

用于无人机探测系统的红外小目标检测算法

张明淳, 牛春晖, 刘力双, 刘洋

Infrared small target detection algorithm for UAV detection system

引用本文:

张明淳, 牛春晖, 刘力双, 刘洋. 用于无人机探测系统的红外小目标检测算法[J]. *激光技术*, 2024, 48(1): 114–120.

ZHANG Mingchun, NIU Chunhui, LIU Lishuang, et al. Infrared small target detection algorithm for UAV detection system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 48(1): 114–120.

您可能感兴趣的其他文章

1. 焊接缺陷磁光成像噪声特征分析及处理算法

引用本文: 田猛, 高向东, 谢岳轩, 等. 焊接缺陷磁光成像噪声特征分析及处理算法[J]. *激光技术*, 2023, 47(5): 646–652.

2. 改进蝙蝠算法的紫外光引导无人机路径规划

引用本文: 赵太飞, 容开新, 王一琼, 等. 改进蝙蝠算法的紫外光引导无人机路径规划[J]. *激光技术*, 2023, 47(5): 678–685.

3. 基于双邻域对比度的红外小目标检测算法

引用本文: 朱金辉, 张宝华, 谷宇, 等. 基于双邻域对比度的红外小目标检测算法[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 794–798.

4. 无人机激光无线能量传输APT系统跟踪设计

引用本文: 时振磊, 孟文文, 申景诗, 等. 无人机激光无线能量传输APT系统跟踪设计[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 809–814.

5. 基于引导滤波和模糊算法的红外背景抑制算法

引用本文: 郭佩瑜, 张宝华. 基于引导滤波和模糊算法的红外背景抑制算法[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 854–858.

文章编号: 1001-3806(2024)01-0114-07

用于无人机探测系统的红外小目标检测算法

张明淳, 牛春晖*, 刘力双, 刘洋

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192, 中国)

摘要: 为了解决无人机探测系统中目标检测算法在不同场景下适用性差、虚警率高的问题, 采用可应用于不同复杂背景的红外小目标检测算法, 设计了一种基于现场可编程门阵列与数字信号处理器架构的无人机探测系统。首先利用双边滤波算法平滑背景, 保留目标区域边缘; 再使用改进的多尺度顶帽算法进行目标增强和背景抑制, 来提高目标区域与周围区域的差异对比; 最后使用基于最大值和平均值的自适应阈值分割方法提取目标。结果表明, 实验测得系统的检测率为 98.15%, 整体时延为 33.33 ms, 与现有典型红外小目标检测算法相比, 该算法的信噪比增益和背景抑制因子分别平均提高 6.8 倍和 7.44 倍, 有效地抑制了背景, 增强了目标。该算法能有效解决复杂背景下的红外小目标检测问题, 对提高无人机探测系统在不同场景下的适用能力与检测能力是有帮助的。

关键词: 图像处理; 小目标检测; 双边滤波; 改进 top-hat 算法; 自适应阈值

中图分类号: TP391; TN215 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.01.018

Infrared small target detection algorithm for UAV detection system

ZHANG Mingchun, NIU Chunhui*, LIU Lishuang, LIU Yang

(School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor applicability and high false alarm rate of target detection algorithm in unmanned aerial vehicle (UAV) detection systems in different scenarios, a UAV detection system based on a field-programmable gate array (FPGA) and digital signal processor architecture was designed by using infrared small target detection algorithm which could be applied to different complex backgrounds. Firstly, a bilateral filter algorithm was used to smooth the background and preserve the edge of the target region. Then, an improved multi-scale top-hat algorithm was adopted to enhance the target and suppress the background to improve the contrast difference between the target and the surrounding area. Finally, the adaptive threshold segmentation method based on maximum and average values was used to extract the target. The experimental results show that the detection rate of the system is 98.15%, and the overall delay is 33.33 ms. Compared with the existing typical infrared small target detection algorithms, the signal-to-noise ratio gain and background suppression factor of this proposed algorithm are increased by 6.8 times and 7.44 times on average, respectively, which effectively suppresses the background and enhances the target. The algorithm can effectively solve the problem of infrared small target detection in complex backgrounds, and it is helpful to improve the applicable ability and detection ability of the UAV detection system in different scenarios.

Key words: image processing; small target detection; bilateral filtering; improved top-hat algorithm; adaptive threshold

0 引言

随着无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 技术的快速发展以及其产品的大量应用, 面对日趋严重的无人机威胁, 世界各国对无人机探测系统的需求不断上升。现有常用探测方法主要为无线电探测、红外探测、雷达探测和光电探测等^[1]。其中红外探测不易受

夜晚和不良气候条件影响, 可以全天候工作, 且无需主动向外发射电磁波, 具有很高的隐蔽性, 因此作为一种理想的目标探测方式, 备受专家学者们的关注。远距离无人机目标在红外图像中所占像素较少; 同时, 在受到云层、噪声等复杂背景影响时, 会加大目标检测难度。作为无人机探测系统中的一项关键技术, 红外小目标检测算法^[2]的研究对于提高无人机探测系统在不同场景下的适用性具有重要作用。

LI^[3]提出了基于粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 的先检测后跟踪 (detect before track,

* 通信作者: niuchunhui@bistu.edu.cn

收稿日期: 2022-12-19; 修回日期: 2023-02-09

DBT)算法,使用 5×5 大小的固定权值矩阵对图像背景进行预测,并与原图作差得到残差图像,最后通过 PSO 算法计算最佳阈值对其进行阈值分割,剔除背景与虚警,得到真实目标。HU 等人^[4]基于硬件平台,研究了一种中值滤波硬件优化算法^[5],提出基于行复杂度的背景分离方法提取目标。ZHAO 等人^[6]采用基于时空上下文(space time context, STC)的跟踪算法进行建模,通过当前目标位置和上下文位置的时空关系估算下一帧目标位置,同时由高斯曲率滤波(Gaussian curvature filtering, GCF)进行预处理^[7],保持边缘去除噪声,得到较为准确的下一帧目标置信图来估算目标位置,一定程度上提高了目标跟踪精度,具有较好的实时性。

现有的检测算法在目标背景较为简单时有较好效果,但面对复杂背景中的目标,其检测效果并不理想,导致无人机探测系统不具备适用性。

为满足不同场景下无人机目标检测需求,本文作者对无人机探测系统的结构组成进行了阐述,采用现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)加数字信号处理器(digital signal processor, DSP)架构进行图像采集与目标检测。在此基础上,针对复杂背景下无人机目标成像特性,提出一种基于双边滤波的多尺度改进 top-hat 红外小目标检测算法。为了验证该算法的检测效果,选取云层、山地和森林等不同背景的图像序列,分别从主观上和客观上进行对比实验。

1 无人机探测系统组成

无人机探测系统主要由图像采集模块(image acquisition module)、图像处理模块(image processing module)以及人机交互模块(human-computer interaction module)三部分组成,能够对视场内的无人机进行远距离探测。图像采集模块由长波红外凝视光学系统与非制冷长波红外焦平面探测器组成^[8]。无人机探测系统以凝视方式工作,无需通过旋转和扫描获取图像,由于省去了制冷模块与笨重的转台,因此具有体积小、质量轻、功耗低的优势。

图像数据处理采用国产 FPGA+DSP 架构^[9]。其中 FPGA 具有现场可编程特性,主要负责接口以及图像预处理;DSP 负责后续的图像处理、目标检测等工作^[10]。无人机目标向外界发射热辐射信号,热辐射经过光学系统采集后进入到红外探测器,经过数字摄像机和图像采集卡之间的接口传输给 FPGA;FPGA 完成采集数字图像信号、数字图像解调及预处理工作;图像

数据在 FPGA 与 DSP 之间通过高速串行输入输出口(serial rapid input output, SRIO)进行高速传输;DSP 完成图像处理并将检测到的目标信息传给 FPGA,最后通过通用异步收发器(universal asynchronous receiver transmitter, UART)发送给上位机。系统结构如图 1 所示。

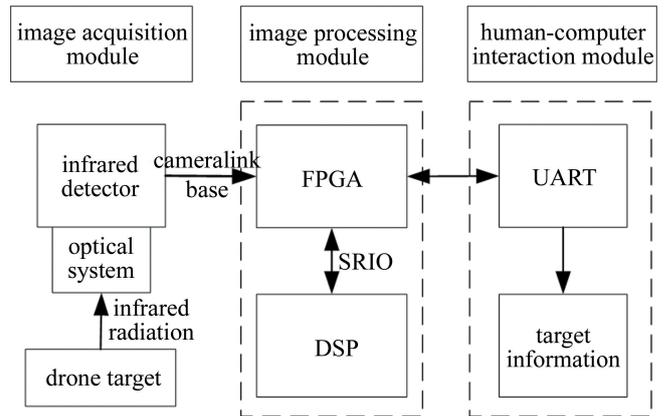


图 1 系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of system structure

2 目标检测算法

通常情况下,当无人机目标距离较远时,其红外辐射能量较弱,导致其在红外图像中所占的像素较少,表现为典型的红外弱小目标^[11]。另一方面,当无人机所处位置有云层遮挡,环境较为复杂时,易受噪声和背景杂波的干扰和影响,导致目标信噪比和对比度都非常低,进一步加大了检测的难度^[12]。为了能准确检测无人机目标,本文中采用基于双边滤波(bilateral filters, BF)的多尺度改进顶帽(top-hat)算法检测目标,并利用基于最大值和平均值的自适应阈值分割方法进行目标提取,流程图如图 2 所示。算法的多尺度体现在对

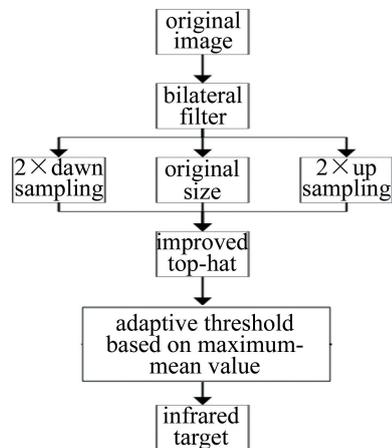


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

双边滤波之后的图像,分别在升采样与降采样之后进行改进 top-hat 处理,并与原尺寸改进 top-hat 处理之后的图像进行融合。当目标较小时,升采样可以扩大目标,当目标较大时,降采样可以缩小目标,从而便于检测。将其部署到不同的 DSP 物理核心中,在保证效率的同时提高检测率^[13]。

2.1 双边滤波

双边滤波是一种典型的非线性滤波算法^[14]。其设计思想源于高斯滤波算法,通过像素强度的变化表征并保存边缘信息,能够有效地解决由于滤波引起的边缘模糊问题^[15]。双边滤波同样采用加权平均,目标位置的像素值为其周围像素值的加权平均。不同于高斯滤波只考虑目标与周围像素的欧氏距离,双边滤波还将目标与周围像素的灰度距离考虑在内^[16]。图像 I 在像素点 $I(x, y)$ 的双边滤波可以表示为:

$$I_{\text{BF}}(p) = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) \times G_{\sigma_r}(|I(p) - I(q)|) I(q) \quad (1)$$

$$W_p = \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I(p) - I(q)|) \quad (2)$$

式中: $I_{\text{BF}}(p)$ 为去噪后的图像; $I(p)$ 为更新的像素值; $I(q)$ 为邻域像素值; S 表示滤波窗口; W_p 为归一化参数; G_{σ_s} 为空间域核,本质为空间函数,用来降低距离较远的像素对要更新的像素的干扰; G_{σ_r} 为像素域核,本质为范围函数,其用来降低与要更新的像素灰度值不同的像素 q 的干扰。 G_{σ_s} 和 G_{σ_r} 定义为:

$$G_{\sigma_s}(\|p - q\|) = \exp\left[-\frac{(i-m)^2 + (j-n)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (3)$$

$$G_{\sigma_r}(|I(p) - I(q)|) = \exp\left(-\frac{[I(i, j) - I(m, n)]^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (4)$$

式中: σ_s 、 σ_r 分别为高斯距离标准差和高斯灰度标准差,用来衡量图像 I 的滤波量; (m, n) 为目标位置相邻像素的坐标; (i, j) 为当前被卷积目标像素的坐标。在图像灰度值差异不大的区域, $I(m, n)$ 与 $I(i, j)$ 大小接近,此时 G_{σ_r} 近似于 1,与高斯滤波的作用并无太大差别,不能很好地表征并保留图像细节纹理部分;在图像灰度值差异较大的区域, $I(m, n)$ 与 $I(i, j)$ 相差较大,此时 G_{σ_r} 不能近似于 1,由于将目标位置像素点相邻位置的灰度值差异计算在内,因此可以很好地表征并保留图像边缘信息。

2.2 改进 top-hat 算法

数学形态学的各种运算都是基于腐蚀 ($f \otimes b$) 和

膨胀 ($f \oplus b$) 两个基本运算^[17],其公式为:

$$(f \otimes b)(x, y) = \min_{(i, j)} (f(x+i, y+j) - b(i, j)) \quad (5)$$

$$(f \oplus b)(x, y) = \max_{(i, j)} (f(x-i, y-j) + b(i, j)) \quad (6)$$

式中: $f(x, y)$ 代表原始灰度图像; $b(i, j)$ 代表结构算子; (x, y) 和 (i, j) 分别表示图像和结构算子中的像素坐标。为有效利用目标区域与周围区域的差异,定义结构算子 B_{in} 和 B_{out} ,二者形状相同但大小不同,尺寸较小的 B_{in} 为最内层结构算子,尺寸较大的 B_{out} 为最外层结构算子^[18]; B_b 是位于 B_{in} 和 B_{out} 之间的结构算子,其大小介于二者之间,用来调节参与运算的目标区域的大小; $\Delta B = B_{\text{out}} - B_{\text{in}}$ 为环形结构,用来体现目标位置与周围区域的差异。 B_{in} 、 B_{out} 、 ΔB 和 B_b 之间的关系如图 3 所示。

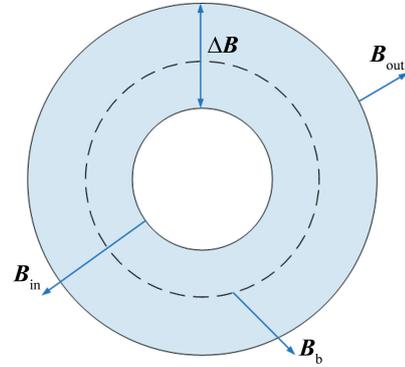


图 3 结构算子之间的关系

Fig. 3 Relationships between structural operators

定义运算 $f \otimes B_{\text{out-in}}$: 先膨胀后腐蚀。 $f \otimes B_{\text{out-in}}$ 定义为:

$$f \otimes B_{\text{out-in}}(x, y) = (f \oplus \Delta B) \otimes B_b \quad (7)$$

式中: $B_{\text{out-in}}$ 表示运算 $f \otimes B_{\text{out-in}}$ 中用到的结构算子,和 B_{in} 、 B_{out} 有关^[19]。

改进 top-hat 算法 $N_{\text{top-hat}}(x, y)$ 定义为:

$$N_{\text{top-hat}}(x, y) = f(x, y) - f \otimes B_{\text{out-in}}(x, y) \quad (8)$$

对于红外图像中的亮目标区域,改进 top-hat 算法首先使用环状结构 ΔB 膨胀,利用目标周围区域像素值替代目标位置像素值;其次使用结构算子 B_b 腐蚀,利用目标周围区域像素最小值替代目标位置像素值;最后将原图与经过 $f \otimes B_{\text{out-in}}$ 运算之后的图像作差得到目标图像。

2.3 自适应阈值分割

本文中采用基于最大值与平均值的自适应阈值,对经过目标增强之后的图像 I 进行二值化目标提取,计算公式为:

$$E_{\text{th}} = \lambda E_{\text{max}} + (1 - \lambda) E_{\text{mean}}, (\lambda \in (0, 1)) \quad (9)$$

式中: E_{th} 为计算所得阈值; E_{max} 为图像 I 中的像素最

大值; E_{mean} 为图像 I 中的像素均值; λ 为调参系数,这里 λ 取值为 0.7,用于对单目标检测。当检测多目标图像时,可修改 λ 值在 0.4~0.5 之间会有较好效果,从而降低漏检率。通过阈值判断,得到二值化图像 $I_{\text{out}}(x,y)$,其判断公式为:

$$I_{\text{out}}(x,y) = \begin{cases} 1, & (I(x,y) \geq E_{\text{th}}) \\ 0, & (I(x,y) < E_{\text{th}}) \end{cases} \quad (10)$$

3 实验过程与分析

3.1 本文中所提算法效果

本文中提出一种基于双边滤波的多尺度改进 top-hat 红外小目标检测算法。首先采用双边滤波平滑背景,保留目标区域边缘,滤波窗口 S 取值为 5×5 ,两个标准差参数 σ_s, σ_r 分别取值为 6 和 0.01;其次,利用改进 top-hat 算法对红外图像进行目标增强,提高目标区域与周围区域差异,结构算子 B_{in} 和 B_{out} 分别取值为 2 和 4;最后,根据式(9),使用所提出的基于最大值和平均值的自适应阈值分割方法对红外无人机目标进行提取, λ 取值为 0.7。算法实现效果如图 4 所示。

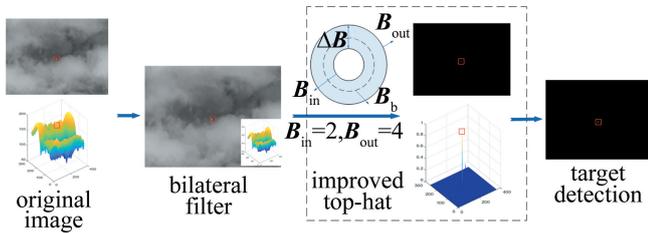


图 4 算法实现效果
Fig. 4 Effect of algorithm

3.2 算法对比

为了验证该算法的检测效果,本文中从主观和客观上对比实验,评价算法检测效果。采用复杂云层背景 (complex cloud background)、山地背景 (mountain background) 和森林背景 (forest background) 以及空天背景 (sky multiple targets) 4 组单目标或多目标红外图像序列进行了仿真实验。在 Windows11 MATLAB 2020b 环境下,分别应用局部对比度方法 (local contrast method, LCM)、顶帽算法 (top-hat)、多尺度块对比度方法 (multiscale patch-based contrast method, MPCM) 和高斯-拉普拉斯 (Laplace of Gaussian, LoG) 4 种现有的典型红外小目标检测算法作为对比算法。表 1 中介绍了实验数据的详细信息,图 5、图 6 中分别给出了 4 组红外小目标序列图像在各个算法下的检测结果与同一阈值处理后的结果。

从实验结果可以看出,LCM 算法检测结果中伴随

表 1 序列图像描述

Table 1 Sequential image description

image sequence	image size	target number	target size	image background (random background noise and system interference)
Seq. 1	256×256	1	3×3	complex cloud background
Seq. 2	256×256	1	3×3	mountain background
Seq. 3	256×256	1	3×3	forest background
Seq. 4	256×256	2	3×3	sky multiple targets

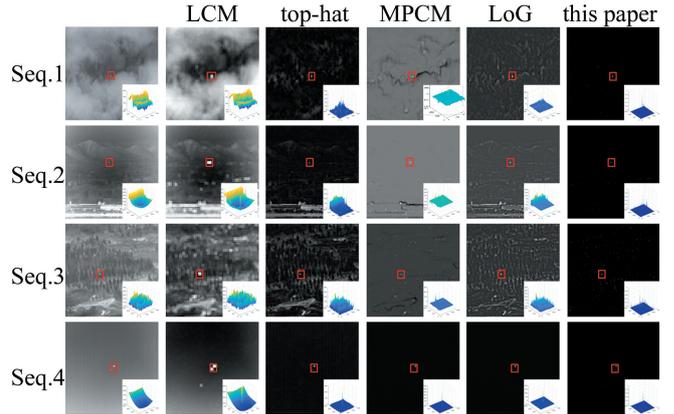


图 5 5 种算法处理后的序列图像

Fig. 5 Sequence image processed by five algorithms

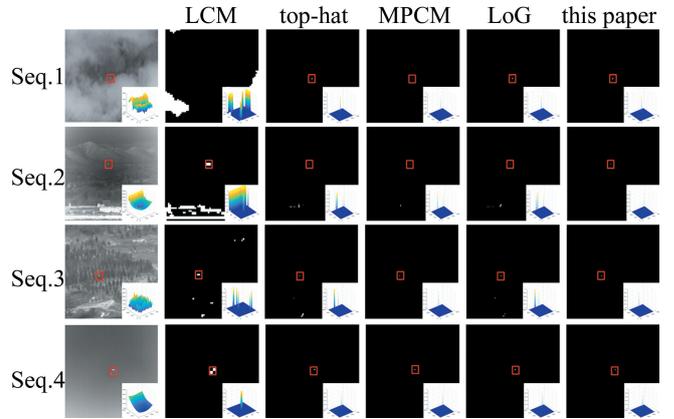


图 6 同一阈值处理后的序列图像

Fig. 6 Sequence image after same threshold processing

大量的虚警目标, top-hat 算法与 LoG 算法检测结果中伴随部分虚警目标, MPCM 算法在山地背景中伴随少量虚警目标, 相比之下, 本文中所提算法能准确分离目标, 对不同背景下的红外序列图像具有较好的检测效果。

从客观上评价算法效果, 采用信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR)、信噪比增益 (SNR gain, SNRG) 和背景抑制因子 (background suppression factor, BSF) 作为评价指标^[20]。SNR 和 SNRG 定义为:

$$E_{\text{SNR}} = \frac{|\mu_t - \mu_b|}{\sigma_b} \quad (11)$$

$$E_{\text{SNRG}} = \frac{E_{\text{SNR, out}}}{E_{\text{SNR, in}}} \quad (12)$$

式中: μ_t 表示目标位置所有像素的平均值; μ_b 表示背景部分所有像素的平均值; σ_b 表示背景部分所有像素值的标准差; $E_{\text{SNR},\text{in}}$ 表示算法处理前的信噪比值; $E_{\text{SNR},\text{out}}$ 表示算法处理后的信噪比值。 E_{SNR} 越大, 表示目标越容易被检测到; E_{SNRG} 越大, 表示对目标信号的增强性能越好。

背景抑制因子 BSF 用来表示对背景的抑制能力, BSF 定义为:

$$E_{\text{BSF}} = \frac{\sigma_{\text{in}}}{\sigma_{\text{out}}} \quad (13)$$

式中: σ_{in} 和 σ_{out} 分别表示原图与处理后图像中完整背景的标准差。 E_{BSF} 值越高, 抑制效果越好。

5种算法在 Seq. 1~Seq. 3 场景下的 SNRG 和 BSF 如表 2 所示。

表 2 5种算法在前3组场景下的 SNRG 与 BSF 值

Table 2 Sequence images describe the SNRG and BSF values of the five algorithms in the first three sets of scenes

evaluation index	image sequence	LCM	top-hat	MPCM	LoG	this paper
SNRG	Seq. 1	7.78	231.21	112.09	317.64	1517.63
	Seq. 2	0.38	2.61	9.85	8.04	38.79
	Seq. 3	0.05	2.29	9.04	5.15	16.21
BSF	Seq. 1	0.98	6.73	0.50	7.36	26.53
	Seq. 2	0.93	2.07	2.81	2.94	25.72
	Seq. 3	0.83	1.42	3.43	1.56	6.79

由实验结果可以看出, 本文中所提算法在不同复

杂背景的红外序列图像中的 SNRG 和 BSF 值最大, 分别平均提高了 6.8 倍和 7.44 倍, 表明本文中所提算法在目标增强和背景抑制方面都优于其它 4 种比较算法。

为了进一步验证该算法与其它 4 种算法相比的优越性能, 通过接受者操作特性 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线^[21]来表征目标检测过程中检测率和虚警率关于阈值的相关关系。根据式(9), 使用所提出的基于最大值和均值的自适应阈值分割方法, 通过设置不同的 λ 值来调整阈值门限 E_{th} , 绘制 ROC 曲线。检测率 F_d 和虚警率 F_a 定义为:

$$F_d = \frac{n_t}{N_t} \quad (14)$$

$$F_a = \frac{n_f}{N} \quad (15)$$

式中: n_t 表示检测出来的真实目标个数; N_t 表示真实目标个数; n_f 表示虚假目标数; N 表示总像素数^[22]。

以 F_d 作为纵坐标, F_a 作为横坐标绘制 ROC 曲线。通常情况下, 曲线距离左上方越接近, 即 F_d 较高, F_a 较低, 说明该算法的检测效果越好。选取 Seq. 1~Seq. 3 这 3 组序列图像进行实验测试, 分别为复杂云层背景、山地背景和森林背景。由图 7 可以看出, 和其它 4 种算法相比, 本文中所提算法 (红色实线、空圆标记符) 总是能率先趋近于 1, 能在 10^{-6} 数量级的虚警率下无限接近于 100% 的检测率。

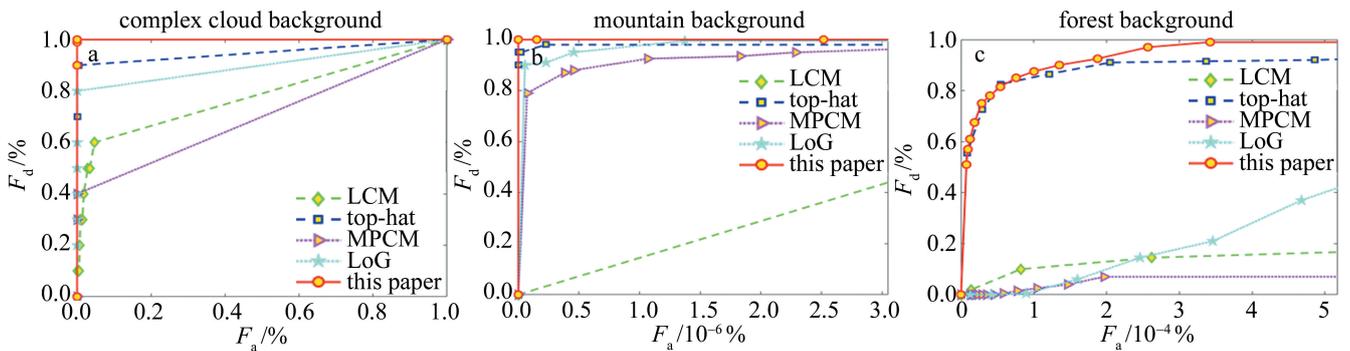


图 7 不同算法的 ROC 曲线

Fig. 7 ROC curves of different algorithms

通过上述实验结果可以看出, 与 LCM、top-hat、MPCM 和 LoG 这 4 种典型红外小目标检测算法相比, 本文中所提算法的 SNRG 和 BSF 值分别平均提高了 6.8 倍和 7.44 倍, 在目标增强和背景抑制方面都优于其它 4 种比较算法; 同时, 由 ROC 曲线可以看出, 该算法在更低的虚警率下有更高的检测率, 其整体的处理效果要优于其它 4 种典型的红外小目标检测算法, 具有较强的适用性与鲁棒性。

3.3 系统性能测试

为了验证无人机探测系统在实际使用场景下的性能, 通过外场实验对其进行测试, 具体测试场景如图 8 所示。其中 1 为 220 V 户外移动电源, 2 为上位机, 3 为 28 V 线性电源, 4 为无人机探测装置, 5 为供电接口, 6 为数据接口与线缆。

实验过程中, 将无人机探测装置固定于实验平台上, 采用四旋翼无人机作为红外目标, 控制无人机攀升

至距离地面 200 m 高度,并在成像系统视场内飞行,最后利用无人机探测系统对无人机目标进行检测。图 9、图 10 分别为单帧检测效果和连续多帧检测效果。

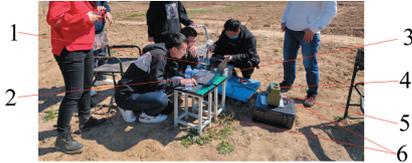


图 8 外场测试场景
Fig. 8 Outdoor test scenario

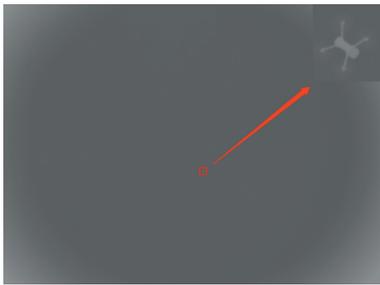


图 9 单帧检测效果
Fig. 9 Single frame detection effect

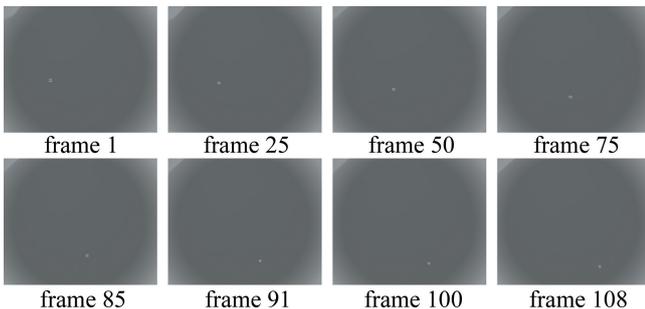


图 10 多帧检测效果
Fig. 10 Multi-frames detection effect

为了客观评价系统在实际场景下的检测效果,对连续帧下的检测数据进行分析,在 108 帧图像中成功检测并框出目标位置的有 106 帧,系统的检测率为 98.15%。由此可以看出,无人机探测系统在实际使用场景下的检测率能够达到预期效果。

为了验证目标检测算法的实时性,采用代码调试器(code composer studio, CCS)中的 clock 计时器功能计算目标检测算法所花费的时间。如图 11 所示,DSP 中图像处理所花费的时间为 19.92 ms。系统中探测器的输出帧频为 30 Hz,所以 FPGA 采集一帧图像的时间为 33.33 ms,减去 SRIO 与 UART 的传输时延,大概为 32 ms,远大于 DSP 完成目标检测的时间。因此,当目标出现在当前帧并被检测到时,系统在采集下一帧图像时即可获取目标相关信息,不会出现丢帧、漏检的情况,具有较强的实时性。

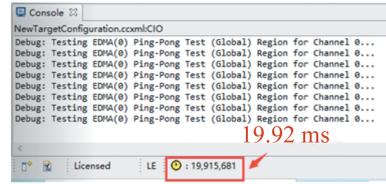


图 11 目标检测时间

Fig. 11 Target detection time

通过上述实验结果可以看出,本文中所设计并实现的无人机探测系统能够准确检测出 200 m 高度的四旋翼无人机小目标;通过多帧目标检测实验,系统的检测率为 98.15%,能够达到预期效果;另外系统图像处理花费时间为 19.92 ms,远小于 33.33 ms 的系统整体时延,具有较强的实时性。

4 结 论

介绍了基于国产 FPGA 与 DSP 架构的无人机探测系统的组成模块及工作原理,通过分析无人机目标的成像特点,提出了一种可应用于复杂背景的红外弱小目标检测算法。采用基于双边滤波的多尺度改进 top-hat 算法进行目标增强与背景抑制,并使用基于最大值和平均值的自适应阈值分割方法对无人机目标进行提取。通过对云层、山地和森林等不同背景的图像序列进行定性和定量实验,结果表明,与其它 4 种算法相比,本文中所提算法具有较强的适用性与鲁棒性,能有效地检测出不同复杂背景下的无人机目标。

后续将在此研究的基础上,增加目标跟踪策略,进一步提高算法的工程适用能力。

参 考 文 献

- [1] QU X T, ZHUANG D Y, XIE H B. Detection methods for low-slow-small (LSS) UAV [J]. Command Control and Simulation, 2020, 42 (2): 128-135(in Chinese). 屈旭涛, 庄东晔, 谢海斌. “低慢小”无人机探测方法[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(2): 128-135.
- [2] ZHU J H, ZHANG B H, GU Y, et al. Infrared small target detection algorithm based on double neighborhood contrast[J]. Laser Technology, 2021, 45(6): 794-798(in Chinese). 朱金辉, 张宝华, 谷宇, 等. 基于双邻域对比度的红外小目标检测算法[J]. 激光技术, 2021, 45(6): 794-798.
- [3] LI D. Research on target detection algorithm in infrared warning system[D]. Xi'an: Xidian University, 2011: 1-67(in Chinese). 李丹. 红外告警系统中的目标检测算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011: 1-67.
- [4] HU W, WANG X H, ZHU H Y. Electro-optic and infrared and visible image fusion controlling the grayscale mutation of LNSST region [J]. Infrared Technology, 2018, 40(6): 563-568(in Chinese). 胡文, 王小华, 朱怀毅. LNSST 域灰度突变度的红外与可见光图像融合[J]. 红外技术, 2018, 40(6): 563-568.

- [5] PAN M S, TANG J T, YANG X L. An adaptive median filter algorithm based on B-spline function[J]. International Journal of Automation & Computing, 2011, 8(1): 92-99.
- [6] ZHAO D, ZHOU H X, YU J N, *et al.* Infrared dim target tracking in complex sky background[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(6): 27-34(in Chinese).
赵东, 周慧鑫, 于君娜, 等. 复杂天空背景下的红外弱小目标跟踪[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(6): 27-34.
- [7] HAN J H, LIANG K, ZHOU B, *et al.* Infrared small target detection utilizing the multiscale relative local contrast measure[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2018, 15(4): 612-616.
- [8] LIU W, NIU Y F, XIAO L L, *et al.* Development of infrared focal plane array and space-borne infrared imaging system[J]. Infrared, 2021, 42(11): 15-24(in Chinese).
刘炜, 牛誉霏, 肖龙龙, 等. 红外焦平面阵列及星载红外成像系统的发展[J]. 红外, 2021, 42(11): 15-24.
- [9] WANG Y J, WANG Y L, XIA R Q, *et al.* High precision target azimuth extraction in infrared wide field of view infrared alarm system[J]. Laser Technology, 2023, 47(2):200-204(in Chinese).
王云杰, 王艳林, 夏润秋, 等. 大视场红外告警系统中目标高精度方位提取[J]. 激光技术, 2023, 47(2):200-204.
- [10] SUN X F. Infrared dim targets detection based on the nationalization of multi-core DSP[J]. Digital Technology and Application, 2020, 38(10): 80-82 (in Chinese).
孙秀峰. 基于国产多核 DSP 的红外弱小目标检测算法[J]. 数字技术与应用, 2020, 38(10): 80-82.
- [11] RAZIYE E, ASKAR H. Infrared small target tracking algorithm based on meta-learning[J]. Laser Technology, 2021, 45(3): 396-404(in Chinese).
热孜亚·艾沙, 艾斯卡尔·艾木都拉. 基于元学习的红外弱小点状目标跟踪算法[J]. 激光技术, 2021, 45(3): 396-404.
- [12] GAO J Y, GUO Y L, LIN Z P, *et al.* Robust infrared small target detection using multiscale gray and variance difference measures[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(12): 5039-5052.
- [13] LIU X, LI X Y, LI L Y, *et al.* Dim and small target detection in multi-frame sequence using Bi-Conv-LSTM and 3D-Conv structure[J]. IEEE Access, 2021, 9(6): 135845-135855.
- [14] HONG C C, WANG X K, YU W W, *et al.* Leather defect detection based on improved bilateral filtering[J]. Laser Technology, 2021, 45(3): 373-377(in Chinese).
洪存存, 王雪琨, 于文文, 等. 基于改进双边滤波的皮革缺陷检测[J]. 激光技术, 2021, 45(3): 373-377.
- [15] GHOSH S, NAIR P, CHAUDHURY K N. Optimized Fourier bilateral filtering[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2018, 25(10): 1555-1559.
- [16] ZHU Zh Y, LOU K, GE H L, *et al.* Infrared target detection based on Gaussian model and Hungarian algorithm[J]. Enterprise Information Systems, 2022, 16(10/11): 1573-1586.
- [17] YE B, PENG J X. Small target detection method based on morphology top-hat operator[J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(7): 15-19(in Chinese).
叶斌, 彭嘉雄. 基于形态学 top-hat 算子的小目标检测方法[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(7): 15-19.
- [18] BAI X Zh, ZHOU F G. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J]. Pattern Recognition, 2009, 43(6): 2145-2156.
- [19] BAI X Zh, ZHOU F G, XIE Y Ch, *et al.* New top-hat transform and its application in infrared small target detection [J]. Data Acquisition and Processing, 2009, 24(5): 643-649.
白相志, 周付根, 解永春, 等. 新型 top-hat 变换及其在红外小目标检测中的应用[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(5): 643-649.
- [20] CHEN C 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, 2013, 52(1):574-581.
- [21] DU J M, LU H Zh, ZHANG L P, *et al.* A spatial-temporal feature-based detection framework for Infrared dim small target[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60(1): 1-12.
- [22] LIU Ch, YANG X G, LU R T, *et al.* A practical infrared time-sensitive dim target detection method for open space[J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(8): 7-12(in Chinese).
刘闯, 杨小冈, 卢瑞涛, 等. 一种实用的空地红外时敏弱小目标检测方法[J]. 电光与控制, 2022, 29(8): 7-12.