

基于邻域特征的红外低慢小目标检测

南天章¹, 耿建君², 陈旭¹, 陈颖³

(1. 天津航技术物理研究所, 天津 300308; 2. 北京电子工程总体研究所, 北京 100854;
3. 中国科学院天津工业生物技术研究所, 天津 300308)

摘要: 红外搜索系统具有不发射电磁波、抗电磁干扰能力强、目标指示精度高等优势, 在低慢小目标探测领域有很好的应用前景。目前国内外基于红外搜索系统的目标检测算法通常利用当前图像与背景图像配准、差分的手段提取疑似目标, 往往需要较大的存储空间保存周视背景图像, 高精度实时图像配准算法的工程化应用也有较大难度。针对以上问题, 设计了一种基于邻域特征的红外低慢小目标检测方法。通过高通滤波、边缘检测法提取疑似目标、目标邻域特征值统计法剔除背景干扰、多帧图像目标信息相关等处理过程, 可在有效排除地物、云层及飞鸟等多种干扰的同时, 准确地检测图像中的无人机目标。试验结果表明, 该方法相比传统 LCM 算法目标检测概率更高、虚警率更低, 且不涉及图像差分, 具有对硬件资源要求低、实时性好等优点, 有较高的工程应用价值。

关键词: 图像处理; 目标检测; 红外搜索系统; 低慢小目标

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S128002

Infrared low, slow and small target detection based on neighborhood characteristics

Nan Tianzhang¹, Geng Jianjun², Chen Xu¹, Chen Ying³

(1. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China;
2. Beijing Institute of Electronic Engineering, Beijing 100854, China;
3. Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, Tianjin 300308, China)

Abstract: The infrared search system has the advantages of not emitting electromagnetic wave, strong anti-electromagnetic interference ability and high precision of target indication, and has a good application prospect in the field of low, slow and small target detection. At present at home and abroad, the target detection algorithm of infrared search system usually extracts the suspected target by using the current image and the background image registration and difference, which is often necessary to save the panoramic background images in the large storage space, and the engineering application of high precision real-time image registration algorithm is also difficult. For the above questions, a infrared low, slow and small target detection method was designed for the infrared search system. Through the processes of morphological filtering, extracting suspected targets with edge detection method, eliminating background interference with target neighborhood eigenvalue statistical method and correlating target

收稿日期: 2018-11-10; 修订日期: 2018-12-16

作者简介: 南天章(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事图像处理、红外目标识别与跟踪方面的研究。Email: 190828317@qq.com

information based on multi-frame image, it can effectively eliminate the interference of ground objects, clouds and birds, while accurately detecting the UAV's target in the image. Experimental results show that this method has higher target detection probability and lower false alarm rate than the traditional LCM algorithm. Moreover, it does not involve image difference, and has the advantages of low demand for hardware resources and good real-time performance, etc., and has high engineering application value.

Key words: image processing; target detection; infrared search system; low, slow and small target

0 引言

红外搜索系统是一种采用被动方式工作的目标探测设备,能够为车载、舰载等武器系统提供目标指示。红外搜索系统本身不发射电磁波,具有可在夜间工作、抗电磁干扰能力强、目标指示精度高、低空探测能力好等优点,能实现对战斗机、无人机、巡航弹等多种目标的探测,大大提高武器系统的抗干扰能力和作战效能。在强电子干扰环境下,红外搜索系统已经成为辅助或代替搜索雷达的首选设备^[1]。近年来,随着无人机技术的快速发展和广泛应用,以无人机为代表的低慢小目标探测技术已成为当前的热点研究课题。

目前国内外主流的红外搜索系统目标检测算法^[2]大多基于背景差分等手段提取目标,需要占用大量的硬件资源存储背景图像,对搜索平台的稳定精度、配准算法的性能要求较高,不便于工程化应用。Qi 等人提出了基于方向显著性的目标检测(DSBM)方法^[3],该方法首先基于小面(facet)模型求出图像的二阶方向导数(SODD),在此基础上经过傅里叶变换,运用相位谱的显著性检测分离出小目标。Chen 等人提出了一种基于目标局部对比度(LCM)的目标检测方法^[4],该方法在不同尺度下通过寻找中心与局部邻域对比度的最大值来检测小目标,传统 LCM 算法通过计算局部对比度来增强图像信噪比,从而提高目标检测概率,但同时也提高了图像中灰度较大噪声的对比度,且对于背景复杂的图像,算法的背景抑制效果较差,虚警率较高^[5]。另外,不同尺度下的重复计算虽能在一定程度上提高图像信噪比,但同时极大地增加了图像处理时间,算法很难应用于对于实时性要求较高的系统。

文中针对以上问题,结合红外搜索系统实际应用需求,设计了一种适于工程化应用的低空复杂背景下低慢小目标检测算法。

1 红外搜索系统

红外搜索系统的主要功能是对指定空域目标(作战飞机、无人机、导弹、制导炸弹等)进行搜索探测,为武器系统提供威胁目标信息。红外搜索系统按功能分为红外成像分系统、稳定控制分系统、信息处理分系统及显控分系统。红外成像分系统接收目标和背景的红外辐射,通过光学系统成像到红外机芯组件上,经过光电转换生成图像视频信号,并进行非均匀性校正、坏元剔除等图像预处理;稳定控制分系统主要功能是承载光电负载,完成方位连续旋转,俯仰精确指向控制,并进行像移补偿、同步成像控制;信息处理分系统主要接收图像数据,进行目标实时检测;显控分系统实现视场拼接、图像和目标检测结果显示,具备人机交互功能。

红外搜索系统按结构组成可分为红外扫描头、电气处理箱、系统线缆和软件,其中红外扫描头主要包括光电负载、扫描转台、扫描控制电路等,电气处理箱主要包括目标检测电路、管控电路、电源电路等,其中红外扫描头对指定俯仰空域进行方位连续 360°搜索,输出红外数字图像;电气处理箱中的目标检测电路是目标检测算法的硬件平台,采用 FPGA+双 C6455DSP 的架构,其组成如图 1 所示。

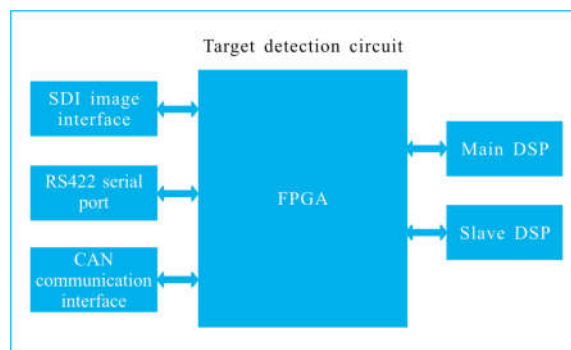


图 1 目标检测电路组成

Fig.1 Target detection circuit composition

FPGA 完成图像滤波算法,并将图像按一定的格式传输至主、从 DSP。为提升图像处理时间,采用双 DSP 协同处理的模式,即主 DSP 负责处理偶数帧图像,从 DSP 负责处理奇数帧图像,主、从 DSP 通过 RS422 串口或 CAN 口将目标检测结果发送至上级管控电路。

红外搜索系统完成方位 360°搜索的周期约为 1 s,一周的图像数据量为 640×512×48×2 bytes。系统具有光学稳像功能,为图像处理和人工观察目标提供清晰的图像数据。图 2 为系统采集的一组周视拼接图像。



图 2 一组周视拼接图像

Fig.2 A set of mosaic panoramic images

2 基于邻域特征的低慢小目标检测算法

以无人机为典型代表的低慢小目标,往往具有尺寸小、自身热辐射弱、飞行高度低、飞行速度慢、飞行航迹无规律、出现场合地物复杂多变等特点,因此红外搜索系统探测低慢小目标时,面临着图像数据量大、图像信噪比低、图像中地物及云层干扰多等问题。文中克服以上难题,设计了一种适用于红外搜索系统工程化应用的低空复杂背景下低慢小目标检测算法,算法主流程如图 3 所示。

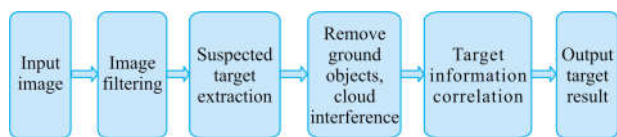


图 3 目标检测算法主流程

Fig.3 Main flow of target detection algorithm

2.1 图像滤波

图像滤波的目的是抑制背景和增强目标。常用的空域滤波算法有高通滤波、形态学滤波^[6]、中值滤波和小波变换滤波等。形态学滤波的关键因素在于对不同种类的红外图像要确定合适的结构元素并选择恰当的结构元素尺寸,因此检测方法存在一定的局限性。Wang 等人首先通过高斯差分(DOG)滤波^[7]

来提高图像对比度,此方法的不足在于当背景亮度高于目标区的亮度时会造成误检和虚警。文中综合考虑滤波效果和便于 FPGA 硬件实现等因素,选用高通滤波对图像进行滤波处理。文中采用的红外探测器的像素分辨率为 640×512,光学系统成像视场为 6°×5°,距离 500~1 500 m 的大疆精灵 3 无人机成像尺寸范围为 1×1~6×6 pixel,根据无人机目标的灰度分布特征和成像尺寸设计了利于目标检测的高通滤波器,滤波器参数如图 4(a)所示,用此模板与原始图像进行卷积运算,即可得到滤波图像,图 4(b)为 1 组无人机目标滤波前后图像。

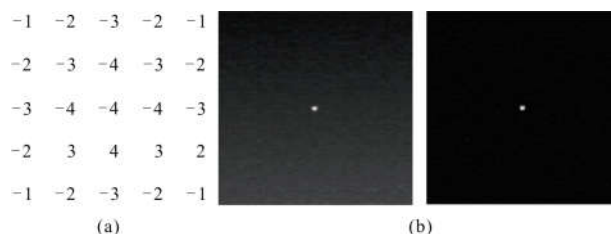


图 4 滤波参数及图像滤波结果

Fig.4 Filtering parameters and image filtering examples

2.2 边缘检测法提取疑似目标

针对滤波后图像,首先采用恒虚警门限法^[8]检测图像中的疑似目标点,灰度检测阈值 Th_{gray} 计算公式为:

$$Th_{gray} = u[f(i, j, k)] + a \cdot \sigma \quad (1)$$

式中: $u[f(i, j, k)]$ 为图像 $f(i, j, k)$ 的均值; σ 为图像 $f(i, j, k)$ 的灰度标准差; a 为与图像信噪比相关的调节系数,从灰度检测阈值的计算公式可以看出,图像中满足信噪比大于 a 的疑似目标都可以被检测出来。实际检测时, a 的选取与被检测目标的信噪比有关,目标信噪比越小, a 取值越小,以提取疑似目标阶段不漏检目标为原则,这里 a 取 2~4。

当检测到一个疑似目标点时,以该点为起始点,采用边缘追踪法得到与之连通的疑似目标区域,边缘检测阈值 Th_{edge} 的计算公式为:

$$Th_{edge} = Th_{gray} \cdot b \quad (2)$$

疑似目标区域应尽可能体现疑似目标的完整轮廓,因此边缘检测阈值一般小于检测阈值 Th_{gray} ,即系数 $b < 0$,实验发现 $b = 0.6$ 时目标边缘提取效果较好。在得到各连通区域的同时,统计各区域的尺寸、灰度均值、边界点坐标等特征值。由于无人机目标在滤波图

像中不超过 10×10 pixel, 因此将尺寸超过 10×10 pixel 的连通区域作为假目标予以剔除。

2.3 邻域特征值统计法剔除地物、云层干扰

图像滤波、边缘检测过程中往往存在完整景物被割裂的现象, 因此通过上述方法提取的疑似目标中, 仍存在较多的地物、云层干扰。由于真实目标处于较为均匀的天空背景, 而被割裂的地物、云层的邻域背景较为复杂, 通过计算疑似目标外接矩形带邻域(图 5 阴影部分)的特征值, 可以判别该目标是否处于天空背景, 从而将地物、云层干扰予以剔除。

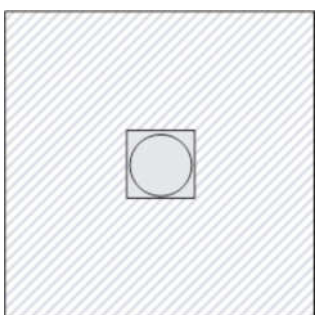


图 5 目标邻域示意图

Fig.5 Schematic diagram of target neighborhood

常用的目标邻域特征值有均值 I_{mean} 、方差 I_{std} 和亮像素占空比 I_{ocp} 等^[9], 其计算公式分别为:

$$I_{mean} = \frac{1}{N \times N} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N I(x, y) \quad (3)$$

$$I_{std} = \frac{1}{N \times N} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N (I(x, y) - I_{mean})^2 \quad (4)$$

$$I_{ocp} = \frac{M}{N \times N} \quad (5)$$

式中: $I(x, y)$ 为邻域图像各像素点的灰度值; N 为邻域图像大小 (特征值统计时去除目标所在区域); M 为邻域图像中判定为亮像素点 (像素灰度值 $> Th_{brightGray}$) 的数目, 通过对大量均匀天空背景滤波后图像数据进行统计, 均匀天空背景滤波图像噪声灰度值 < 130 的概率达 95%, 因此取亮像素判定阈值 $Th_{brightGray}$ 为 130。

图 6(a) 为一张均匀天空背景下的无人机图像, 图 6(b) 为一张有较多地物背景的背景图像, 图 6(c)、6(d) 分别为图 6(a)、6(b) 的滤波后图像。

分别选取不同大小的无人机邻域、地物背景邻域, 统计其灰度均值、方差、亮像素占空比(用亮像素个数表示)3 个特征参数, 结果如表 1 所示。无人机邻域与地物背景邻域的特征参数值差异越大, 越有利于

对二者进行区分^[10], 从表 1 可以看出, 相比灰度均值, 方差和亮像素数有较好的区分度, 且随着邻域尺寸的增大, 方差的区分度变化不大, 而亮像素数的区分度随邻域尺寸的增大呈现变大的趋势。由于方差的计算量最大, 为降低算法处理时间, 这里选亮像素数作为特征值进行疑似目标是否处于天空背景的判断, 即邻域亮像素数小于阈值 $Th_{brightPixNum}$ 则认为疑似目标处于天空背景, 否则认为疑似目标为地物或云干扰。

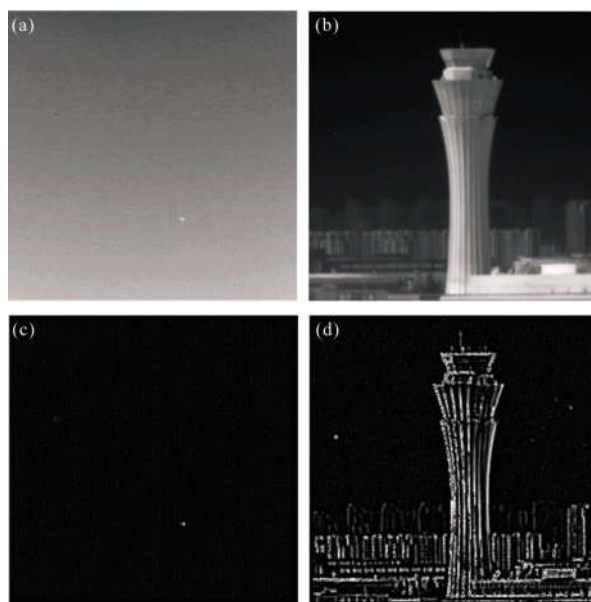


图 6 一组典型天空、地物背景原始及滤波图像

Fig.6 A set of typical raw and filtered images of the sky, ground objects background

表 1 特征参数统计结果

Tab.1 Statistical results of feature parameters

Regional types	Neighborhood size/pixel	Mean	Variance	Bright pixels
UAV neighborhood	10×10	58	3.5	1
	15×15	52	3.8	3
	20×20	49	3.6	5
	25×25	40	3.8	6
Background1 neighborhood	10×10	74	52	16
	15×15	78	48	23
	20×20	71	51	38
Background2 neighborhood	25×25	69	46	42
	10×10	87	30	14
	15×15	82	30	28
	20×20	89	27	40
	25×25	83	35	49

2.4 多帧图像目标信息相关

根据目标邻域特征值对疑似目标进行筛选后,对剩余目标按灰度均值由大到小排序,根据目标总量去掉排序靠后的若干个目标,将目标个数限定在一定范围内。根据无人机等低慢小目标在红外搜索系统相邻两周成像的角度偏差量较小,且飞行航迹无特定规律等特点,设计了多帧图像目标信息相关算法,流程如图 7 所示。

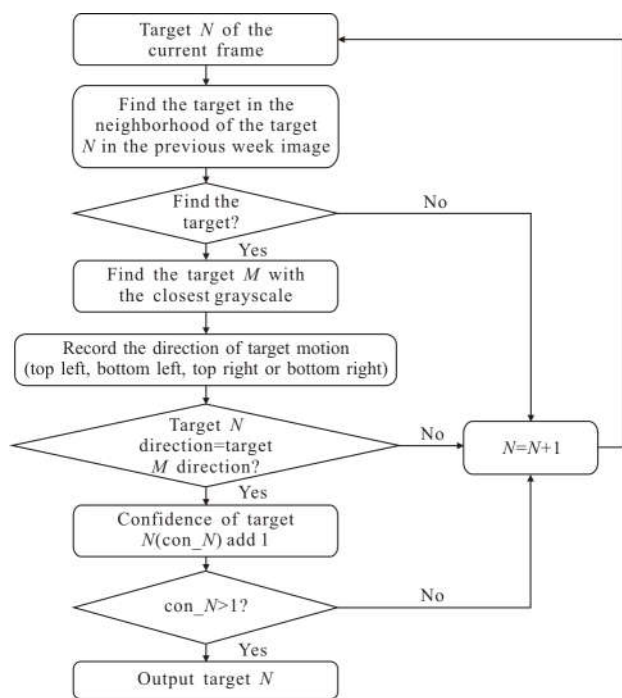


图 7 多帧图像目标信息相关算法流程图

Fig.7 Flow chart of target information related algorithm based on multi-frame image

通过多帧图像目标信息相关,进一步剔除了飞鸟等不稳定出现的干扰目标,保留了符合低慢小运动特征的目标。在一定范围内,连续帧数 N 取值越大,目标检测结果的置信度越高,但系统的检测反应速度也随之降低。

3 实验结果

3.1 边缘检测法疑似目标提取结果

图 8(a)为红外搜索系统采集的一组周视图像,采用 2.1 节图 4(a)所示滤波参数对图像进行高通滤波。设调节系数 $a=3$,由 2.2 节公式(1)求得灰度检测阈值 $Th_{gray}=302$,取系数 $b=0.6$,由 2.2 节公式(2)求得边缘检测阈值 $Th_{edge}=181$ 。设定疑似目标尺寸不大于

10×10 pixel,根据灰度检测阈值 Th_{gray} 和边缘检测阈值 Th_{edge} 检测图像中的疑似目标,并取灰度均值由大到小排序前 8 个目标,得到检测结果如图 8(b)所示,图 8(c)为图 8(b)中 3 处地物虚警的放大后图像,从图中可以看出虚警点本身与无人机目标特性极为相似,利用目标灰度、尺寸等特征难以将其剔除。

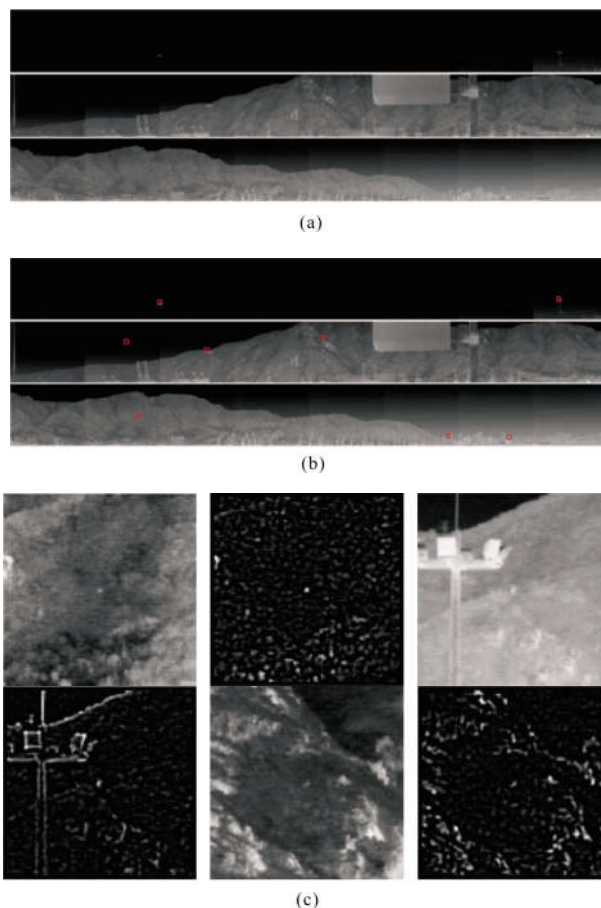


图 8 边缘检测法疑似目标提取结果

Fig.8 Edge detection method to extract suspected targets

3.2 邻域特征值法剔除背景干扰

采用邻域特征值统计法对边缘检测提取的疑似目标进行筛选,设邻域亮像素判定阈值 $Th_{brightGray}=130$,邻域亮像素数阈值 $Th_{brightPixNum}=10$,分别取邻域尺寸 $Neigh_Size=10$ 、邻域尺寸 $Neigh_Size=15$ 、邻域尺寸 $Neigh_Size=20$,得到目标检测的结果如图 9(a)~(c)所示。图中按灰度均值由高到低对疑似目标进行编号(即目标灰度均值越大,编号越小),其中图 9(a)中疑似目标 6 为无人机,疑似目标 2、3、4、5 为地物虚警,疑似目标 1 为鸟虚警(图 9(b)、9(c)中目标类型参考图 9(a))。由图 9 可见,在一定范围内,增大邻域尺寸

有利于排除地物背景干扰,但邻域尺寸过大会导致临近云层或地物的目标被剔除,降低目标的检测概率,实验发现邻域尺寸取 20 效果较好。

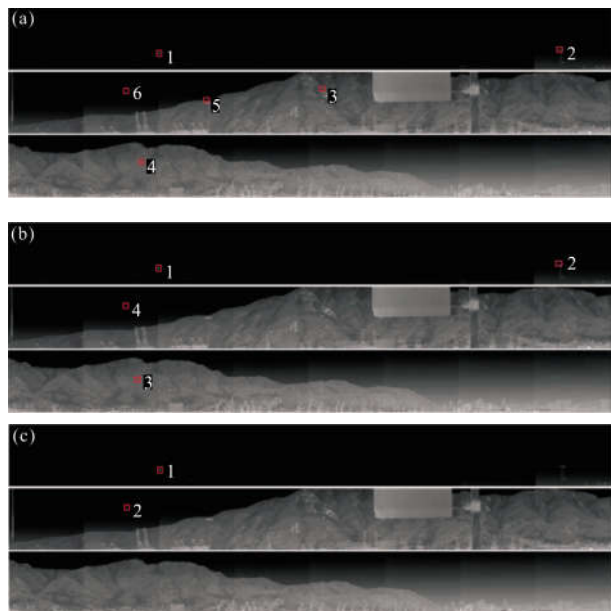


图 9 地物干扰剔除结果

Fig.9 Ground object interference rejection results

3.3 多帧图像目标检测

经过上述处理过程,仍有空中飞鸟、少数地物及碎云干扰,利用无人机的运动特征,采用多帧图像目标信息相关算法进一步剔除上述虚警,得到最终无人机目标检测结果如图 10 所示。



图 10 目标航迹判别结果

Fig.10 Target track discrimination results

3.4 检测结果数据统计

针对距离 0.2~1.5 km 的大疆精灵 3 无人机目标,在不同背景环境下采集 100 组周视图像数据(每组包含 48 帧 640×512 分辨率的图像,100 组共计 4 800 帧图像)进行目标检测测试。图像数据集中真实无人机目标数 $T_{true}=89$,利用文中算法检测出正确目标数 $D1_{true}=85$,检测出虚假目标数 $D1_{false}=7$;利用传统 LCM 算法检测出正确目标数 $D2_{true}=80$,检测出虚

假目标数 $D1_{false}=11$,由公式(6)、(7)计算两种算法的目标检测概率和虚警率如表 2 所示,可见文中方法的目标检测概率和虚警率均优于传统 LCM 算法。

$$p_{true} = \frac{D_{true}}{T_{true}} \quad (6)$$

$$p_{false} = \frac{D_{false}}{D_{false} + D_{true}} \quad (7)$$

表 2 不同算法检测结果对比

Tab.2 Comparison of detection results with different algorithms

Algorithm	Correct target	False target	Detection probability	False alarm rate
LCM	80	11	89.89%	12.09%
Proposed algorithm	85	7	95.51%	7.61%

4 结论

文中基于红外搜索系统,设计了一种适于工程化应用的复杂低空背景下低慢小目标检测算法,具有时间复杂度低、占用硬件资源少、对搜索转台稳定精度要求低等特点,目前该算法已成功移植于文中红外搜索系统的 FPGA+双 DSP 信息处理硬件平台,并随系统多次成功完成无人机目标探测任务。针对不同地点和天气条件,通过外场实物测试和实验室条件下对大量采集图像的仿真测试,结果表明:该算法的平均探测概率超过 90%,且对地物、云、飞鸟等具有较强的抗干扰能力,具有较高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] Shen Yang, Tang Mingwen. Overview of airborne infrared search and tracking system (IRST)[J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(1): 13-18. (in Chinese)
申洋,唐明文. 机载红外搜索跟踪系统(IRST)综述[J]. 红外技术, 2003, 25(1): 13-18.
- [2] Zhu Zhenping. Research on the target detection technology of peripheral infrared search system [D]. Changsha: University of National Defense Science and Technology, 2011: 29-30. (in Chinese)
朱振平. 周视红外搜索系统目标检测技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 29-30.
- [3] Qi S, Ma J, Tao C, et al. A robust directional saliency-based method for infrared small-target detection under various

- complex backgrounds [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 495–499.
- [4] Chen C L P, Li H, Wei Y, et al. A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 574–581.
- [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): 0726002. (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.
- [6] Zeng Ming, Li Jianxun. Infrared dim target detection method based on adaptive morphological Top-Hat filter [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(1): 90–93. (in Chinese)
曾明, 李建勋. 基于自适应形态学 Top-Hat 滤波器的红外弱小目标检测方法 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(1): 90–93.
- [7] Wang X, Lv G, Xu L. Infrared dim target detection based on visual attention[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(6): 513–521.
- [8] Frank Y Shih, Wu Yita. Decomposition of arbitrary gray-scale morphological structuring elements [J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(12): 2323–2332.
- [9] Wang Kang. A detection algorithm for infrared dim target in complicated sea-sky background [J]. *Optical and Optoelectronic Technology*, 2016, 14(3): 2–3. (in Chinese)
王康. 一种复杂海天背景下红外弱小目标检测算法[J]. 光学与光电子技术, 2016, 14(3): 2–3.
- [10] Wang Peizao, Wang Weihua, Wang Haisong, et al. Infrared target detection based on the multi-level synthesis classifier [J]. *Software Engineering*, 2017, 20(12): 4–6. (in Chinese)
王培早, 王卫华, 王海松, 等. 基于多级综合分类器的红外目标检测[J]. 软件工程, 2017, 20(12): 4–6.