

基于全方位形态学滤波和局部特征准则的点目标检测

刘 让^{1,2}, 王德江^{1*}, 贾 平¹, 车 鑫^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 对复杂背景下暗弱点目标和背景杂波特性进行了分析, 提出了一种基于全方位多尺度的形态学滤波和局部特征准则的点目标检测方法。实验结果表明, 在复杂背景和低信噪比条件下, 所提算法的目标检测概率达到 99.8%, 虚警率为 0.1%。与最大中值滤波法、高斯差分尺度空间法、高斯混合模型法进行对比, 结果表明, 所提算法对复杂背景的抑制作用较好, 且算法复杂度不高, 易于实时实现。

关键词 探测器; 遥感; 暗弱点目标检测; 全方位多尺度形态学; 局部特征准则; 能量集中度

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1104001

Point Target Detection Based on Omnidirectional Morphology Filtering and Local Characteristic Criterion

Liu Rang^{1,2}, Wang Dejiang¹, Jia Ping¹, Che Xin^{1,2}

¹ Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The characteristics of dim point target and background clutter under a complex background are analyzed. A point target detection method based on the omnidirectional multiscale morphology filtering and local characteristic criterion is proposed. The experimental results show that, under the conditions of a complex background and a low signal-to-noise ratio, the detection probability of the proposed method reaches 99.8% with a false alarm probability of 0.1%. The results indicate that, when compared with the methods of Max-median filter, difference of Gaussian scale-space, and Gaussian mixture model, the proposed method possesses a better performance to suppress the complex background, and simultaneously a low complexity and an easy real-time implementation.

Key words detectors; remote sensing; dim point target detection; omnidirectional multiscale morphology; local characteristic criterion; energy concentration degree

OCIS codes 040.3060; 040.1880; 070.4340; 100.2000

1 引 言

红外暗弱点目标检测技术对于红外预警、精确制导等领域的发展具有重要的意义。作用距离是衡量预警系统优劣的重要指标之一, 远距离点目标的尺寸小到没有任何纹理信息可以利用, 而且成像过程中受到极端天气、大气辐射、复杂云层, 以及各种噪声等因素的影响时, 目标极易被淹没在复杂背景中^[1-3]。因此, 复杂

收稿日期: 2017-06-21; 收到修改稿日期: 2017-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(61675202)、吉林省重大科技攻关专项(11ZDGG001)

作者简介: 刘 让(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事红外探测技术和图像处理方面的研究。

E-mail: liurang14@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 贾 平(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学动态成像控制和图像处理技术方面的研究。

E-mail: jiap@ciomp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: wangdj04@ciomp.ac.cn

背景下的暗弱点目标检测已经成为当今亟待解决的研究难题之一。

国内外学者对暗弱点目标检测展开了大量的研究。彭嘉雄等^[4]利用点目标在局部邻域内呈现高频分布的特点,采用空域高通滤波法抑制平缓背景,虽然该算法复杂度不大,但虚警率较大。李欣等^[5]针对红外云层的特点,提出一种使用模糊聚类法判别图像的类别以实现弱小目标的检测方法。王刚等^[6]对红外图像小目标与背景的特性进行了分析,提出一种基于图像块邻域对比特性的红外弱小目标检测算法,该方法可用于有效检测低信噪比条件下的红外弱小目标。Kim 等^[7]提出了一种拉普拉斯-高斯尺度空间的红外小目标检测方法,但计算复杂度较大,不利于实时实现。吴一全等^[8]提出了一种基于 NSCT 的红外小目标检测方法,通过对高频子带求距离像来检测小目标,但该方法不能准确定位目标所在位置。Genin 等^[9]提出了一种背景块匹配三维模型的目标检测算法,此法对背景抑制作用很好,但是算法复杂,不利于实时实现。除此之外,还有最大中值滤波器方法^[10]、二维最小均方滤波器算法^[11]、小波变换法^[12]等。很多算法在抑制背景的同时,还造成目标信息的丢失。有些算法在预测背景过程中,不仅突出了目标,有时也保留了大量的背景高频像素点和孤立噪声,造成较高的虚警率。

近年来,学者们提出采用形态学顶帽算法检测点目标。形态学滤波算法对背景抑制的效果取决于结构元素的尺寸与形状,当无法获得暗弱点目标图像的先验知识时,该算法难以获得最佳效果^[13-14]。结构元素在形态学运算中的作用类似于滤波窗口,它的选取至关重要。传统的顶帽算法只采用一种结构元素,忽略了不同方向的点目标细节差异,可能产生较大的漏检概率;同时,也不能分辨灰度分布的方向性,很可能会产生连续分布的背景边缘残余,造成较高的虚警率。柴玉华等^[15]提出了一种基于多尺度形态学的滤波算法,用于减少噪声影响从而提高大豆图像质量。后来研究人员针对微地震监测数据信噪比低、震源强度小等特点,提出将多尺度形态学理论应用于地震弱信号的分析 and 识别^[16]。而点目标在红外图像中不会超过 3×3 个像元,同时信噪比和强度很低,极易与噪声造成混淆。

本文提出了一种基于全方位多尺度的形态学滤波和局部对比特征准则的点目标检测方法。首先采用 8 个方向 5×5 维度的结构元素来提取具有不同灰度分布的候选目标,然后自适应阈值处理得到目标感兴趣区域,接下来采用局部对比特征准则剔除残余背景边缘点,最后利用能量集中度特征准则阈值剔除噪声点,检测出低信噪比运动点目标。实验结果表明,所提检测算法对复杂背景抑制作用较好,同时算法运行时间短,满足实时性要求。

2 暗弱点目标图像特征分析

红外暗弱点目标图像通常可认为是由目标、背景和噪声三部分组成,即

$$P(x, y) = B(x, y) + T(x, y) + N(x, y), \quad (1)$$

式中 $B(x, y)$ 、 $T(x, y)$ 和 $N(x, y)$ 分别表示背景、目标和噪声信息; (x, y) 表示像素点坐标。

随着红外目标距离观测系统越来越远,目标在成像系统像面上逐渐缩为一个点,最终受限于光学系统的点扩散函数而无法探测。对于红外暗弱点目标探测,成像焦平面中点目标的信噪比是影响检测性能的重要因素之一^[14],定义为

$$R_{SN} = \frac{|\bar{\mu}_t - \bar{\mu}_b|}{\sigma_b}, \quad (2)$$

式中 $\bar{\mu}_t$ 为目标区域灰度均值, $\bar{\mu}_b$ 为局部背景区域的灰度均值, σ_b 为局部背景区域的标准差, R_{SN} 为计算得到的点目标信噪比。

暗弱点目标在运动过程中,其成像尺寸在 1×1 到 3×3 个像元之间变化,而且其形态信息随着目标相对成像系统的距离、姿态角、速度的变化而改变。同时,目标成像在像面不同位置时,目标在焦平面上的形态分布也不一样。图 1 所示是由法国 Sofradir 公司的制冷型长波红外探测器采集到的几种典型的飞机点目标形态分布情况,截取的窗口尺寸为 5×5 个像元,灰度值已进行归一化处理。远距离飞行中的飞机在探测器上所成的像占 1 个像元的情况极少,更多时候会扩散成水平或者垂直方向的 2 个像元,或者 2×2 、 3×3 个像元,这些点目标的信噪比在 0.5~4 之间。在实际成像过程中,点目标能量发生扩散的原因是:远距离成像时

光学系统会产生衍射效应,点目标中心像元的能量扩散到邻近像元,弥散成为艾里斑。而且点目标机动性较强,且在大气传输过程中还会受到大气散射、折射等的影响。因此,点目标的灰度分布存在波动,并且不一定是各向同性的,采用单一尺度的滤波模板容易发生漏检。

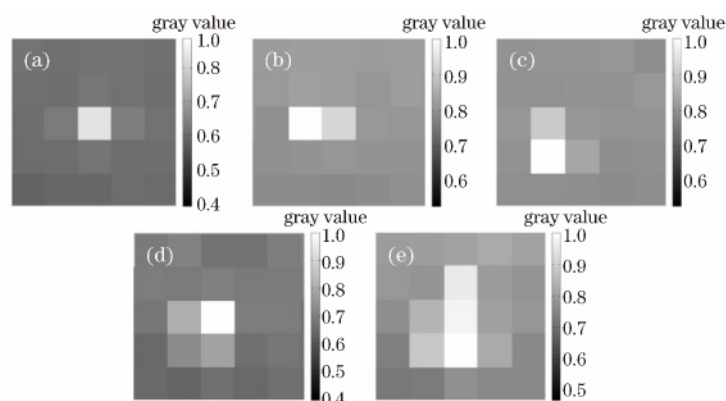


图 1 占(a) 1 个像元,(b) 2 个像元,(c) 3 个像元,(d) 4 个像元和(e) 多个像元的点目标形态

Fig. 1 Morphologies of point targets with (a) one pixel, (b) two pixels, (c) three pixels, (d) four pixels, and (e) multiple pixels

红外图像的背景是指图像中的非目标区域,大部分背景是图像中的低频成分,比如云层、山、海面 and 建筑物等,多以大面积连续分布状态呈现,内部变化比较平缓,这些低频背景在红外图像空间上的分布具有较大的相关性^[17],常用的背景抑制算法就可以将其剔除。但是,复杂背景中也包含部分高频成分,主要分布在背景的边缘和纹理部分,图 2(a)所示为采集到的红外图像复杂云层背景,图 2(b)所示为被红框圈出的背景边缘的放大图,图 2(c)所示为其对应的三维灰度显示,背景边缘放大图中可以看到高频背景边缘,这些边缘点会干扰对暗弱点目标的有效探测。但是,背景边缘的灰度分布在不同方向上存在差异。

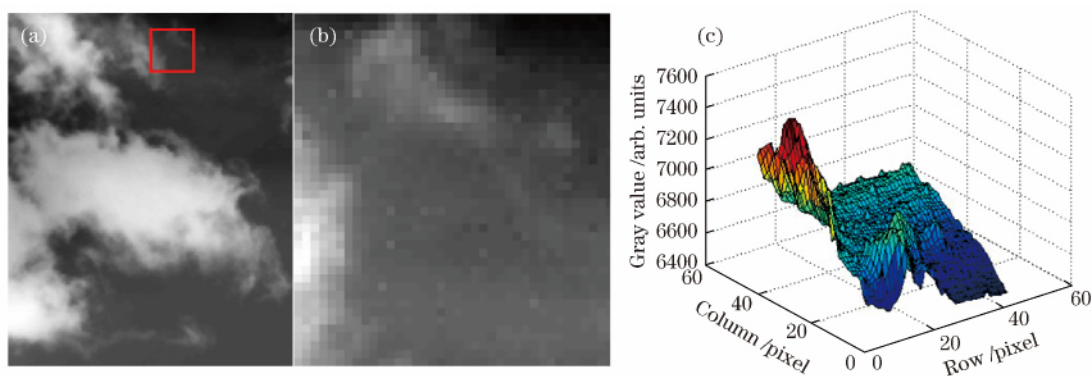


图 2 (a)复杂云层背景;(b)云层背景边缘放大图;(c)对应图 2(b)的三维灰度图

Fig. 2 (a) Complex cloud background; (b) enlarged view of cloud background edge; (c) three-dimensional grey-scale map corresponding to Fig. 2(b)

红外图像的噪声可分成两大类:一类是由外界事物产生的系统外噪声;另一类是由红外热成像系统内部产生的系统内噪声^[18-19]。整体噪声可近似为零均值的高斯白噪声,如图 2(b)所示,这些孤立的白噪声很可能被误认为是点目标。噪声通常只占一个像元,随机闪烁或者位置固定不变,并且在局部小邻域内,其能量集中情况与发生扩散的点目标的有差异,可根据这一点将孤立噪声剔除。

3 全方位多尺度形态学检测

要开展对红外点目标的有效探测,首先最重要的就是对图像进行背景杂波抑制,有效提取出点目标的感兴趣区域。形态学滤波是由灰度形态学滤波演化成的一种有效的图像预处理方法,其基本思想是利用具有一定形态的结构元素,提取图像中对应的形态以实现目标的识别。形态学滤波中的开运算能够去掉图像

中小于结构元素的孤立子域,闭运算可以将两个距离近的区域连接起来。设 $G(x, y)$ 为输入的原始图像, $b(s, t)$ 是结构元素, s, t 为结构元素的尺寸参量, $\oplus$ 表示膨胀运算, $\ominus$ 表示腐蚀运算, 则开运算和闭运算的计算方法为

$$(G \circ b)(x, y) = [G(x, y) \ominus b(s, t)] \oplus b(s, t), \quad (3)$$

$$(G \bullet b)(x, y) = [G(x, y) \oplus b(s, t)] \ominus b(s, t), \quad (4)$$

式中 $\circ$ 表示开运算, $\bullet$ 表示闭运算。采用大于目标大小的结构元素对图像进行开运算, 从而获得图像背景, 再将原图像与背景进行差分运算以实现背景抑制, 这就是顶帽 (TH) 变换。底帽 (BH) 变换是将图像的闭运算结果与原始图像相减, 在抑制背景的同时能提取图像的暗细节特征。TH 变换和 BH 变换定义为

$$I_{TH} = G(x, y) - (G \circ b)(x, y), \quad (5)$$

$$I_{BH} = (G \bullet b)(x, y) - G(x, y), \quad (6)$$

式中 I_{TH} 为 TH 变换在图像中提取的细节特征, I_{BH} 为 BH 变换在图像中提取的细节特征。原始图像基础上加上顶帽变换结果, 再减去底帽变换结果, 这种处理方法不仅可以抑制背景, 同时能增强亮的目标感兴趣区域。提取出的目标感兴趣区域大小 R_1 可以表示为

$$R_1 = G + I_{TH} - I_{BH}. \quad (7)$$

传统的顶帽变换法仅采用单一结构元素对红外图像进行背景估计, 结构元素的选取受目标形态的影响较大, 点目标在运动过程中由于远距离成像而发生光学衍射, 导致目标在很多时候很难保证只占 1 个像元, 目标成像尺寸在 1×1 到 3×3 个像元之间变化, 若只采用一个结构元素, 忽略不同方向的点目标细节差异, 往往不能产生较好的效果。本文采用一种全方位多尺度结构元素, 使结构元素尽可能多的覆盖各个方向分布的点目标, 能够提取出不同尺度的点目标。多尺度 TH、BH 变换定义为

$$I_{THn} = G(x, y) - (G \circ b_n)(x, y), \quad (8)$$

$$I_{BHn} = (G \bullet b_n)(x, y) - G(x, y), \quad (9)$$

式中 I_{THn} 为多尺度 TH 变换在图像中提取的细节特征, I_{BHn} 为多尺度 BH 变换在图像中提取的细节特征, $n = 1, 2, \dots, N$ 为整数, b_n 表示不同的结构元素。

采用全方位多尺度的结构元素提取不同灰度分布的点目标, 不仅能提取只占 1 个像元的点目标, 还能够提取出水平、垂直、对角线等 8 个方向分布的点目标, 由于点目标尺寸在 3×3 个像元内, 为了使结构元素覆盖所有的点目标, 所选取的结构元素的尺寸应略大于 3×3 , 本文设计的结构元素为 5×5 维 $b_n (n = 1, 2, \dots, 8)$, 如图 3 所示。

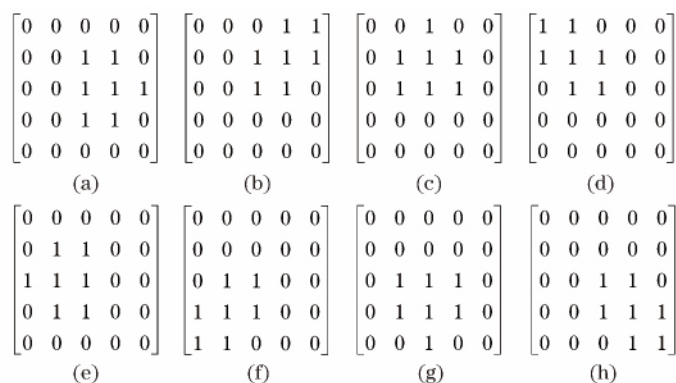


图 3 8 方向结构元素。(a) 0° ; (b) 45° ; (c) 90° ; (d) 135° ; (e) 180° ; (f) 225° ; (g) 270° ; (h) 315°

Fig. 3 Structural elements in eight-directions. (a) 0° ; (b) 45° ; (c) 90° ; (d) 135° ;

(e) 180° ; (f) 225° ; (g) 270° ; (h) 315°

结构元素中的“1”表示此位置进行了形态学膨胀或腐蚀操作。对于每一个结构元素, “1”的形态分布所指的方向代表待检测点目标的分布方向。设计的 8 个结构元素几乎覆盖了所有点目标的形态走向。对于每一种方向的结构元素, 多尺度 TH 变换和 BH 变换不仅能够提取出形态分布与结构元素相同的候选目标, 还能提取出尺度略小于结构元素的候选目标, 避免产生漏检。同时, 对于连续分布的背景区域残余能够起到较

好的抑制作用。以 0° 方向的结构元素为例,它能够检测出的主要候选点形态如图 4 所示。



图 4 0° 方向的结构元素能够检测出的候选点形态

Fig. 4 Candidate point configuration detected by 0° -direction structural element

对于每一种结构元素 b_n ,提取出的各个方向亮的目标感兴趣区域可以表示为

$$\begin{cases} I_{TH1} = G(x, y) - (G \circ b_1)(x, y) \\ I_{TH2} = G(x, y) - (G \circ b_2)(x, y) \\ \vdots \\ I_{TH8} = G(x, y) - (G \circ b_8)(x, y) \end{cases} \quad (10)$$

同时,提取出的各个方向暗的目标感兴趣区域表示为

$$\begin{cases} I_{BH1} = (G \bullet b_1)(x, y) - G(x, y) \\ I_{BH2} = (G \bullet b_2)(x, y) - G(x, y) \\ \vdots \\ I_{BH8} = (G \bullet b_8)(x, y) - G(x, y) \end{cases} \quad (11)$$

在结构元素 b_n 所对应方向下的目标感兴趣区域 R_{ln} ($n=1, 2, \dots, 8$) 定义为

$$R_{ln} = G + I_{THn} - I_{BHn} \quad (12)$$

将提取到的所有方位的点目标感兴趣区域组合在在一起,得到疑似的不同灰度分布的点目标结果图像,即

$$R_1 = |R_{11} + R_{12} + \dots + R_{18}| \quad (13)$$

图 5(a)所示为原始红外目标图像,点目标大约占 2 个像元,并用红框标记出,背景云层较为复杂。图 5(b)所示为单一结构元素的 TH 变换检测结果,可见较多背景边缘点残余,点目标淹没在其中无法辨认。图 5(c)所示为全方位结构元素形态学检测结果,大部分连续、无方向差异性分布的背景已经被剔除,检测出的目标感兴趣区域数量较少,对下一步剔除干扰点十分有利。

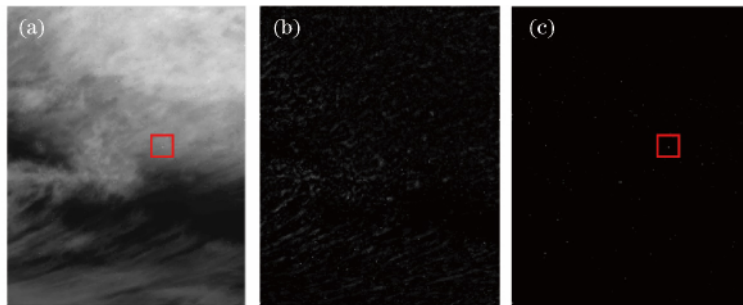


图 5 检测结果对比。(a)原始红外图像;(b)TH 变换检测结果;(c)全方位形态学检测结果

Fig. 5 Comparison among detection results. (a) Original infrared image; (b) detection result by TH transformation; (c) detection result by omnidirectional morphology

采用自适应阈值处理上述全方位点目标感兴趣区域,得到候选点目标,阈值 T_h 满足恒虚警率准则,即

$$T_h = m + k\sigma, \quad (14)$$

式中 m 为图像的灰度均值; σ 为图像标准差; k 为固定常数,可近似认为其为检测的信噪比阈值。为了使检测点目标的信噪比在 1.5 左右,令 $k=1.5$ 。进行二值化处理,即保留像素值大于阈值 T_h 的图像并将其确定为候选目标点,剔除小于阈值的图像。经过自适应阈值处理后,候选目标得到凸显。点目标图像背景杂波的复

杂度不同,则图像灰度均值 m 和标准差 σ 不同,因此计算得到的阈值 T_b 随着背景杂波的变化而变化,具有自适应性。

4 虚假点的剔除

4.1 利用局部特征准则剔除残余背景点

在上述利用全方位多尺度形态学处理得到的候选目标图像中,可能还会存在残留的强起伏背景边缘点和孤立噪点,首先采用局部对比特征将高频背景点剔除。

将候选目标点定位返回到原始图像中,假设其中一个候选目标点为 $I(i, j)$,其中 i, j 表示目标点的坐标。在原始图像上以该点为中心的 5×5 邻域窗口中,定义 4 个方向向量 $L_m (m=1, 2, 3, 4)$:

$$\begin{cases} L_1 = [I(i-2, j-2), I(i-1, j-1), I(i+1, j+1), I(i+2, j+2)] \\ L_2 = [I(i, j-2), I(i, j-1), I(i, j+1), I(i, j+2)] \\ L_3 = [I(i+2, j-2), I(i+1, j-1), I(i-1, j+1), I(i-2, j+2)] \\ L_4 = [I(i-2, j), I(i-1, j), I(i+1, j), I(i+2, j)] \end{cases} \quad (15)$$

每个方向向量包含候选目标点两侧的 4 个点,接下来用这 4 个方向向量的关系区分点目标和残余背景边缘点, 5×5 邻域窗口方向向量示意图如图 6 所示。

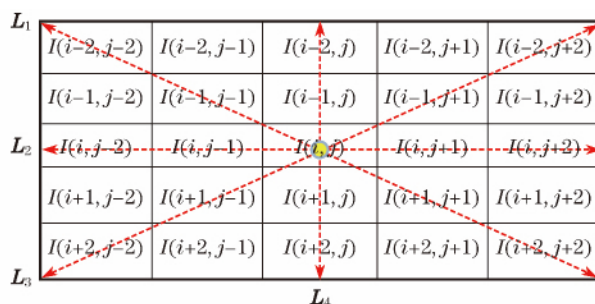


图 6 候选点的 4 个方向向量示意图

Fig. 6 Sketch map of four directional vectors of candidate points

然后计算每个方向向量 L_m 中 4 个点与中心点的灰度差异值之和:

$$d_{i,j}^{(m)} = \sum_{(x,y) \in L_m} w_{x,y} |I(i+x, j+y) - I(i, j)|, \quad (16)$$

式中 $w_{x,y}$ 为方向向量上的点 $I(i+x, j+y)$ 相对中心点 $I(i, j)$ 的加权系数, $x, y \in [-2, 2]$ 。根据已有先验知识,距离中心点越近的点,其灰度值跟中心点越接近,因此赋予较近的点较大的权值。作为中心点 $I(i, j)$ 的最近的 4 个点 $I(i \pm 1, j)$ 和 $I(i, j \pm 1)$,赋予其最大的权值 $5/2$ 。对于 4 个次邻近的点 $I(i \pm 1, j \pm 1)$,令它们的加权系数值为 2。以此类推,赋予 5×5 邻域窗口内距离中心点最远的 4 个点 $I(i \pm 2, j \pm 2)$ 的加权系数值为 1。为了处理方便,将 4 个方向向量 L_m 依次竖直排列组合成列矩阵 L ,按照上述法则,矩阵中每一点对应的加权系数构成矩阵 W ,即

$$L = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$W = \frac{1}{28} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 1 \\ 3 & 5 & 5 & 3 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 1 \\ 3 & 5 & 5 & 3 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

定义每一个候选点方向向量的灰度差异值之和 $d_{i,j}^{(m)}$ 的最大值与最小值的比值称为该候选点的方向比率,即

$$r_d = \frac{\max[d_{i,j}^{(m)}]}{\min[d_{i,j}^{(m)}]}, 1 \leq m \leq 4, \quad (19)$$

通过(19)式可以识别候选点中包含的残余背景边缘点。对 r_d 值分两种情况进行讨论:1) 如果候选点是背景边缘点,则 r_d 值会很大;2) 如果候选点是真实点目标,则 r_d 值比较小,并且在 1 左右。

因此,可以通过设定 r_d 阈值来区分候选点中的背景边缘点和真实点目标,阈值稍微大于 1 即可,本文设定为 2。具体判决准则为: r_d 值大于 2 的候选点,认为是残余背景边缘点,进行舍弃;保留小于 2 的候选点进行下一步处理。保留下来的点中还可能存在点噪声,而点噪声位置固定不变或无序闪烁。

4.2 利用能量集中度特征去噪点

要检测的点目标尺寸不超过 3×3 个像元,假设点目标的能量分布区域为 $E_1 \sim E_9$, 其中能量最大值为 $E_{\max}$, 点目标的能量集中度定义为:

$$C_E = E_{\max} / \sum_{v=1}^9 E_v, \quad (20)$$

点目标成像在焦平面的位置可能在像元正中心,也可能横跨两个像元,甚至 4 个像元,故点目标的能量集中度不同。图 7 所示为点目标跨像元情况。当点目标正好成像在 1 个像元内时,能量集中度最大,成像结果如图 8(a)所示。当点目标成像在 4 个像元的十字相交角时,目标所在位置的能量集中度最低,成像结果如图 8(b)所示。残留的噪声一般只占 1 个像元,如图 8(c)所示,噪声所在像元的能量高度集中,无扩散效应,能量集中度大约为 1。

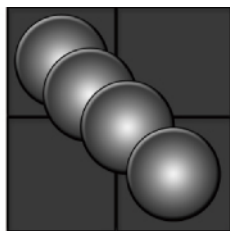


图 7 跨像元点目标的示意图

Fig. 7 Schematic of cross-pixel point target

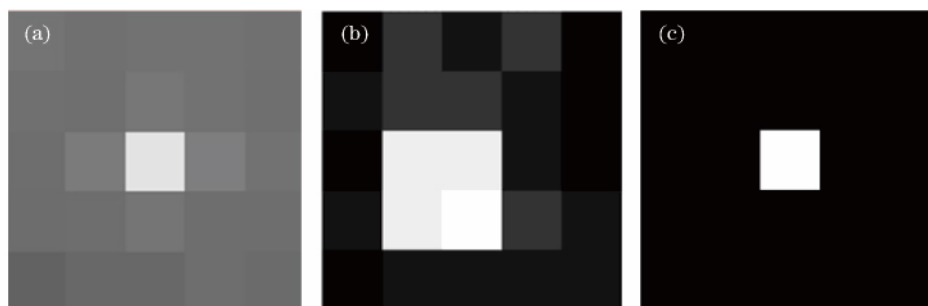


图 8 (a)成像在像元中心的点目标,(b)跨 4 像元的点目标和(c)噪点的灰度图

Fig. 8 Gray level images of (a) point target imaging at pixel center, (b) point target across 4 pixels, and (c) noisy point

在衍射图样中,成像艾里斑直径 d 可以表示为

$$d = 2.44\lambda f, \quad (21)$$

式中 f 为光学系统的 F 数, λ 为入射光波长。对于常见的长波红外探测器,像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$, 假设成像系统的焦距为 300 mm , 口径为 200 mm , 入射波长为 $9 \mu\text{m}$, 则点目标的弥散艾里斑大小为 $32.9 \mu\text{m}$, 略大于探测器 1 个像元尺寸。但是,远距离成像点目标能量会受到各种各样的杂波干扰,导致点目标能量被

消耗。由光学理论可知,艾里斑的能量占总能量的 84%^[20],假设点目标成像在像元中心,能量集中度理论上略小于 84%。

在红外图像中,目标所在区域的灰度值包含杂波背景的能量,在计算点目标能量时应将这部分背景能量去掉,点目标的能量集中度 C_E 的表达式为

$$C_E = \frac{\mu_{t\max} - \bar{\mu}_b}{\sum_t |\mu_t - \bar{\mu}_b|}, \quad (22)$$

式中 $\mu_{t\max}$ 为点目标扩散区域中的最大灰度值, μ_t 为点目标所在区域灰度值, $\bar{\mu}_b$ 为局部背景区域灰度均值, t 表示点目标区域。

捕获的飞机点目标的能量集中度如图 9 所示,在 500 帧序列中,点目标能量集中度在 0.21~0.82 范围变化,而孤立噪点的能量集中度大约为 1。因此,可以设定一定的能量集中度阈值,将点目标与噪点分开。阈值稍微大于 0.82 即可,为了避免产生漏检,设定阈值为 0.85,即能量集中度大于 0.85 的候选点认为是噪点,进行剔除。

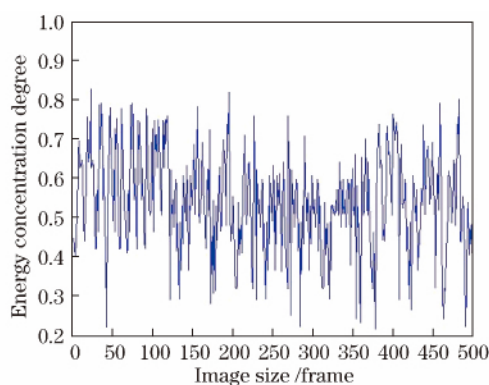


图 9 点目标能量集中度

Fig. 9 Energy concentration degree of point targets

5 实验与结果分析

5.1 点目标采集装置

为了获取真实可靠的图像资源,在实验室搭建了图 10 所示的长波红外焦平面探测装置,以捕获从长春龙嘉国际机场飞来的客机目标。具体探测器参数指标见表 1。整个红外探测器放置于通过以太网连接到电脑的转动基座上,基座的速度和加速度均动态可调,捕获目标时采取探测器水平圈扫的方式。

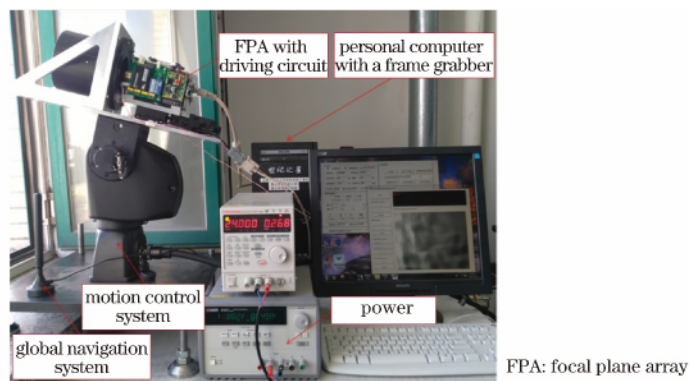


图 10 图像采集装置

Fig. 10 Image acquisition equipment

表 1 红外焦平面探测器参数

Table 1 Parameters of infrared focal plane detector

Parameter	Content
Wavelength / μm	7.7-11.3
Resolution / (pixel $\times$ pixel)	320 $\times$ 256
Pixel size / μm	30
Output digits	14
Frame frequency / Hz	100
Noise equivalent temperature difference / mK	19
Field of view / [$^{\circ}$] $\times$ [$^{\circ}$]	14.40 $\times$ 11.54

5.2 所提算法效果分析

使用图 10 所示的采集装置捕获点目标图像序列。图 11(a)、(b)所示为采集到的常见的以复杂云层和建筑物为背景的暗弱点目标图像。图 11(c)所示为含有多目标的天空背景红外图像,肉眼很难看到点目标,而且存在很多杂波干扰。采用提出的算法进行处理,经过全方位多尺度形态学变换及自适应阈值得到的结果图像如图 11(d)~(f)所示,红色框标记的为检测出的候选点,结合原图发现,这些候选点包括一些残留的高频背景边缘点和随机噪声。然后采用局部对比特征准则剔除高频背景虚假点,如图 11(g)~(i)所示,发现几乎所有的残余背景边缘点已经剔除,每帧结果图像剩余 8 个左右的点,如图中红框所示。根据能量集中度阈值剔除噪声,检测出图 11(j)~(l)所示的点目标,其中图 11(j)、(k)各检测出 1 个点目标,图 11(l)检测出 3 个点目标。

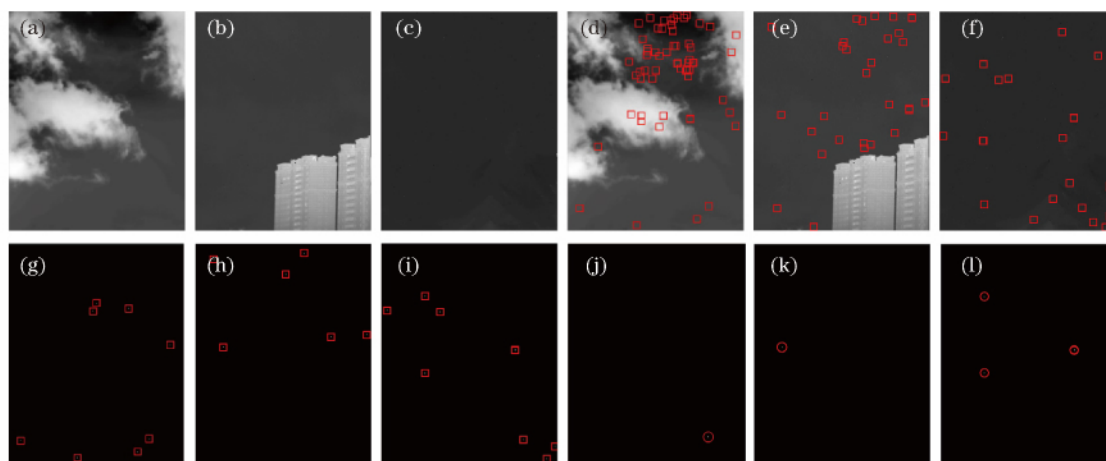


图 11 目标检测结果。(a)~(c)原始红外图像;(d)~(f)自适应阈值检测结果;

(g)~(i)背景边缘点剔除结果;(j)~(l)噪声剔除结果

Fig. 11 Target detection results. (a)-(c) Original infrared images; (d)-(f) results after adaptive threshold detection; (g)-(i) results after removal of background edges; (j)-(l) results after removal of noise

选用目标检测概率 R_{CDR} 、虚警概率 R_{FAR} 和每帧图像的平均处理时间作为所提算法的评价指标,定义如下:

$$R_{\text{CDR}} = (N_c / N_t) \times 100\%, \quad (23)$$

$$R_{\text{FAR}} = [N_f / (N_f + N_t)] \times 100\%, \quad (24)$$

式中 N_c 为正确检测出的点目标个数, N_t 为序列中实际的点目标总数, N_f 为虚警个数。

选取的图像序列中同样包含纯净天空背景、云层背景和建筑物背景图像,检测序列中共有 1000 个点目标。上述算法正确检测出 998 个点目标,有 1 个虚警,检测概率为 99.8%,虚警率为 0.1%,另外,1000 帧图像的平均处理时间为 0.47 s。为了证明所提算法的有效性,对检测出的前 500 个点目标的信噪比进行汇总,

得到图 12 所示的点目标信噪比统计曲线,检测出的点目标信噪比范围为 0.7~4.3。

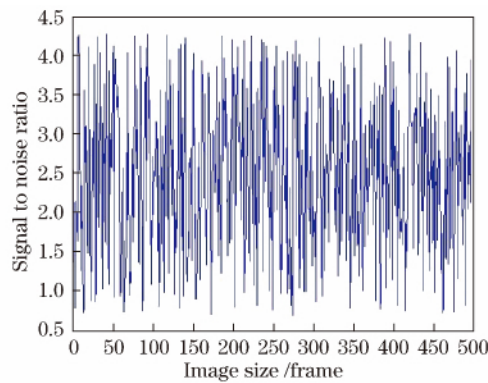


图 12 点目标信噪比

Fig. 12 Signal-to-noise ratio of point targets

5.3 与其他算法的比较分析

为了进一步衡量所提算法的有效性和检测速度,将该算法和常用的最大中值滤波法、高斯差分(DoG)尺度空间的检测算法、图像块匹配三维(BM3D)模型法、高斯混合模型(GMM)法进行了对比,对上述 1000 帧暗弱点目标图像进行了检测实验,图 13 所示为 4 种算法对图 11(a)所示原始图片的处理结果。由于背景云层极其复杂,而点目标信噪比又极低,传统算法存在一定的局限性。最大中值滤波法和 DoG 尺度空间算法对背景抑制作用有限,滤波尺度过大,很可能将点目标滤掉。BM3D 算法和高斯混合模型法均为对背景进行建模,对复杂云层背景的抑制效果较好,但是算法较为复杂,难以实时实现。算法性能的统计结果见表 2。

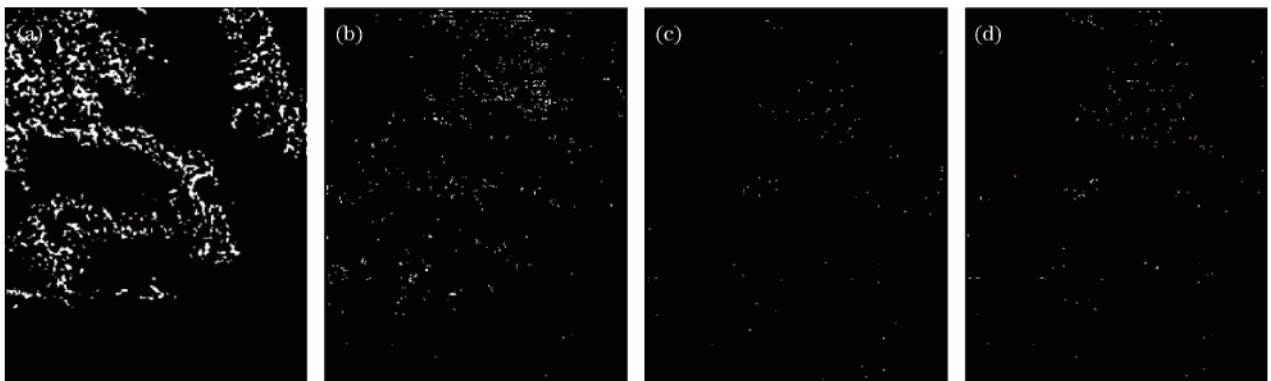


图 13 不同算法的处理结果。(a)最大中值滤波法;(b)DoG 尺度空间检测算法;(c)BM3D 算法;(d)GMM 算法

Fig. 13 Processing results from different algorithms. (a) Max-median filter algorithm ;
(b) DoG scale-space detection algorithm ; (c) BM3D algorithm ; (d) GMM algorithm

表 2 目标检测算法的性能对比

Table 2 Performance comparison of target detection algorithms

Method	$R_{\text{CDR}} / \%$	$R_{\text{FAR}} / \%$	Running time /s
Max-median filter algorithm	77.9	15.9	0.45
DoG scale-space detection algorithm	82.2	10.2	0.61
BM3D algorithm	95.1	6.9	3.10
GMM algorithm	94.1	7.2	2.98
Proposed method	99.8	0.1	0.47

从表 2 可以看出,所提方法在检测性能上优于常用的最大中值滤波法、DoG 尺度空间的目标检测算法、BM3D 算法、GMM 算法。对比发现,所提算法的检测概率很高,虚警率较低,成功剔除了干扰点,有效提高了目标信噪比,且算法复杂度不高,运行时间短。

6 结 论

提出了一种基于全方位多尺度的形态学和合局部特征准则的点目标检测方法。实验结果表明,在复杂背景和低信噪比条件下,所提算法的目标检测概率达到 99.8%,虚警率为 0.1%。所提检测算法对复杂背景的抑制作用较好,同时运行时间短,满足工程上对于实时性的要求。

参 考 文 献

- [1] Revital H S, Ofer H, Stanley R R, *et al.* Parametric temporal compression of infrared imagery sequences containing a slow-moving point target[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(5): 1151-1163.
- [2] Yang C, Ma J, Qi S, *et al.* Directional support value of Gaussian transformation for infrared small target detection[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(9): 2255-2265.
- [3] Liu Rang, Wang Dejiang, Jia Ping, *et al.* Overview on small target detection technology in infrared image[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 050004.
刘让, 王德江, 贾平, 等. 红外图像弱小目标探测技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 050004.
- [4] Peng Jiaxiong, Zhou Wenlin. Infrared background suppression for segmenting and detecting small target[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(12): 47-51.
彭嘉雄, 周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测[J]. *电子学报*, 1999, 27(12): 47-51.
- [5] Li Xin, Zhao Yigong. Approach to dim and small target detection based on fuzzy classification[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(9): 2312-2320.
李欣, 赵亦工. 基于模糊分类的弱小目标检测方法[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2312-2320.
- [6] Wang Gang, Chen Yongguang, Yang Suochang, *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.
- [7] Kim S, Lee J. Scale invariant small target detection by optimizing signal-to-clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track[J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45(1): 393-406.
- [8] Wu Yiquan, Luo Zijuan, Wu Wenyi. A method of small target detection in infrared image based on non-subsampled contourlet transform[J]. *Image and Graphics*, 2009, 14(3): 477-481.
吴一全, 罗子娟, 吴文怡. 基于 NSCT 的红外图像小目标检测技术[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(3): 477-481.
- [9] Genin L, Champagnat F, Le Besnerais G. Background first- and second-order modeling for point target detection[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7701-7713.
- [10] Zaveri M A, Merchant S N, Desai U B. Air-borne approaching target detection and tracking in infrared image sequence[C]. 2004 International Conference on Image Processing, 2004, 2(10): 1025-1028.
- [11] Fan H, Wen C. Two-dimensional adaptive filtering based on projection algorithm[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(3): 832-838.
- [12] Boccignone G, Chianese A, Picariello A. Small target detection using wavelets[C]. Fourteenth International Conference on Pattern Recognition, 1998, 2(10): 1776-1778.
- [13] 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.
程塏, 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.
- [14] Sun Jigang. Research on algorithm of infrared small target detection and tracking in image sequence[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
孙继刚. 序列图像红外小目标检测与跟踪算法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- [15] Chai Yuhua, Gao Liqun, Wang Rong, *et al.* Method for smoothing soybean image noise based on multi-scale morphology[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(6): 119-122.
柴玉华, 高立群, 王蓉, 等. 基于多尺度形态学大豆图像滤波方法[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 119-122.
- [16] Li Huijian, Wang Runqiu, Cao Siyuan, *et al.* Weak signal identification in microseismic monitoring with multi-scale morphology[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2015, 50(6): 1105-1111.
李会俭, 王润秋, 曹思远, 等. 利用多尺度形态学识别微地震监测中的弱信号[J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 50(6): 1105-1111.
- [17] Li Miao, Long Yunli, Li Jun, *et al.* Oversampling point target track-before-detect by multi-Bernoulli filter[J]. *Optics*

and Precision Engineering, 2015, 23(12): 3446-3455.

李森, 龙云利, 李骏, 等. 采用多伯努利滤波器的过采样点目标检测前跟踪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(12): 3446-3455.

- [18] Wan Ming, Zhang Fengming, Hu Shuang. Novel infrared dim and small target detection algorithm based on multi-scale gradient[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1011001.

万明, 张凤鸣, 胡双. 基于多步长梯度特征的红外弱小目标检测算法[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1011001.

- [19] Zhang Shuanglei. Research on high-reliability detection of the space infrared dim small target[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.

张双垒. 空间红外弱小目标高可靠检测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.

- [20] Luo Xiangdong. Analysis of light energy to Fraunhofer diffraction of circular hole[J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2005, 26(4): 360-361.

雒向东. 对夫琅禾费圆孔衍射光能量的分析[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2005, 26(4): 360-361.