

基于统计特征的星图拖尾快速去除方法

王敏^{1,2} 常晓宇^{1,2} 孙康^{1,2} 陈金勇^{1,2} 孙方德^{1,2} 王港^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081;

2. 中电五十四所航天信息应用技术重点实验室 石家庄 050081)

摘要:现代光电望远镜技术快速发展,装备探测能力不断提高。星图中存在的拖尾现象,给天文定位处理的精度和时效性都带来了巨大的压力。星图对比度低,背景强弱分布不均,如何在去除拖尾直线噪声的同时,又保留星图的目标信息和目标定位精度,是一个具有挑战性的问题。提出一种基于统计特征的星图拖尾快速去除方法,通过星图目标信息统计规律实现对单帧图像拖尾目标直线的快速检测,利用插值技术快速完成星图拖尾直线去除,从而消除拖尾对空间目标检测的干扰,降低由拖尾产生的虚警概率,提升空间目标天文定位的精度。仿真试验表明,方法可以去除星图中绝大部分拖尾直线,同时能够保留目标信息,图像质量明显改善,比 Hough 变换方法具有显著优势。在单线程下,针对 $1\,024 \times 1\,024$ 大小图像,使用该方法进行单帧拖尾目标去除的时间为 0.71 s。可以看出,在不增加计算资源的前提下,能够大幅降低计算复杂度,提高计算效率。

关键词:星图;拖尾直线;统计特征;插值技术;目标检测

中图分类号: TN79 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.420

Rapid removal method of star map trailing lines based on statistical features

Wang Min^{1,2} Chang Xiaoyu^{1,2} Sun Kang^{1,2} Chen Jinyong^{1,2} Sun Fangde^{1,2} Wang Gang^{1,2}

(1. The 54th Research Institution of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

2. CETC Key Laboratory of Aerospace Information Applications, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: The rapid development of modern optoelectronic telescope technology has continuously improved the detection capability of equipment. The trailing phenomenon in star maps has put enormous pressure on the accuracy and timeliness of astronomical positioning processing. The low contrast of star maps and uneven distribution of background strength pose a challenging problem of how to remove trailing line noise while preserving the target information and positioning accuracy of star maps. This article proposes a fast method for removing trailing lines in star maps based on statistical features. By using the statistical rules of star map target information, fast detection of trailing target lines in single frame images can be achieved. Interpolation technology is used to quickly remove trailing lines in star maps, thereby eliminating the interference of trailing lines on space target detection, reducing the false alarm probability caused by trailing lines, and improving the accuracy of astronomical positioning of space targets. Simulation experiments show that the method proposed in this paper can remove the majority of trailing lines in star maps while preserving target information, significantly improving image quality and having significant advantages over the Hough transform method. Under single threading, for $1\,024 \times 1\,024$ size image, the time for removing trailing targets in a single frame using the method of the present is 0.71 seconds. It can be seen that the method of the present can significantly reduce computational complexity and improve computational efficiency without increasing computing resources.

Keywords: star map; trailing line; statistical characteristic; interpolation technique; target detection

0 引言

星图拖尾是全帧 CCD 转移信号电荷时,由于高亮度的拍摄对象在 CCD 积分时间发生的漏光电荷与 CCD 传输的信号电荷混合在一起而造成。在长时间的天文光电观测系统中,CCD 相机机械快门在高强度的频繁开闭下容易损坏,加上机械快门使用寿命限制,从而增加天文光电观测系统的维护成本,所以机械快门处于常开状态或者直接拆除,当不使用机械快门时,在曝光电荷转移和擦除的过程中,光敏元仍然处于感光状态,于是光敏元就会对后面转移到该光敏元的信号电荷造成影响,就会使得 CCD 图像中拖尾现象相当严重^[1-4]。

拖尾现象的出现会降低图像质量,增加图像处理难度,影响目标的检测和定位,从而影响后续运动目标的持续跟踪和信息提取。根据星图的特点,在预处理阶段就需要针对星点拖尾现象进行处理。但是由于预处理阶段星图数据量很大,要满足改善星图图像质量的同时,又要显著降低实时信息处理系统的计算开销,因此拖尾去除算法最重要的要求是算法相对简单有效。目前,学者们提出了多种星图拖尾去除的方法,主要分为基于图像变换的方法和基于图像模型的方法等。其中,基于图像变换的方法常采用小波变换、傅里叶变换等技术,将图像从空间域转换到变换域,然后通过分析变换域的特征来识别和去除拖尾。基于图像模型的方法则通过建立 CCD 图像的数学模型,分析拖尾直线生成机理,然后设计相应的去除算法^[5-12]。但是,传统去除拖尾的方式,需要对垂直拖尾和倾斜拖尾分别检测去除,没有统一去除方式,并且需要已知 CCD 相机的曝光信息,算法耗时^[13-18]。

本文提出一种基于统计特征的星图拖尾直线快速去除技术,通过星图目标信息统计规律实现对单帧图像拖尾直线的快速检测,利用插值技术快速完成星图拖尾直线去除,从而消除拖尾对空间目标检测的干扰,降低由拖尾产生的虚警概率,提升空间目标天文定位的精度。

1 算法原理分析

在恒星跟踪拍摄模式下,对于相对静止的恒星目标,会在恒星目标的上下形成一条接近垂直的完整的拖尾,称为“垂直拖尾”,或者“恒星拖尾”;而对于相对运动的空间目标,由于目标运动角速度快,会形成倾斜的拖尾,称为“倾斜拖尾”,或者“目标拖尾”。如图 1 所示,其中,垂直拖尾的检测和去除相对比较简单,但是倾斜拖尾由于存在相对运动,会存在一定的位移和倾斜,去除较为复杂。通常,传统去除拖尾的方式,需要对垂直拖尾和倾斜拖尾分别检测去除,没有统一去除方式,倾斜拖尾大多通过传统的 Canny 算子+Hough 变换的方法,首先通过检测出所有拖尾直线边缘,缩小检测范围,然后在边缘检测范围内进行 Hough 直线检测。Hough 算法是图像处理领域直线检测的常用方法,该算法适应于特征更为丰富的自然图像,而

对于特征较为单一的星图来说,其处理精度较低、算法耗时,并且需要已知 CCD 相机的曝光信息,计算复杂。

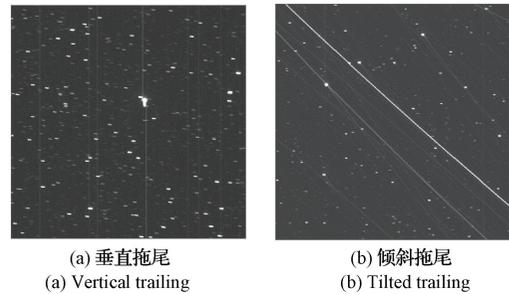


图 1 拖尾示例

Fig. 1 Trailing example

典型拖尾直线和空间目标邻域分布如图 2 所示。

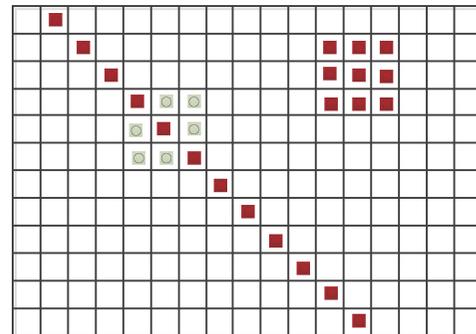


图 2 拖尾直线和空间目标邻域分布

Fig. 2 Trailing line and spatial target neighborhood distribution

本文算法的目的在于提供一种效果良好、易于实现,同时具有较低计算复杂度的图像拖尾去除方法,实现拖尾直线的有效去除,降低空间目标检测虚警概率,提高空间目标天文定位精度。

2 基于统计特征的星图拖尾去除方法

本文研究的星图图像是由大视场地基光学望远镜拍摄的以深空为背景的序列图像,其图像元素主要包括空间目标、恒星目标、拖尾目标、深空背景以及噪声,拖尾直线目标不同于恒星和空间目标,如图 3 所示。

1)空间目标和恒星表现为较亮的斑点,占据像素数 5~8 个像素区域不等,各点像素值大于某个灰度阈值。

2)背景为较暗的深空背景,像素值一般低于某个灰度阈值。

3)拖尾目标直线在水平方向上的投影长度为 1~2 个像素,占据像素数倾斜方向长度至少 10 个像素。

根据以上分析,本文算法实现过程包括如下步骤(图 4)。

步骤 1)读取图像大小 $m \times n$, 各像素点灰度值 $\mu_{(x,y)}$,

计算图像像素灰度均值 $u = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n u_{(x,y)}}{m \times n}$, 方差 $\sigma =$

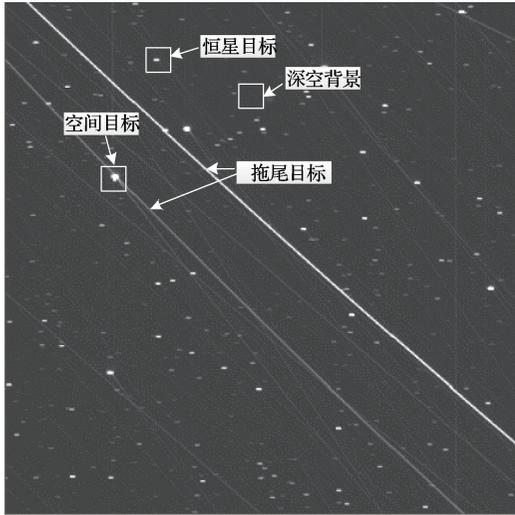


图3 星图典型元素构成

Fig. 3 Typical element composition of star chart

$$\sqrt{\frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (u - u_{(x,y)})^2}{m \times n}}, \text{最大值 } p, \text{最小值 } q.$$

步骤2)遍历图像,并对每个像素分别计算8邻域像素和以及8邻域像素差两个值,与原图像共同构成三波段特征图像。

步骤3)对步骤2)的三波段特征图像计算拖尾直线像素候选点,形成拖尾候选二值图像。

步骤4)对步骤3)的拖尾候选二值图像进行孤立点去除,遍历图像,对亮度为1的像素,若8邻域像素均为0,则将该像素值设置为0,形成连续区域二值图像,此时图像中所有亮度为1的像素至少存在一个亮度为1的邻域像素。

步骤5)对连续区域二值图像进行拖尾直线统计。对图像中像素为1的像素,记为 (x_0, y_0) ,搜索其邻域像素中为1的像素,记为 (x_1, y_1) ,再搜索 (x_1, y_1) 邻域像素,将灰度值为1的像素记为 (x_2, y_2) ,然后搜索 (x_2, y_2) 的邻域像素中像素为1的像素,以此类推,直至所有相连的像素均被标记。

步骤6)直线区域筛选。将步骤5)中具有连续10个或以上像素相邻的像素点确定为拖尾直线,利用邻域插值等方法将直线去除。

步骤2)中计算三波段特征图像的具体步骤如下:

(1)像素点 (x, y) 的8邻域像素和的计算方法为 $s =$

$$\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 u_{(x+i, y+j)};$$

(2)像素点 (x, y) 的8邻域像素差的计算方法为 $d =$

$$\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 |u_{(x,y)} - u_{(x+i, y+j)}|;$$

(3)将原始图像、8邻域像素和、8邻域像素差构成的图像作为图像的3个波段进行合并,构成三波段特征图

像,波段标识分别记为a、b、c。

步骤3)中计算拖尾直线候选点的具体步骤如下:

(1)将特征图像中a波段像素值大于 λ_1 的像素标记为1,其余像素标记为0,其中 $\lambda_1 = \mu + \sigma$;

(2)将步骤(1)中像素值为1,且在b波段中的像素值在 $[\lambda_2, \lambda_3]$ 范围内的像素值标记为1,其余像素标记为0,其中 $\lambda_2 = 8\mu + 2\sigma, \lambda_3 = 2p + 6\sigma$;

(3)将步骤(2)中像素值为1,且在c波段中的像素值在 $[\lambda_4, \lambda_5]$ 范围内的像素值标记为1,其余像素标记为0,其中 $\lambda_4 = 6\sigma, \lambda_5 = 2p - 2\mu + 6\sigma$ 。

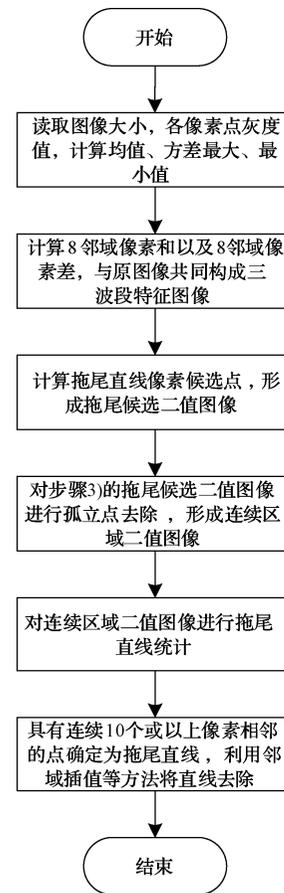


图4 处理流程

Fig. 4 Processing flowchart

3 仿真实验

为了验证所提方法的有效性,本文采用4组实测数据,每组有8帧图像,每帧图像 1024×1024 大小,采用Hough变换、一种有效去除亮线并保留弱小目标的方法(以下简称“高斯拟合方法”)^[8]和本算法分别进行仿真测试。

3.1 试验条件

计算机配置为 Intel Core i7-3770 CPU 3.4 GHz, 4 GB 内存,软件环境为 MATLAB R2013。

3.2 试验方法

试验采用 Hough 变换、高斯拟合方法和本文算法分别进行星图拖尾直线目标提取,对3种方法的计算时间进行统计比较;然后采用统一拖尾去除方法。

步骤1)图像参数获取:该图像总行数 $m = 1\ 024$, 列宽为 $n = 1\ 024$, 为了便于图像显示,将原始 16 bit 图像转换为 8 bit,图像灰度值范围(0,255),计算图像均值 $u =$

$$\frac{\sum_{x=1}^{1\ 024} \sum_{y=1}^{1\ 024} u_{(x,y)}}{1\ 024 \times 1\ 024}, \text{ 方差 } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^{1\ 024} \sum_{y=1}^{1\ 024} (u - u_{(x,y)})^2}{1\ 024 \times 1\ 024}}, \text{ 最大值为 } p, \text{ 最小值为 } q.$$

步骤2)遍历图像,并对每个像素分别计算8邻域像素和 $s = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 u_{(x+i,y+j)}$ 以及8邻域像素差 $d = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 |u_{(x,y)} - u_{(x+i,y+j)}|$ 两个值,将原始图像、8邻域像素和8邻域像素差构成的图像作为图像的3个波段进行合并,构成三波段特征图像。

步骤3)对步骤2)的三波段特征图像计算按照以下方式拖尾直线像素候选点,形成拖尾候选二值图像。

(1)将特征图像中 a 波段像素值大于 λ_1 的像素标记为 1,其余像素标记为 0,其中 $\lambda_1 = \mu + \sigma$;

(2)将步骤(1)中像素值为 1,且在 b 波段中的像素值在 $[\lambda_2, \lambda_3]$ 范围内的像素值标记为 1,其余像素标记为 0,其中 $\lambda_2 = 8\mu + 2\sigma, \lambda_3 = 2p + 6\sigma$;

(3)将步骤(2)中像素值为 1,且在 c 波段中的像素值在 $[\lambda_4, \lambda_5]$ 范围内的像素值标记为 1,其余像素标记为 0,其中 $\lambda_4 = 6\sigma, \lambda_5 = 2p - 2\mu + 6\sigma$ 。

步骤4)对步骤3)的拖尾候选二值图像进行孤立点去除,遍历图像,对亮度为 1 的像素,若 8 邻域像素均为 0,则将该像素值设置为 0,形成连续区域二值图像,此时图像中所有亮度为 1 的像素至少存在一个亮度为 1 的邻域像素。

步骤5)对连续区域二值图像进行拖尾直线统计。对图像中像素为 1 的像素,记为 (x_0, y_0) , 搜索其邻域像素中为 1 的像素,记为 (x_1, y_1) , 再搜索 (x_1, y_1) 邻域像素,将灰度值为 1 的像素记为 (x_2, y_2) , 然后搜索 (x_2, y_2) 的邻域像素中像素为 1 的像素,以此类推,直至所有相连的像素均被标记。

步骤6)直线区域筛选。将步骤5)中具有连续 10 个或以上像素相邻的像素点确定为拖尾直线,利用邻域插值等方法将直线去除。

3.3 试验结果

拖尾直线去除实验对比结果如表 1 所示,处理结果如图 5 所示。

在单线程下,使用本方法进行单帧拖尾目标去除的时间为 0.71 s,通过 Hough 变换进行单帧拖尾目标去除的时间为 4.83 s,高斯拟合方法进行单帧拖尾目标去除的时

表 1 实验对比结果

Table 1 Experimental contrast result

方法	图像数量 / 帧	图像大小 / pixel	单帧平均处理时间/s
Hough 变换	32	1 024 × 1 024	4.83
高斯拟合	32	1 024 × 1 024	0.77
本文算法	32	1 024 × 1 024	0.71

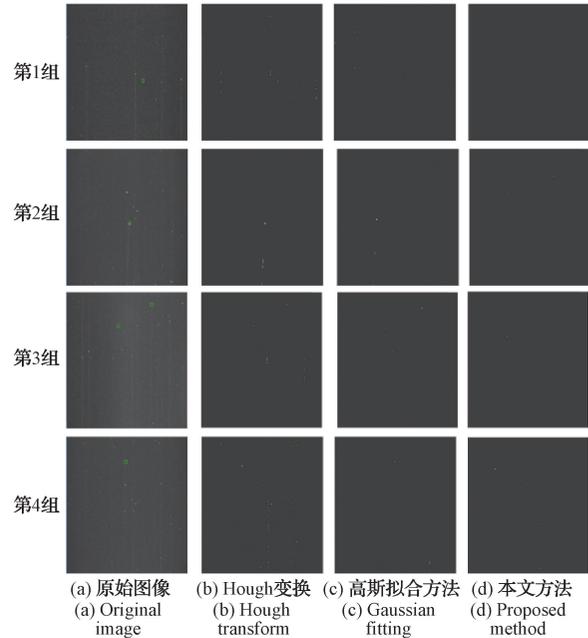


图 5 拖尾直线去除结果

Fig. 5 Results of removing trailing lines

间为 0.77 s。可以看出,在不增加计算资源的前提下,本文方法能够大幅降低计算复杂度,提高计算效率。拖尾直线去除结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,本文方法可以去除星图中绝大部分拖尾直线,同时能够保留目标信息,图像质量明显改善,比其他两类方法具有显著优势。

4 结论

拖尾现象的出现会降低图像质量,增加图像处理难度,影响目标的检测和定位,从而影响后续运动目标的持续跟踪和信息提取。为此,本文提出一种基于统计特征的星图拖尾快速去除方法。该方法主要具有如下优点:1)通过像素灰度分布规律进行统计,筛选拖尾直线目标,能够对倾斜拖尾和垂直拖尾同时检测,同时,可对批量数据的拖尾目标批量检测,大大减少计算量;2)本文方法只有加法、减法和移位(求均值)运算,可降低实时信息处理系统的时间开销,满足预处理阶段的实时性要求。实现结果表明,本文方法不仅可以去除星图中绝大部分拖尾直线,同时能够保留目标信息,图像质量明显改善,在不增加计算资源的前提下,能够大幅降低计算复杂度,提高计算效率。

参考文献

- [1] 孙洪驰,穆荣军,刘丽丽,等.一种临近空间飞行器动态拖尾星图复原方法[J].中国惯性技术学报,2021,29(1):77-83,89.
SUN H CH, MU R J, LIU L L, et al. A dynamic trailing star map restoration method of near space vehicle[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021,29(1):77-83,89.
- [2] 韩金良.面向动态星图的星点匹配和端到端识别技术研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2022.
HAN J L. Research on star point matching and end-to-end identification technology for dynamic star image [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,2022.
- [3] 王强.高动态星敏感器星点提取和联合定姿算法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2016.
WANG Q. Research on star extraction and integrated attitude determination for highly dynamic star tracker[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2016.
- [4] 鹿瑞,武延鹏.动态拖尾星图模拟算法研究[J].空间控制技术与应用,2016,42(4):57-62.
LU R, WU Y P. An approach of star image simulation for strapdown star sensor[J]. Aerospace Control and Application, 2016, 42(4):57-62.
- [5] 韩金亮,杨修斌,徐婷婷,等.一种用于拖尾星图的端到端识别算法[J].遥感,2021,13(22):4541-4559.
HAN J L, YANG X B, XU T T, et al. An end-to-end identification algorithm for smearing star image[J]. Remote Sensing,2021,13(22):4541-4559.
- [6] 柳红岩,孙慧婷,李岩,等.漂移扫描 CCD 星图的 smear 现象快速消除方法研究[J].液晶与显示,2016,31(3):310-316.
LIU H Y, SUN H T, LI Y, et al. Fast smear effect removal algorithm of CCD drift-scan star image[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2016, 31(3):310-316.
- [7] 张健,任建存,张春华.星空观测图像目标拖尾的自动消除[J].应用光学,2013,34(1):62-68.
ZHANG J,REN J C,ZHANG CH H. Automatic de-smearing algorithm for target in space observation image[J]. Journal of Applied Optics, 2013,34(1):62-68.
- [8] 韩艳丽,刘峰,张健,等.天文观测星图中亮线的去除方法[J].光电工程,2013,40(8):47-51,58.
HAN Y L, LIU F, ZHANG J, et al. Bright line removal algorithm of star-sky image in astronomic observation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(8):47-51,58.
- [9] 姚睿,张艳宁,孙瑾秋,等.星图中基于小波变换的 CCD 传感器 Smear 现象消除方法[J].光子学报,2011,40(3):413-418.
YAO R, ZHANG Y N, SUN J Q, et al. Smear removal algorithm of CCD imaging sensors based on wavelet transform in star-sky image [J]. Acta Photonica Sinica,2011,40(3):413-418.
- [10] 郭斯羽,周乐前,温和,等.基于二值图像邻域加权的直线 Hough 变换[J].电子测量与仪器学报,2014,28(5):478-485.
GUO S Y, ZHOU L Q, WEN H, et al. Hough transform for line detection based on neighborhood weighting in binary images[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(5):478-485.
- [11] 袁洪琳,李帆,于涛,等.基于可分离模糊核的复合运动模糊星图建模与仿真[J].红外与激光工程,2016,45(11):345-353.
YUAN H L, LI F, YU T, et al. Modeling and simulation of blurred star images by the complicated motion based on the separable kernel[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11):345-353.
- [12] 杨会玲,柳红岩,李岩,等.漂移扫描相机中拖尾现象快速消除方法[J].计算机应用,2015,35(9):2016-2618.
YANG H L, LIU H Y, LI Y, et al. Fast removal algorithm for trailing smear effect in CCD drift-scan star image [J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(9):2016-2618.
- [13] 闫劲云,刘慧,赵伟强,等.基于卷积曲面的动态实时星图模拟[J].北京航空航天大学学报,2019,45(4):681-686.
YAN J Y, LIU H, ZHAO W Q, et al. Dynamic real-time star map simulation based on convolution surface[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2019,45(4):681-686.
- [14] 侯娅贤.星敏感器高动态运动星点定位技术研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所),2021.
HOU Y X. Research on high dynamic motion star positioning technology of star sensor [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences,2021.
- [15] 李梦阳.天基复杂背景下空间暗弱小目标检测方法研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2020.
LI M Y. Research on detection method for dim and

- small targets in complex space-based background[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [16] 周孟莲,张震,张检民,等.线阵 CCD 全饱和单侧拖尾特性分析[J].强激光与粒子束,2015,27(4):47-51.
ZHOU M L, ZHANG ZH, ZHANG J M, et al. Characteristic analysis of entirely saturated unilateral smear in linear CCD [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(4): 47-51.
- [17] 廖育富.复杂工况背景下星图预处理相关技术研究[D].北京:中国科学院大学(光电技术研究所),2024.
LIAO Y F. Preprocessing technology research of star image under complex working condition[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2024.
- [18] 郑天宇.空间天文望远镜精细导星高速处理技术研究[D].上海:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所),2024.
ZHENG T Y. Research on high-speed processing of fine guidance sensor in space telescope[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2024.

作者简介

王敏(通信作者),博士,高级工程师,主要研究方向为空间态势感知、遥感应用。

E-mail:wmin0805@163.com

常晓宇,硕士,工程师,主要研究方向为遥感数据处理与应用。

E-mail:lightrain2023@whu.edu.cn

孙康,博士,研究员,主要研究方向为航天地面应用。

E-mail:skgucas@163.com

陈金勇,硕士,研究员,主要研究方向为航天地面应用。

E-mail:13001899119@163.com