

一种超大视场中红外弱小运动目标的快速检测方法

张 帅¹, 刘秉琦¹, 李 勇², 黄富瑜¹, 陈玉丹¹, 余 皓¹

(1.军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003; 2.河南质量工程职业学院, 河南 平顶山 467000)

摘要: 超大视场红外凝视成像系统具有视场大、被动探测、凝视探测等独特优势, 但当系统用于弱小目标检测时, 由于背景复杂、噪声干扰、目标信息少等问题, 检测的准确性和效率往往不高。本文通过采用超大视场中空时域融合处理的思想, 提出了一种基于最大化背景模型进行背景抑制的改进方法。该方法首先通过图像预处理、多帧差分选取研究区域; 然后通过改进的背景预测模型检测疑似目标点; 最后, 利用邻域相关准则判定真实目标。通过实验证明: 该方法将原方法中的目标信噪比提高了5倍以上, 灰度值提高了10倍以上, 而且保留了更多的目标信息。同时目标检测时间减少了50%以上, 提高了检测准确性和检测效率。

关键词: 红外弱小目标; 快速检测; 超大视场; 最大化背景模型;

中图分类号: TN215, TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2016)08-0693-06

Rapid Detection Method for Infrared Weak and Small Moving Target of Super Wide-field Image

ZHANG Shuai¹, LIU Bingqi¹, LI Yong², HUANG Fuyu¹, CHEN Yudan¹, YU Hao¹

(1.Department of Electronic & Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2.Henan Quality Polytechnic, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: The super wide-field infrared staring system has unique characters such as vast detection airspace, passive detection, staring detection, and so on. However, when a super wide-field infrared staring system is used to detect weak and small targets, it may show complex background, more noise jamming and little target information. So the detection accuracy is always low. By using the idea of spatial-temporal fusion processing in super wide-field image, an improved method based on maximum background model prediction is proposed in the paper. Firstly, image preprocessing and multi-frame difference are carried out to select study regions. Then, the improved model is used to detect all suspicious targets in whole infrared image. At last, the real target is confirmed by neighborhood correlation rule. The experiment proves that: the Signal to Noise Ratio(SNR) of proposed method is increased more than 5 times and the gray value of target is increased more than 10 times. Meanwhile, more target information is preserved than before. The time of target detection is decreased by more than 50% and the accuracy and efficiency of detection are improved.

Key words: infrared weak and small target, rapid detection, super wide-field, maximum background model

0 引言

红外探测系统因其被动式探测、隐蔽性好等优势, 被广泛用于战场侦察和预警等方面。随着现代武器向着快速化、小型化发展, 现代战场呈现出“全方位实时”打击的特点, 红外探测系统需要能够实时感知各个方向的来袭攻击。超大视场红外凝视系

统具有探测空域大、实时性好、体积小等独特优势, 因此, 在机器视觉^[1]、自主导航^[2]、激光告警^[3]、目标识别跟踪^[4]等领域有着广阔的应用前景。

复杂环境下的红外弱小目标检测一直是图像处理和计算机视觉领域的研究热点之一^[5]。目前, 针对小视场红外目标的检测算法比较成熟, 例如数学形态学法、小波分析法、均值滤波法等。但是, 在

超大视场的红外目标检测中,存在以下难点:

1) 相比小视场,大视场背景更为复杂,噪声干扰更多,目标在探测器上的能量弱,信噪比低;

2) 探测单元对应的视场角大,目标在像面上的成像面积仅为几个像素甚至不足一个像素,形状、纹理等特征信息不明显;

3) 单个探测元的空间分辨率低,因此目标运动相对缓慢,目标在帧帧之间的位置变化不明显,不易区分。

在针对弱小目标的检测方法中,神经网络训练、小波分析等有较好的检测效果,但红外系统的检测要求具有良好的实时性,而这些方法都会带来繁琐的计算过程,从计算量和实时处理上不能达到要求。通过背景抑制检测目标的方法较为简单、可靠,其中心思想就是利用背景估计的方法将背景预测出来,并在原图像中去掉预测背景,达到检测的目的^[6-7]。背景抑制实则是一种低通滤波,近年来,国内外研究较多的包括图像滤波、Top-hat法和自适应权值法等。图像滤波方法中包括均值滤波、高通滤波、维纳滤波等方法,这些滤波方法往往针对某种噪声具有一定的效果,但图像中混合有多种噪声,因此图像滤波在使用中具有一定的局限性。Gonzalez R. C.介绍了典型的Top-Hat变换方法是一种数学形态学开运算,该方法具有良好的实时性且硬件实现方便,但在灰度变化剧烈的杂波背景图像中背景预测效果一般^[8]。自适应权值法根据图像背景的变化改变权值,可达到准确预测背景的目的。Ohki M所研究的最小均方滤波器采用的就是自适应权值线性滤波的思想^[9]。Leung将非线性滤波方法用于复杂背景的预测中,较线性滤波方法目标检测效果更好^[10]。徐军提出了一种最大化背景模型用于红外弱小目标检测的方法,能够有效估计起伏较大的背景,提高红外弱小目标的检测性能^[11]。陈玉丹提出了一种最大化背景模型的改进方法,达到了抑制干扰和提高信噪比的目的^[12]。但是,考虑到超大视场中目标的成像特点和运动特点,单独使用某种检测方法的检测效果和可靠性往往不高。针对这个问题,在超大视场中采用基于空时域融合处理的方法,具有良好的检测效果^[13]。

综上,本文在超大视场中采用空时域融合处理的思想对这种最大化背景模型进行了改进。该改进方法通过图像预处理和隔帧差分选取感兴趣的研究区域,利用最小化背景模型预测背景和提取疑似目标,利用邻域相关判决准则实现真实目标检测。通过实验证明,这种方法提高了超大视场中红外运动

目标的检测效率和准确性。

1 背景预测方法

1.1 传统背景预测方法

在红外图像中,在背景均匀的条件下,背景点与周围背景相关性比较高,背景中的像素灰度值可通过周围背景点实现预测,并且预测误差通常较小。而目标和噪声点对于周围背景的差别较大,相关性较差,通过周围背景预测的目标点和噪声点的灰度值与实际灰度值差异较大,因此可以将原图像和预测图像进行差分,达到抑制背景的目的。然后在差分后的图像中,通过图像滤波、多帧积累、阈值分割等方法进一步滤除噪声,从而提高红外目标的检测概率。在传统的背景预测方法中,一般通过在待预测点附近选取一定大小的预测窗口来进行预测。设 $x(m,n)$ 是红外图像中待预测点 (m,n) 处的灰度值,则在其附近一定的空域 Ω 内,对该点的灰度预测值 $y(m,n)$ 为:

$$y(m,n) = \sum_{p,q \in R} W_j(p,q)x(m-p,n-q) \quad (1)$$

式中: $W_j(p,q)$ 是第 j 次自适应迭代后的权值矩阵,大小为 $M \times N \in \Omega$ 。差分图像 E 为:

$$E(m,n) = x(m,n) - y(m,n) \quad (2)$$

为了提高检测概率,权值矩阵 $W_j(p,q)$ 可通过多种方法设置为不同的滤波模板。其中,最为简单的一种是等值权重:

$$W_j(p,q) = 1/(L \times L) \quad (3)$$

式中: L 是预测窗口的长度。相较其他权重模板,这种等值权重不涉及级数,计算过程简单、有效,同时具有良好的检测效果和检测快速性。

但是,这种方法只适用于背景均匀、起伏不大的红外图像中的目标检测。与小视场相比,超大视场中背景更加复杂,干扰更多,尤其是当目标处在背景变化较大的位置时,使用传统的背景预测方法进行预测会导致产生较多的虚假目标,这对目标的检测是十分不利的。

1.2 最大化背景模型

针对在复杂背景中传统背景预测方法效果不佳的状况,最大化背景模型改善了这个问题。“区域最大化背景模型”将预测区域分为4个区域,分别对应欧几里德的4个象限:

$$y_1(m,n) = \sum_{p,q \in \Omega} w_j(p,q)x(m+p,n+q) \quad (4)$$

$$y_2(m,n) = \sum_{p,q \in \Omega} w_j(p,q)x(m-p,n+q) \quad (5)$$

$$y_3(m,n) = \sum_{p,q \in \Omega} w_j(p,q)x(m-p,n-q) \quad (6)$$

$$y_4(m,n) = \sum_{p,q \in \Omega} w_j(p,q)x(m+p,n-q) \quad (7)$$

背景在4个象限中的预测值大小不一,取最大值作为该点的背景预测值:

$$y_{\max}(m,n) = \max\{y_1(m,n), y_2(m,n), y_3(m,n), y_4(m,n)\} \quad (8)$$

这样,经过与原图像差分后,如果预测点为背景点,差分后的图像中该点像素灰度值小于或等于零,如果预测点为目标点,可以通过阈值分割很好地将目标从复杂背景提取出来。但是,这种方法一定程度上也减小了目标点的灰度值和信噪比。

同时,相较小视场,超大视场中单个视场图像要大的多,像素数目是小视场中的数倍。如果单独采用这种背景预测方法来抑制背景,无疑带来了巨大的运算量。而且在超大视场中,目标本身信号强度和信噪比较弱小,如果目标作为像素原点的话,由于目标点在其邻域内灰度值一般是最高的,目标对背景预测也会有很大的贡献,这会导致最大化背景模型预测的背景灰度值较高,经过背景抑制后,目标的能量会大大降低,信噪比也会减小,增加了后续目标检测的困难。基于此,应该结合空时域融合处理的方式来提高其检测效果。

2 超大视场中红外弱小运动目标检测

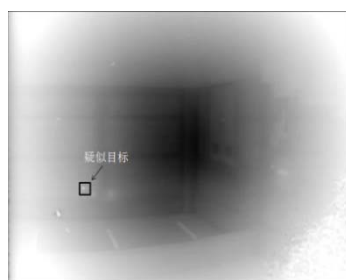
超大视场中通过大空域探测可以全方位、实时预警和侦察,但发现疑似目标后需要快速检测出来,

此时,这些存在疑似目标的区域就是我们感兴趣的研究区域。但目标检测不能通过简单的预处理就获取真实的目标位置,需要对捕获到的疑似目标进行判别,确定真实目标。由于目标在大视场中的运动具有连续性和轨迹性等特征,而噪声是随机的,没有规律可言,因此可根据这些特点实现目标检测。

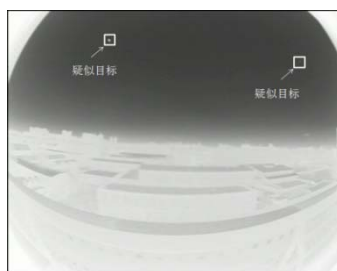
2.1 研究区域最小化背景预测

帧间差分是一种传统的目标检测方法,这种方法通过对背景进行抑制,提高目标的检测概率^[14]。相比背景差分方法,这种方法对背景适应性好,稳定性高。但缺点是不易滤除噪声、容易造成目标空洞及目标能量损失较大,导致检测到的目标中丢失了较多的有用信息。同时,超大视场中的目标在帧与帧之间的位置变化不大,目标可能存在重叠的部分,因此图像帧间差分法不是十分准确。隔帧差分法可以利用运动目标位置有规律的变化来抑制背景、突出疑似目标,因此本文通过图像预处理和隔帧差分完成对目标的初步判决。在超大视场中通过确定感兴趣的研究区域,可减小检测运算量、缩短检测时间,从而提高检测效率。如图1,经过隔帧差分的图像中,存在灰度值相对较高的“疑似目标”,可以利用这个特点选取研究区域。

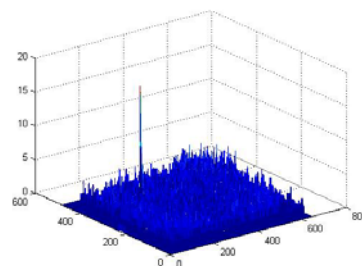
确定研究区域后,利用最大化背景模型进行检测时,目标能量损失较大、信噪比降低的问题。针对这些问题,本文对原方法进行了改进:在超大视场中的研究区域内设置一定大小的疑似目标窗口,预测时对其不进行统计,去除疑似目标对背景预测的影响。同时,最大化背景预测对目标点的背景预



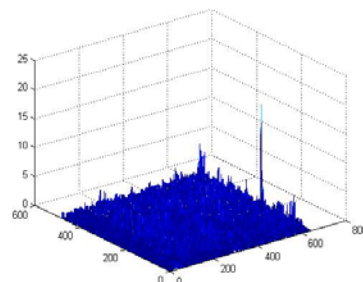
(a) 序列一原图像



(c) 序列二原图像



(b) 灰度直方图



(d) 灰度直方图

图1 隔帧差分图像灰度直方图

Fig.1 Gray histogram of discontinuous frame-difference image

测灰度值偏高,造成目标能量损失,因此本文采用最小化背景预测,即:

$$y_{\min}(m,n)=\min\{y_1(m,n), y_2(m,n), y_3(m,n), y_4(m,n)\} \quad (9)$$

这种方法确保了疑似目标点的信号能量和信噪比较高,为后续检测做好了准备。本文综合考虑检测的准确性和快速性,以初步检测得到的疑似残留目标为中心,设置研究区域大小为 90×90 ,图2是采用最小化背景预测方法得到的背景预测图像。图2(a)、(b)分别是序列一中第16帧及预测背景,图2(c)、(d)分别是序列二中第40帧及预测背景。

2.2 自适应阈值分割

从图2中可看出,经过抑制后的背景中,疑似目标与背景的对比度比较低,不易观察,而且还存在一定的噪声干扰。为提高疑似目标与背景的对比度、滤除噪声、降低目标检测的复杂程度,采用自适应阈值分割的方法,阈值可采用:

$$Th=E+K \cdot \sigma \quad (10)$$

式中: Th 是分割阈值; E 是图像灰度平均值; σ 是图像的标准差; K 是权重系数,一般选取 $2 \sim 5$ 。 K 的选取大部分是通过经验公式获得的,文中设置图像目标信噪比(SNR)为 K ,即令 $K=SNR$,可以取得良好的分割效果。但是实验过程中发现,阈值分割效果不佳,仍存在较多噪声,原因是分割阈值偏小。这是因为预测窗口内的图像经过与预测背景的差分之后,许多像素点的灰度值变为零,但计算过程中也被统计在内。为使阈值更好地匹配差分图像、滤除噪声,本文实验只考虑灰度值为非零的像素点,这样,噪声滤除效果得到了很好的提高,如图3所示。

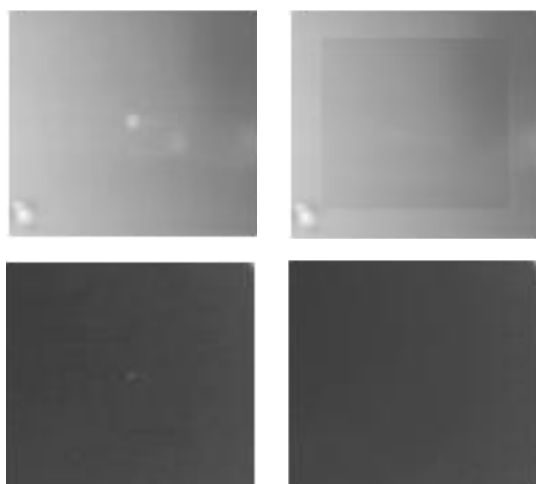


图2 研究区域背景预测及差分效果

Fig.2 Prediction and difference effect of study region

2.3 邻域相关判定目标

经过在多帧图像中对研究区域进行检测,目标在每一帧图像中的位置有所变化。通过对比可发现,在邻域范围之内,目标的位置变化是连续的,而噪声点的变化是随机的,或者噪声点不存在。邻域目标判决准则为:对于当前图像中出现的某个疑似目标点,如果以后连续 N 帧图像中相应的某个小邻域内出现次数在 K ($K \leq N$)次以上,则判定该疑似目标点为真实目标,予以保留;否则判断该点为噪声点,予以剔除^[15]。但是,单独通过邻域位置相关判定无法排除疑似目标点,所以可以根据检测目标在超大视场中的成像及运动特点实现判定。当探测目标距离较远,超大视场中真实目标的成像面积一般为 $3 \sim 5$ 个像素点,否则为假目标;同时目标在像面的运动速度一般不足 0.5 pixels/frame,在连续的短时间内,目标的运动轨迹可以近似为匀速直线运动。根据这些特点,可通过时域多步判断逐步排除疑似目标,最终确定真实目标。

如图4中(a)和(b)分别为在序列一和序列二连续10帧的隔帧图像中,检测到的亮点位置变化。从连续多帧图像中可看出,亮点位置的变化是连续的,且都在预测的邻域范围内,据此可判定此亮点为目标点。

3 实验结果

本文对两组超大视场中的弱小目标进行了检测实验。序列一中的目标位于背景起伏较大的位置,通过原方法检测得到的图像中目标信号十分微弱,目标与背景对比度低,如图5(b),通过本文改进方法,提高了目标与背景的对比度,如图5(c)。序列二中的目标位于复杂天空背景中,噪声较多,信噪

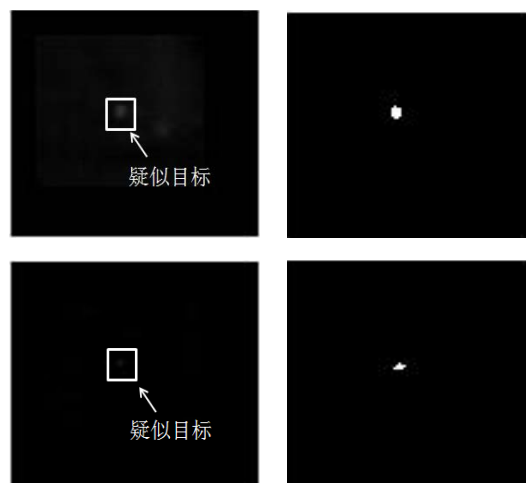


图3 自适应阈值分割效果

Fig.3 Adaptive threshold segmentation effect

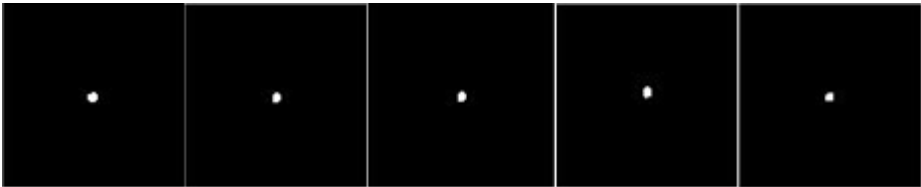
比较低，通过原方法检测得到的图像中存在较多干扰，如图 5(e)，通过本文改进方法，提高了目标与背景的对比度，保留了较多的目标信息，如图 5(f)。通过实验证明，在研究区域使用改进的背景预测模型，很好地抑制了复杂背景，剔除了噪声干扰，并且比较完整地保留了疑似目标的有用信息。

表 1、表 2 分别对比了序列一、序列二图像中使用原方法和本文方法的检测效果，包括研究区域内目标灰度平均值、图像标准差、信噪比和检测时间。从表中的实验数据可看出：在研究区域内，原方法采用最大化背景模型检测，本文方法通过自适应阈值分割、去除目标对背景的估计、最小化背景模型等方式进行检测，这两种方法都具有一定的背景抑制效果，图像的标准差都比原图像有了较大的下降；经过原方法背景抑制后，图像中目标平均灰度值下降严重，信噪比提高不明显，而经过本文的

改进方法进行背景抑制后，目标平均灰度值比原方法提高了 10 倍以上，信噪比提高了 5 倍以上，检测时间也减少了 50% 以上，而原方法一般使用在全幅图像中，检测时间将变得更长，十分不利于快速检测。总之，通过在研究区域内利用最小化背景模型抑制背景，对原方法的改进效果明显，基本实现了在超大视场中快速、准确地检测红外运动目标。

4 结论

基于最大化背景模型的背景预测在小视场复杂背景中具有一定的检测效果。但是，由于超大视场中背景更加复杂、干扰更多，这种方法的检测效果不佳，例如目标信息丢失严重，信噪比提高不够明显，甚至有所降低。针对这些问题，本文提出了一种红外弱小运动目标检测的改进方案，即采用空时



(a) 序列一：40~50 帧目标隔帧检测效果

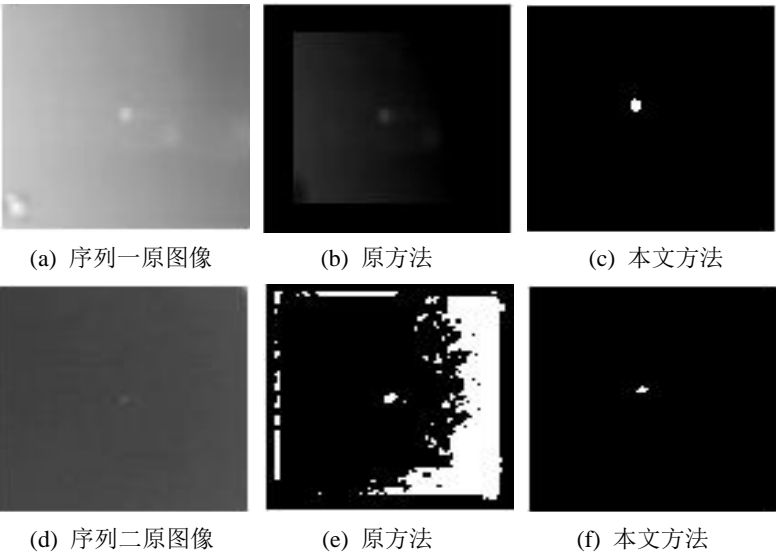
(a) Sequence 1: target detection effect of multi-frame difference in 40~50 frames



(b) 序列二：10~20 帧目标隔帧检测效果

(b) Sequence 2: target detection effect of multi-frame difference in 10-20 frames

图 4 目标多帧检测效果 Fig.4 Target detection effect of multi-frame



(d) 序列二原图像 (e) 原方法 (f) 本文方法

图 5 本文方法和原方法检测结果对比

Fig.5 Detection effect comparison of original method and improved method

域融合处理的思想,通过图像预处理和隔帧差分选取研究区域,利用最小化背景模型预测背景,利用邻域相关准则确定真实目标。通过实验证明,在超大视场的红外弱小运动目标检测中,本文的改进方

法效果明显,并提高了目标信噪比,减小了图像标准差,缩短了检测时间,保留了更多的目标信息,具有良好的检测效率和检测准确性。

表 1 序列一检测效果 Table 1 The detection effect of sequence 1

	目标平均灰度值	图像标准差	信噪比	检测时间
原图像	189	24.17	1.20	
最大化背景预测	1.55	0.74	2.36	0.54 s
本文方法	27	1.58	15.37	0.21 s

表 2 序列二检测效果 Table 2 The detection effect of sequence 2

	目标平均灰度值	图像标准差	信噪比	检测时间
原图像	77.58	5.11	1.32	
最大化背景预测	1.25	0.79	3.87	0.51s
本文方法	9.75	0.55	19.55	0.17s

参考文献:

[1] KIM Deukhyeon, CHOI Jinwook, YOO Hunjae, et al. Rear obstacle detection system with fisheye stereo camera using HCT[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, **42**: 6295-6305.

[2] COURBON J, MEZOUAR Y, GUÉNARD N, et al. Vision based navigation of unmanned aerial vehicles[J]. *Control Engineering Practice*, 2010, **18**: 789.

[3] 王龙, 王永仲, 沈学举, 等. 光栅衍射型超广角激光告警系统的灵敏度分析[J]. *激光与红外*, 2014, **44**(3): 293-297.
WANG Long, WANG Yongzhong, SHEN Xueju, et al. Analysis of detective sensitivity for super wide-angle laser warning system based on grating diffraction[J]. *LASER & INFRARED*, 2014, **44**(3): 293-297.

[4] WANG Yonghong. Biomimetic staring infrared imaging omni directional detection technology[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2010, **55**(27): 3073.

[5] 侯旺, 于起峰, 雷志辉, 等. 基于分块速度域改进迭代运动目标检测算法的红外弱小目标检测[J]. *物理学报*, 2014, **63**(7): 074208.
HOU Wang, YU Qifeng, LEI Zhihui, et al. A block-based improved recursive moving-target-indication algorithm[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2014, **63**(7): 074208.

[6] 杨丽萍, 冯晓毅. 一种基于背景预测的红外弱小目标检测方法[J]. *红外技术*, 2007, **29**(7): 404-408.
YANG Liping, FENG Xiaoyi. Weak and small infrared targets detection based on background prediction[J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(7): 404-408.

[7] 朱金标. 低信噪比红外图像弱小目标检测研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
ZHU Jinbiao. Investigation on Dim Point Target Detection in Low SNR Infrared Image[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.

[8] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital Image Processing*[M]. 2nd Edition, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 2003.

[9] OHKI M, HASHIGUCHI S. Two-dimensional LMS adaptive filters[J]. *IEEE Trans. Consum. Electron*, 1991, **37**(1): 66-73.

[10] LEUNG H, YOUNG A. Small target detection in clutter using recursive nonlinear prediction[J]. *IEEE Trans. Aeros. Electron. Sys*, 2000, **36**(2): 713-718.

[11] 徐军, 向健华, 梁昌洪. 最大化背景模型用于检测红外图像中的弱小目标[J]. *光子学报*, 2002, **31**(12): 1483-1486.
XU Jun, XIANG Jianhua, LIANG Changhong. The small target detection in infrared image based on maximum background model prediction[J]. *ACTA PHOTONICA SINICA*, 2002, **31**(12): 1483-1486.

[12] 陈玉丹. 基于最大化背景预测的图像预处理技术研究[J]. *红外技术*, 2006, **28**(12): 683-685.
CHEN Yuan. Image preprocessing for infrared small target detection based on maximum background model prediction[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(12): 683-685.

[13] 黄富瑜, 沈学举, 刘旭敏, 等. 基于空时域融合处理检测超大视场红外目标[J]. *光学精密工程*, 2015, **23** (8): 2328-2338.
HUANG Fuyu, SHEN Xueju, LIU Xuming, et al. Detection of super wide-field infrared target based on spatial-temporal fusion processing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(8): 2328-2338.

[14] 王建刚, 李醒飞, 陈诚, 等. 改进 TLD 算法在光电跟踪中的应用[J]. *红外技术*, 2015, **37**(10): 824-830.
WANG Jiangang, LI Xingfei, CHEN Cheng, et al. Improved TLD approach applied in optoelectronic tracking[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(10): 824-830.

[15] 张艳晶. 复杂云背景下红外运动小目标检测算法研究[D]. 合肥: 国防科学技术大学, 2003.
ZHANG Yanjing. Research on Detecting Algorithm of Moving Dim Small Targets in IR Images with Complex Cloud Background[D]. Heifei: National University of Defense Technology, 2003.