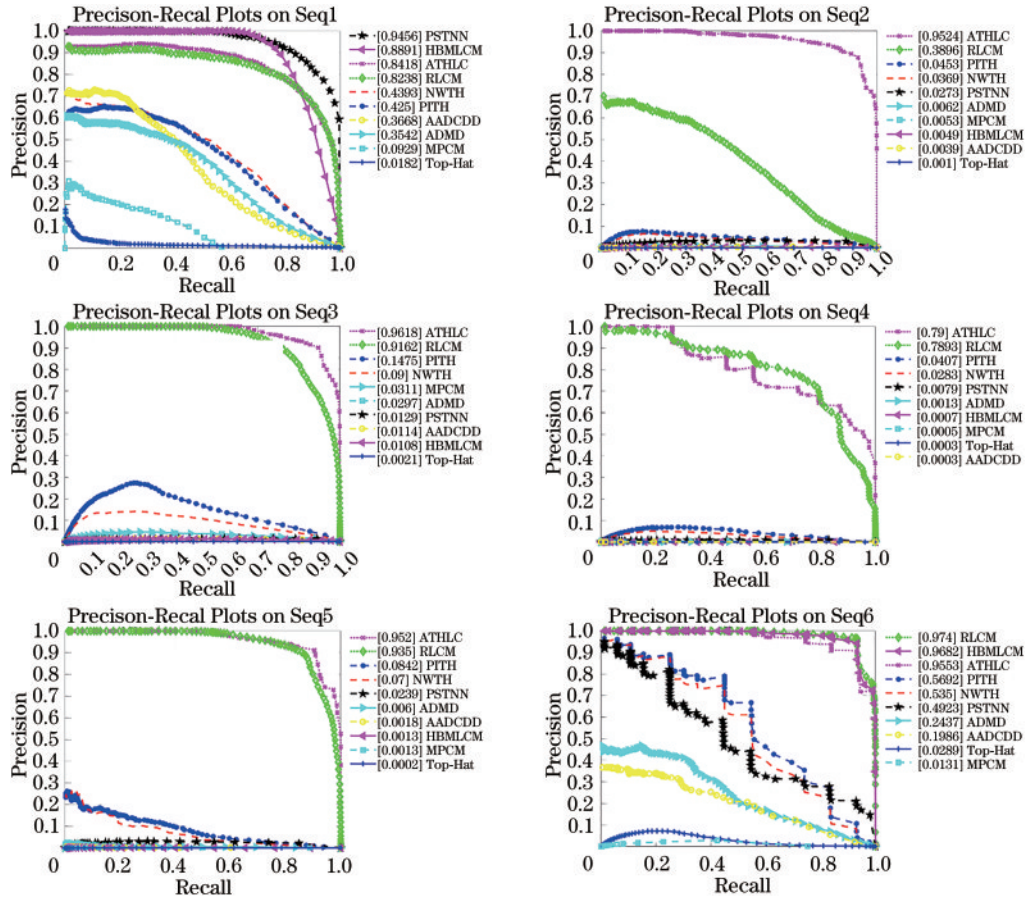


图 12 不同方法的 PR 曲线

Fig. 12 PR curves of different methods

化,尤其是在 PR 曲线中,由于 FP 值较大,精度相应较低,相比之下,ATHLC 虚警率最低,因此精度较高。

5 结 论

经典 Top-Hat 方法抑制复杂背景能力差归结于两个原因:其一是结构元素固定单一,不能自适应抑制背景;其二是不能利用局部特征抑制背景和增强目标。针对该两点不足,提出了两种具有嵌套关系的改进 Top-Hat 红外小目标检测方法。在 6 个背景各异的红外序列图像中对比了具有形态学的同类方法和 6 种不同类的方法。大量的实验结果表明:所提方法在大多数情况下具有最好的 SCRG、BSF 及 CG,并且具有较高的检测精度和较低的虚警率。

参 考 文 献

- [1] Xi T Y, Yuan L H, Sun Q B. A combined approach to infrared small-target detection with the alternating direction method of multipliers and an improved top-hat transformation[J]. *Sensors*, 2022, 22(19): 7327.
- [2] Deshpande S D, Er M H, Venkateswarlu R, et al. Max-Mean and max-Median filters for detection of small targets[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3809: 74-83.
- [3] Gregoris D J, Yu S K W, Tritchew S, et al. Wavelet transform-based filtering for the enhancement of dim

targets in FLIR images[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2242: 573-583.

- [4] Zeng M, Li J, Peng Z. The design of Top-Hat morphological filter and application to infrared target detection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, 48(1): 67-76.
- [5] Chen T, Wu Q H, Rahmani-Torkaman R, et al. A pseudo top-hat mathematical morphological approach to edge detection in dark regions[J]. *Pattern Recognition*, 2002, 35(1): 199-210.
- [6] Bai X Z, Zhou F, Xue B. Infrared dim small target enhancement using toggle contrast operator[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(2/3): 177-182.
- [7] Bai X Z, Zhou F. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection [J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(6): 2145-2156.
- [8] Gao C Q, Meng D Y, Yang Y, 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] Dai Y M, Wu Y Q. Reweighted infrared patch-tensor model with both nonlocal and local priors for single-frame small target detection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(8): 3752-3767.
- [10] Zhang L D, Peng Z M. Infrared small target detection

- based on partial sum of the tensor nuclear norm[J]. Remote Sensing, 2019, 11(4): 382.
- [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, 2014, 52(1): 574-581.
- [12] Han J H, Liang K, Zhou B, 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.
- [13] 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.
- [14] Wei Y T, You X, Li H. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target detection[J]. Pattern Recognition, 2016, 58: 216-226.
- [15] 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.
- [16] Moradi S, Moallem P, Sabahi M F. A false-alarm aware methodology to develop robust and efficient multi-scale infrared small target detection algorithm[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 89: 387-397.
- [17] Moradi S, Moallem P, Sabahi M F. Fast and robust small infrared target detection using absolute directional mean difference algorithm[J]. Signal Processing, 2020, 177: 107727.
- [18] Han J H, Moradi S, Faramarzi I, et al. A local contrast method for infrared small-target detection utilizing a tri-layer window[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(10): 1822-1826.
- [19] Boyer V, Bourdin J J. Auto-adaptive step straight-line algorithm[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2000, 20(5): 67-69.
- [20] Zhang L D, Peng L B, Zhang T F, et al. Infrared small target detection via non-convex rank approximation minimization joint $l_{2,1}$ norm[J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1821.
- [21] Xu L, Wei Y, Zhang H, et al. Robust and fast infrared small target detection based on Pareto frontier optimization[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 123: 104192.
- [22] Deng H, Sun X, Liu M, et al. Entropy-based window selection for detecting dim and small infrared targets[J]. Pattern Recognition, 2017, 61: 66-77.