

文章编号 1004-924X(2024)23-3436-10

全天时中高轨目标探测系统恒星移除

宋力夺¹, 姚凯男^{1*}, 徐志强¹, 王建立¹, 谷 健², 全 胜^{1,3}, 陈 明⁴, 贾浩然⁵

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国人民解放军 63768 部队, 陕西 西安 710600;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 中国人民解放军 32011 部队, 北京 100094;

5. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要:在地基中高轨空间目标全天时光学探测系统中,由于白天探测目标的信噪比极低,采用多帧联合相关算法进行目标提取。为了解决多帧联合相关图像中恒星轨迹导致的目标提取困难,对单帧图像的恒星移除算法进行研究。根据原始图像生成一帧可用于替换恒星像素的背景图像,根据恒星的成像特点对单帧图像进行目标提取,得到疑似恒星的备选目标,通过单帧检测和多帧关联检测方法确定实际恒星目标,将原始图像中的恒星目标替换为背景图像对应像素。实验结果表明:算法对星等在 4~9 之间的恒星移除效果较好,平均移除率为 98%,经过多帧联合相关算法后的图像目标强度不变,但恒星轨迹明显减少。对于全帧图像,算法的平均耗时低于 12 ms,满足相机 25 Hz 帧频的实时处理要求。实验研究对多帧联合相关算法提取中高轨道目标的效果有很大提升。

关键词:中高轨道目标;多帧联合相关算法;恒星轨迹;目标提取;恒星移除

中图分类号:TP391;TH743 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243223.3436

Stars removal of all day time mid-high orbit target detection system

SONG Liduo¹, YAO Kainan^{1*}, XU Zhiqiang¹, WANG Jianli¹, GU Jian²,

QUAN Sheng^{1,3}, CHEN Ming⁴, JIA Haoran⁵

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. 63768 Troop, PLA, Xi'an 710600, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. 32011 Troop, PLA, Beijing 100094, China;

5. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: yaokainan@126.com

Abstract: In ground-based optical detection systems for mid-high orbit targets during daytime, the extremely low SNR (Signal-to-Noise Ratio) of mid-high orbit imaging necessitates the use of multi-frame

收稿日期:2023-06-08;修订日期:2023-07-02.

基金项目:吉林省科技发展计划重点研发项目(No. 20210201020GX);中国科学院关键核心技术攻关项目(No. YZQT024)

joint correlation detection techniques for target extraction. To address the challenge of target extraction caused by stellar paths, this paper introduces a stars removal algorithm for single-frame images. The process involves generating a background image with replaceable stars from the original image, identifying suspected targets in a single frame based on stellar imaging characteristics, detecting real stellar targets through single-frame and multi-frame association methods, and replacing stellar targets in the original image with corresponding background pixels. Experimental results show the algorithm effectively removes stars with apparent magnitudes of 4 to 9, achieving an average removal success rate of 98%. After multi-frame joint correlation detection, target intensity remains unchanged, while stellar paths are significantly reduced. The algorithm processes a full-frame image in under 12ms, meeting the real-time requirements of a 25 Hz camera frame rate. This approach significantly enhances the extraction of mid-high orbit targets using multi-frame joint correlation detection.

Key words: mid-high orbit; multi-frame joint correlation detection; stellar path; target extraction; stars removal

1 引 言

近年来,随着各国对空间暗弱目标探测能力提升的不断探索,地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)和中地球轨道(Middle Earth Orbit, MEO)目标的成像技术发展迅速^[1]。针对中高轨道暗弱目标成像的研究主要集中在可见光波段^[2]和红外波段^[3-5]。中高轨目标探测也应用于高精度定位^[6-7]等领域。

传统的中高轨道探测技术主要应用于夜间探测,实现地基光学望远镜对中高轨道目标的白天探测也逐渐成为国内外相关科研机构的重点发展方向。美国空军技术学院使用短波红外地基望远镜对白天高轨卫星成像进行了研究^[8]。美国 Numerica 公司研发了一种低成本,可用于白天监测 GEO 目标的地基望远镜 Aquila^[9]。Aquila 使用短波红外探测器对 GEO 目标进行多帧短曝光时间图像采集,并针对该望远镜提出了多帧图像叠加的目标提取方法,该方法在白天和夜间对中高轨道目标均有较好的提取效果。2018 年,长春光机所对红外 K 波段光谱的白天探测能力达到 10.38 星等^[10]。Pan 等利用小口径望远镜对白天低信噪比目标进行探测^[11]。

2021 年,长春光机所提出了多帧联合相关探测方法,应用于白天中高轨目标探测领域,并成功研制了 500 mm 口径全天时探测系统,该系统在白天强天光背景条件下的探测能力

优于 15 星等(G 型光谱)。以 GEO 目标为例,多帧联合相关暗弱目标提取算法将多帧连续短曝光 CCD 图像直接输出给多帧联合相关算法,单帧图像中 GEO 目标信息被淹没在噪声中,这些图像通过该算法生成一张具有明显 GEO 目标的图像。单帧图像除了包含微弱的 GEO 目标信息外,也可能包含亮度更大的恒星。本文使用视场为对角线 10' 的短波红外相机全天时探测光电望远镜进行 GEO 目标拍摄时发现,至少 50% 的单帧图像中会出现肉眼可见恒星。对部分 GEO 目标在特定时间段进行拍摄时,恒星出现的概率甚至超过 95%,其中超过 80% 的图像中出现不止一颗恒星。对某 GEO 目标恒星的较多时段进行拍摄,单帧图像中最多出现 7 颗明显的恒星,受此影响,多帧联合相关图像可以观察到 15 条左右的恒星轨迹。这些轨迹的信号强度高于所拍摄的 GEO 目标,给后续的古O目标提取带来很大的难度。

结合本台观测设备拍摄中高轨道目标的图像特点,本文提出了一种针对单帧图像的恒星移除算法。该算法通过图像预处理、目标提取、单帧检测和多帧关联检测等步骤,准确识别并移除恒星目标,能够保证非恒星区域像素的灰度值不发生变化。经过恒星移除后的图像再送入到多帧联合相关算法进行处理,恒星轨迹的信号强度大幅减弱,中高轨道目标信号强度远

高于恒星轨迹,降低了后续中高轨道目标的提取难度。

2 原理

2.1 基本工作流程

图 1 为恒星移除算法的数据流程。总的来看,多帧联合相关算法要求短波红外相机使用连续多帧短曝光时间对中高轨道目标进行拍摄。图像经过恒星移除算法,生成一张不包含恒星的图像,且图像中非恒星区域的数据没有变化。最终将这张不包含恒星的图像输出至多帧联合相关算法进行中高轨道目标提取。

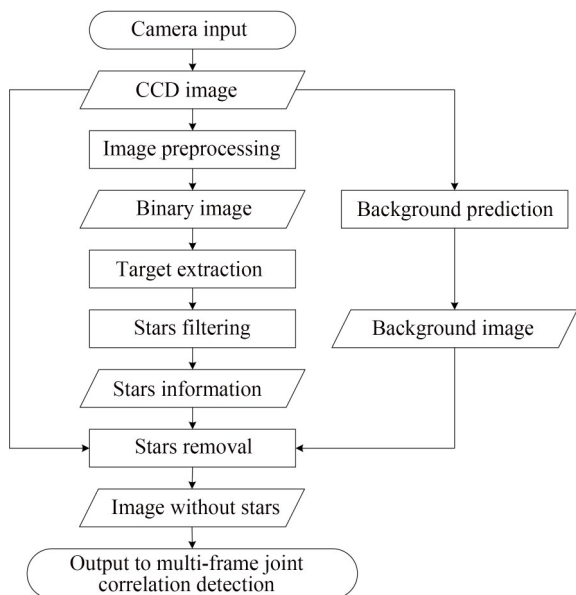


图 1 恒星移除算法数据流程

Fig. 1 Data flow of star removal algorithm

恒星移除需要 3 个主要信息或数据,分别为 CCD 图像,背景图像和恒星信息。

2.1.1 CCD 图像

单帧图像的相机曝光时间在夜间小于 30 ms,白天小于 20 ms,即使在白天,图像也不会饱和。在此曝光时间下,相机仅能对星等在 9 等以下的空间目标进行清晰成像;10 等星虽然也可以成像,但信噪比较低;星等高于 11 等的空间目标信噪比极低,无法使用单帧图像算法对目标提取。通常中高轨目标的理论星等要高于 11 等,高轨目标星等一般在 14~15 等之间。

为保证图像中原有的中高轨道目标信息不丢失,算法仅对图像中能够清晰成像的恒星区域进行处理,除恒星外的其他像素点均使用 CCD 图像数据。

2.1.2 背景图像

背景图像与 CCD 图像的尺寸和像素深度相同,且背景图像上每一个像素的位置与 CCD 图像相对应。背景图像的意义在于,当算法计算出 CCD 图像中某一区域为恒星时,从背景中提取对应像素覆盖到 CCD 图像中,达到恒星移除的效果。

生成的背景图像如下:

$$T(x, y) = \frac{1}{4} [I(x-n, y) + I(x, y-n) + I(x+n, y) + I(x, y+n)], \quad (1)$$

式中: T 为背景图像, I 为 CCD 图像, n 略大于恒星在图像中成像像素尺寸的半径。根据设备实际拍摄图像, n 取 15。

原始图像和背景图像对比如图 2 所示。原始图像中标注的恒星位置,在背景图像中已经替换成均匀的背景。尽管在背景图像中,真实恒星位置的周围出现了 4 个较暗的白点,但由于在原始图像中,这 4 个白点的位置本身不是恒星,所以在恒星移除过程中不会产生影响。

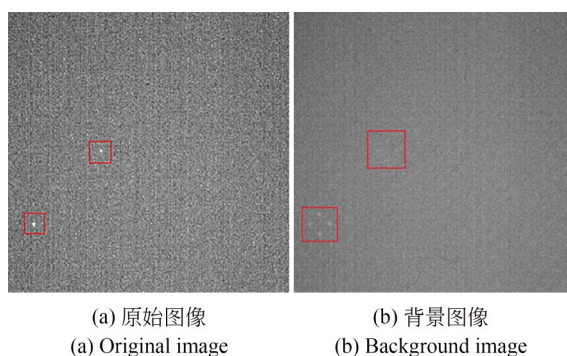


图 2 原始图像与背景图像对比

Fig. 2 Comparison between original and background image

2.1.3 恒星信息

计算恒星信息的过程总体上可以概括为图像预处理,目标提取和恒星筛选 3 个步骤。

2.2 恒星信息计算

在短波红外相机进行 GEO 目标拍摄时,一

般使用不超过 30 ms 的曝光时间进行连续图像采集,白天要求曝光时间更短,综合考量相机使用固定帧频 25 Hz。考虑后续多帧联合相关探测算法也会产生一定的耗时,所以要求单帧图像的恒星移除处理时间低于 20 ms。本文提出的恒星移除算法不仅要追求更高的准确率,而且要求算法过程尽可能简单,易于进行 GPU 移植。

2.2.1 图像预处理

图像预处理为目标提取服务,而目标提取的成功率往往取决于图像阈值分割所选取的阈值。理想情况下,天文图像应背景均匀,且目标灰度值大于背景灰度值,这样的图像有利于阈值分割。

但由于 CCD 本身,或望远镜光路等原因,CCD 各像素对光或热的响应能力不一致,这种现象在晴朗的中午更加明显。平场校正是消除各像素响应不一致的算法^[12],经过平场校正后的图像,天光背景的均匀度更好,恒星信噪比更高,且恒星的灰度值高于整个图像背景的灰度值,有利于图像的阈值分割。

2.2.2 目标提取

在图像处理中,目标提取通常包含阈值分割和连通区域法两个步骤。

阈值分割也称作图像二值化,其作用是把图像的前景和背景区分开。阈值分割的基本原理是,选定一个灰度阈值,对于图片的每一个像素,若灰度值小于该阈值则置为 0;反之,则置为 255。所以,阈值分割算法的关键在于阈值的选取,阈值选择过小,可能导致背景噪声被当成目标提取出来;阈值选择过大,则会导致一些较暗的目标被当成背景无法提取出来。

阈值分割算法的数学表达式为:

$$B(x, y) = \begin{cases} 0, & I(x, y) < t \\ 255, & I(x, y) \geq t \end{cases}, \quad (2)$$

式中: I 为经过预处理之后的图像, t 为阈值, B 为 8 位二值化图像。

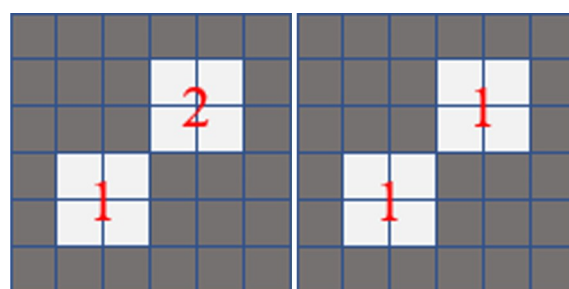
经过阈值分割计算得到的二值化图像包含若干个目标区域。这些目标区域中可能有一个或多个恒星,也可能有噪声。为了筛选出恒星,首先需要把图像中所有的疑似目标区域都提取出来。

在图像处理中,一个连通区域表示相邻像素值相等的所有点的集合。常用的连通区域算法有四连通区域法和八连通区域法^[13]。这里采用连通区域法均使用二值化图像计算。

四连通区域法的原理是:若二值化图像中像素 $B(x, y)$ 的灰度值为目标灰度值,则依次检测其上、下、左、右 4 个像素点是否为目标灰度值,直至所有的新增邻域像素点都不是目标灰度值为止。

八连通区域法与四连通区域法的原理类似,在四连通区域法检测像素集合的基础上,增加目标像素的左上、左下、右上和右下 4 个检测点。

图 3 表示一组 6×6 像素区域的二值化矩阵,灰色区域表示背景,白色区域表示目标。在四连通区域法下提取出两个目标,而八连通区域法只提取出一个目标。



(a) 四连通区域 (b) 八连通区域
(a) Four connected region (b) Eight connected region

图 3 提取效果对比

Fig. 3 Comparison of extraction effects

两种连通区域法没有优劣之分,本文主要讨论恒星的提取与移除,所以根据恒星成像特点来决定提取方法。恒星的成像特点为中心点最亮,随着中心向四周的扩散,亮度递减。二值化后区域接近圆形或方形,不存在两个子区域仅斜对角相连通。所以针对恒星的成像特点,选择四连通区域法进行目标提取。

为便于筛选恒星,连通区域算法需要计算出每个备选目标的宽、高和质心。图 4 是一组 7×7 像素区域的二值化矩阵,灰色区域表示背景,白色区域表示备选目标。矩形为该备选目标的外接矩形,其宽为 w ,高为 h 。

加权质心算法是最常用的恒星质心提取方法^[14-15],将恒星成像外接矩形区域内的所有像素

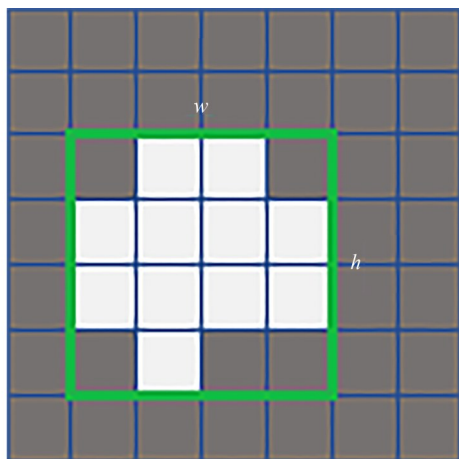


图4 目标外接矩形示意图

Fig. 4 Bounding rectangle of target

进行加权平均。质心计算公式如下：

$$x_c = \frac{\sum_{(x,y) \in S} x \times I(x,y)}{\sum_{(x,y) \in S} I(x,y)}, y_c = \frac{\sum_{(x,y) \in S} y \times I(x,y)}{\sum_{(x,y) \in S} I(x,y)}, \quad (3)$$

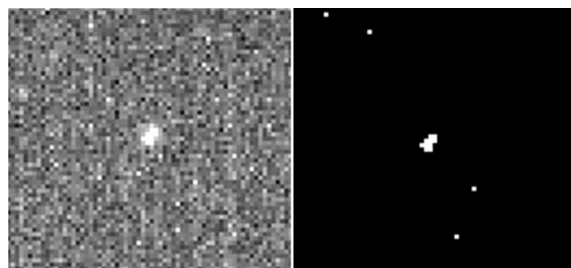
式中： S 表示连通区域外接矩形内所有像素点的集合， I 为经过预处理的图像， (x_c, y_c) 为该连通区域的质心。

2.2.3 恒星筛选

通过连通区域法提取出的备选目标，除了包含恒星，还包含本底噪声。为了能够准确将恒星从图像中移除，而不影响其他非恒星的像素，需要从所有备选目标中排除非恒星目标。在连通区域法中，对每个备选目标计算出 w , h 和 (x_c, y_c) ，可以通过单帧检测和多帧关联检测两种方式进行筛选。

图5选取一张有较多噪声的恒星图像，可以看出噪声通常以单个像素存在。而恒星的 w 和 h 值都为4。在另一组实验中，将相机的曝光时间设置为20 ms，分别对星等为5等星和9等星进行拍摄。5等星二值化后连通区域外接矩形的尺寸为 $w=11, h=12$ ，9等星外接矩形的尺寸为 $w=4, h=5$ 。所以可以通过判断备选目标的尺寸，以及它的外接矩形是否接近正方形，来排除非恒星目标。

图6为单帧检测的基本流程，经过筛选可以排除大量非恒星目标。然而，实验发现，一些在



(a) 原始图像 (b) 二值化图像
(a) Original image (b) Binary image

图5 噪声与恒星对比

Fig. 5 Comparison between noise and star

图像中很弱的恒星对多帧联合相关算法仍然会产生影响，其二值化图像的像素尺寸仅有 2×2 ，这种情况在白天拍摄时比较常见，所以当 $t_1=2$ 时，恒星遗漏最少。此时也可能出现较大尺寸的噪声被提取出来，可以通过多帧检测来移除。

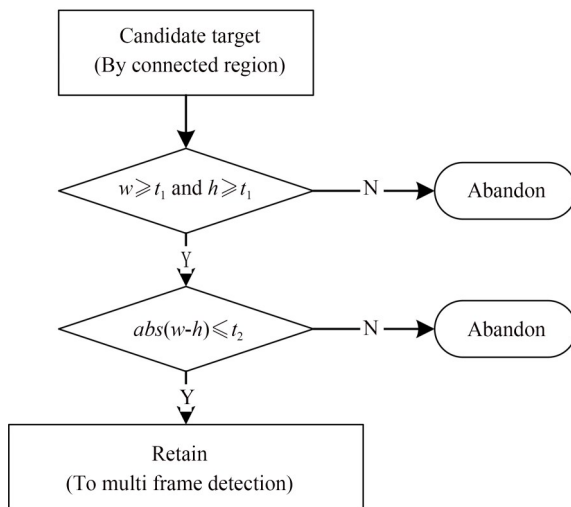


图6 单帧检测流程

Fig. 6 Flowchart of single frame detection

图像本底噪声通常是由探测器的像元响应率差别引起的，所以如果图像中某一个像素或区域被当作伪目标，那么它在之后的某一帧大概率还会成为伪目标。

图7为多帧检测基本流程，经过单帧检测筛选出来的目标，判断其质心 (x_c, y_c) 位置是否在历史图像中也出现过该目标，如果首次出现，则可以确定是恒星目标。需要注意的是，历史图像不能选择时间过于接近的（比如上一帧）。当相机使用

25 Hz 进行拍摄时,相邻图像中恒星的位移非常小,多数情况无法通过算法识别。

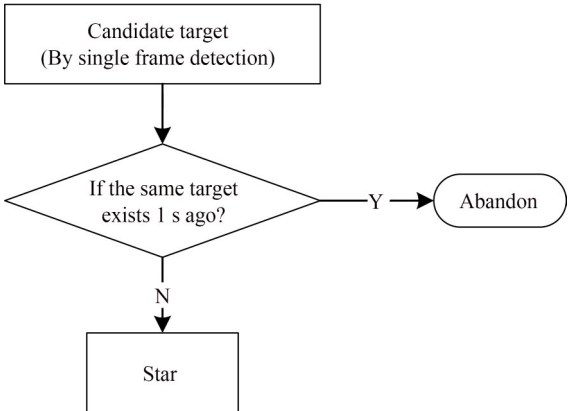


图 7 多帧检测流程
Fig. 7 Flowchart of multi frame detection

至此恒星提取工作已经完成,得到一个恒星信息集合 S ,它包含 0 个或多个元素,对于每一个元素 S_i ,包含其在图像中的像素位置和像素尺寸信息。

2.3 恒星移除

恒星移除原理很简单,主要使用像素替换方法。公式如下:

$$I(x,y)=\begin{cases} T(x,y), & (x,y)\in S \\ I(x,y), & (x,y)\notin S \end{cases}, \tag{4}$$

式中: I 为 CCD 图像, T 为式(1)生成的背景图像, S 包含图像中所有恒星目标的像素区域。

图 8 为替换原理示意图,通过查看恒星信息,

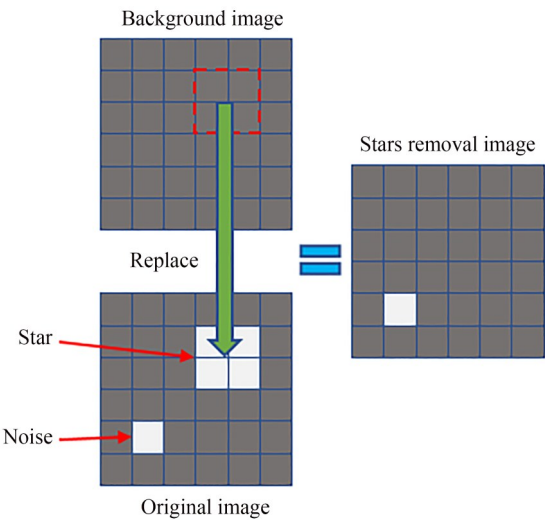


图 8 替换原理示意图
Fig. 8 Schematic diagram of replacement principle

把背景图像对应的区域复制到原图中,最终生成恒星移除图像。

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

实验使用中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的光电望远镜,具备全天时中高轨道目标探测功能,其主要指标如表 1 所示。

表 1 望远镜的主要指标
Tab. 1 Main parameters of telescope

Parameter	Value
Spectral range/(M•m)	0.9~1.7
Pixel pitch/(M•m)	15
Pixel depth/Bit	16
Field of view/(°)	10(Diagonal)
Max frame rate/Hz	100
Optical aperture/(M•m)	500
Focal length/(M•m)	4 000
Tracking accuracy/(″)	<2

2022 年 10 月起,实验人员在云南省楚雄州姚安县某观测站(海拔 2 047 m)进行观测实验,望远镜在白天和夜间对恒星和高轨卫星的探测能力优于 15 星等。500 mm 口径全天时探测光学望远镜如图 9 所示。选取某地球同步轨道卫星进行观测,望远镜引导依据美国 heavens-above 网站公开的两行式轨道根数。

图 10 为单帧恒星移除效果。该图片的母图片包含 6 颗恒星,恒星移除算法将 6 颗恒星全部移除。由于图片较大,为更清晰体现算法效果,仅截取两颗恒星距离较近的区域进行展示。其中图 10(a)为原始图像,能明显看到 2 颗恒星。图 10(b)为恒星移除后图像,恒星部分已经被背景颜色替换。为了验证是否有其他非恒星区域(如噪声)被误移除,将图像(a)和(b)进行减法计



图9 500 mm口径全天时探测光学望远镜

Fig. 9 Experimental 500 mm all day time detection optical telescope

算,得到图像(c)。图 10(c)中,黑色区域像素灰度值为 0,表示图 10(a)与 10(b)在这些区域像素点的灰度值相等。图 10(c)中的两个白色区域表示图 10(a)中原本有恒星,而图 10(b)中已经被移除。

将恒星移除前后的图像序列作为多帧联合相关算法的输入图像,得到图 11。在 11(a)和 11(b)中,小白点为某高轨卫星。对比两幅图像可知,恒星移除算法对多帧联合相关算法产生的图像,恒星轨迹消除效果明显,约 15 条明显的恒星轨迹被消除,且不影响高轨卫星的信号强度。对于图 11(b)这种背景更加均匀的图像而言,中高轨道目标提取的难度大幅降低。

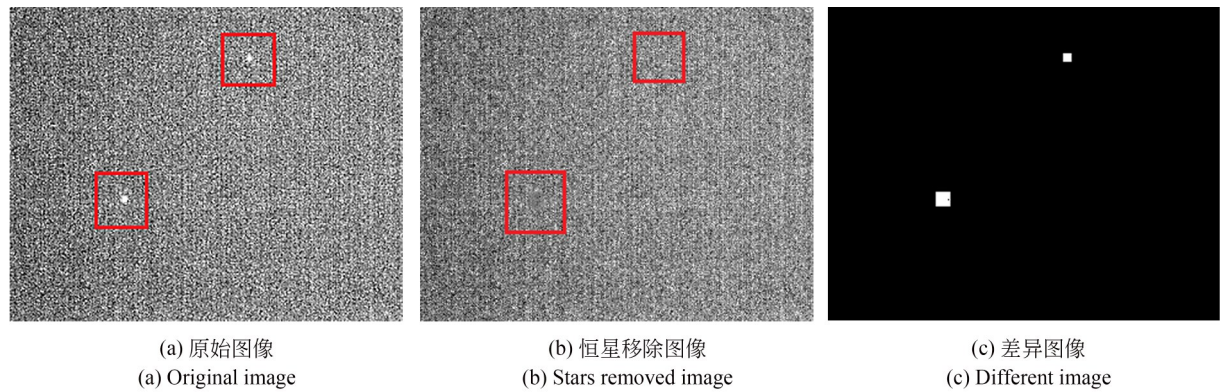


图 10 恒星移除效果

Fig. 10 Stars removed effect

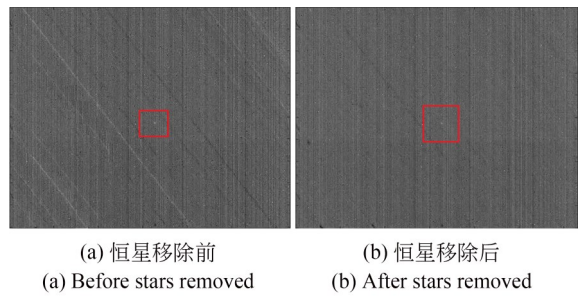


图 11 多帧联合相关算法效果对比

Fig. 11 Comparison of multi-frame algorithm effects

3.2 适应性分析

适应性分析实验主要对恒星移除成功率情况进行统计。实验中将相机曝光时间设置为 20 ms,分别在白天和夜间各选取一个时间段,从依巴谷星表 (Hipparcos Catalogues, HIP) 中选取

视星等 (V_{mag}) 在 1~10 之间的恒星,进行跟踪拍摄。因为跟踪恒星拍摄时,恒星一直固定在图像中心附近,所以实验时需要将多帧移动检测的模块关闭。

图 12 展示了移除失败的 2 种情况,图 12(a)的情况出现在恒星较亮的时候,恒星成像较大,连通域的计算无法覆盖整个恒星,恒星未被完全移除;图 12(b)出现在恒星很暗的时候,恒星成像尺寸很小且对比度很低。

从表 2 和表 3 中可以看出,无论白天还是夜间,算法对于在 4~9 等星之间的恒星移除效果较好。当星等达到 10 或以上时,算法开始出现不能识别恒星的失败情况。当星等达到 4 以下时,算法无法完全移除恒星。实验中,星等在 10 等或以上的恒星对多帧联合相关算法的影响极其微弱,

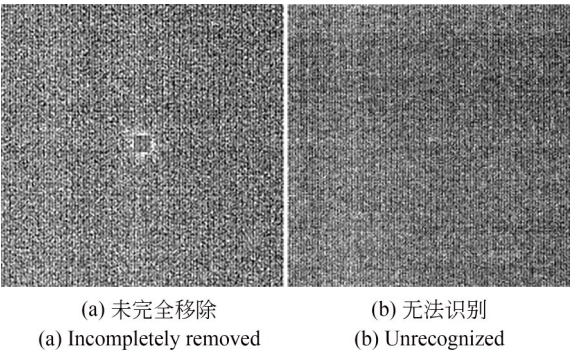


图 12 移除失败情况
Fig. 12 Remove failed situation

表 2 白天恒星移除成功率				
Tab. 2 Success rate of removing stars during daytime				
V_{mag}	Hip num	Incompletely	Unrecognized	Success
1. 16	37 826	100%	0%	0%
1. 99	46 390	100%	0%	0%
3. 11	43 813	100%	0%	0%
4~9	—	0%	0%	100%
10. 16	39 392	0%	86%	14%

表 3 夜间恒星移除成功率				
Tab. 3 Success rate of removing stars during night				
V_{mag}	Hip num	Incompletely	Unrecognized	Success
1. 17	113 368	100%	0%	0%
2. 04	3 419	100%	0%	0%
3. 05	100 345	100%	0%	0%
4. 04	111 497	19%	0%	81%
5~9	—	0%	0%	100%
10. 11	39 392	0%	18%	72%

恒星的轨迹信号强度远低于中高轨道目标,可以忽略不计。而星等在 4 等或以下的恒星数量较少,且望远镜的视场很小,仅对角线为 10',理论上出现的概率很低。

对 Gaia 团队 2022 年发布的 Gaia DR3 数据进行分析,星等低于 4 等(不含 4 等)的恒星数量占星等低于 10 等(含 10 等)的恒星数量百分比为 0.13%。实验后期对中高轨卫星进行上百次的多帧联合相关拍摄实验,共产生几万帧图像,没有出现恒星未完全移除的情况。尽管出现该情况的概率较低,需要注意的是,本研究的目的并

非将所有恒星完全移除,而是消除多帧联合相关算法产生的恒星轨迹。以当前的统计数据来看,恒星轨迹消除的成功率达 99% 以上,说明本文提出的恒星移除算法对于多帧联合相关算法,乃至其他多帧提取中高轨目标算法,具有重要的意义。

3.3 性能分析
性能是算法设计之初考虑的主要因素之一,主要算法中除连通区域算法使用 CPU,其他算法均使用 GPU 处理。

选取 1 000 张图片进行恒星移除算法测试,算法处理平台如表 4 所示,算法耗时统计如图 13 所示。耗时最低为 9.69 ms,最高为 13.91 ms,平均 11.31 ms,满足实时性要求。

表 4 算法处理平台	
Tab. 4 Algorithm processing platform	
Module	Model
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU @ 2.60 GHz
GPU	NVIDIA GeForce GTX 960M
OS	Windows 10
Language	C++, OpenCL

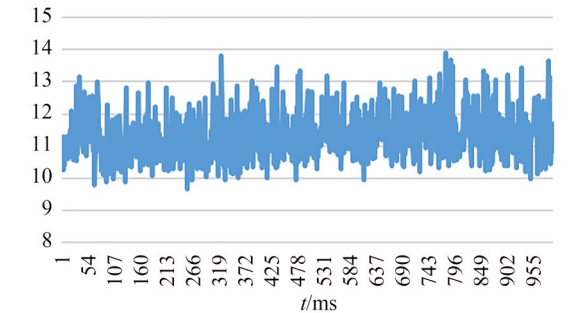


图 13 算法耗时统计
Fig. 13 Algorithm time consumption statistics

4 结 论
本文针对短波红外相机拍摄中高轨目标的图像,提出了一种实时恒星移除算法。接着,对实验结果分析,星等在 4~9 之间的恒星在多帧联合相关算图像中产生轨迹的概率最大,恒星移除算法对于这部分恒星的处理效果表现优

异,单帧图像理论恒星移除率高达 98% 以上,多帧联合相关图像恒星轨迹消除成功率达 99% 以上,同时算法耗时平均为 11.31 ms,最高不超过 14 ms,满足实时性要求。主观上,单

帧图像中恒星移除效果较好,经过多帧联合相关算法处理后,恒星轨迹信号强度大幅下降,全幅图像中中高轨目标区域的灰度值最大,更利于中高轨道目标的提取。

参考文献:

- [1] 罗秀娟,刘辉,张羽,等. 地球同步轨道暗弱目标地基光学成像技术综述[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 753-766.
LUO X J, LIU H, ZHANG Y, *et al.* Review of ground-based optical imaging techniques for dim GEO objects[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 753-766. (in Chinese)
- [2] 高扬,赵金宇,刘俊池,等. 中高轨道目标的地基光电监视[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2584-2590.
GAO Y, ZHAO J Y, LIU J CH, *et al.* Ground-based photoelectric surveillance for mid-high orbit target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2584-2590. (in Chinese)
- [3] 韩金辉,魏艳涛,彭真明,等. 红外弱小目标检测方法综述[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 3788/IRLA20210393.
HAN J H, WEI Y T, PENG ZH M, *et al.* Infrared dim and small target detection: a review[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(4): 3788/IRLA20210393. (in Chinese)
- [4] BAI X Z, BI Y G. Derivative entropy-based contrast measure for infrared small-target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(4): 2452-2466.
- [5] AGHAZIYARATI S, MORADI S, TALEBI H. Small infrared target detection using absolute average difference weighted by cumulative directional derivatives[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 101: 78-87.
- [6] 李振伟,张涛,张楠,等. 暗弱空间目标的高精度定位[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2627-2634.
LI ZH W, ZHANG T, ZHANG N, *et al.* High precision orientation of faint space objects[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2627-2634. (in Chinese)
- [7] 张磊,何昕,魏仲慧,等. 基于星图识别的空间目标快速天文定位[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 3074-3080.
ZHANG L, HE X, WEI ZH H, *et al.* Fast celestial positioning for space objects based on star identification[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 3074-3080. (in Chinese)
- [8] THOMAS G, COBB R, FIORINO S, *et al.* SNR modeling for ground-based daytime imaging of GEO-satellites in the SWIR [C]. 2019 *IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA*. IEEE, 2019: 1-9.
- [9] SHADDIX J, BRANNUM J, FERRIS A, *et al.* Daytime GEO tracking with 'Aquila': approach and results from a new ground-based swir small telescope system [C]. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2019: 82.
- [10] 黄智国,王建立,王昊京,等. 红外K波段白天探测能力分析验证[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 0804001.
HUANG ZH G, WANG J L, WANG H J, *et al.* Analysis and verification of infrared K band daytime detection ability[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0804001. (in Chinese)
- [11] PAN N, WANG K P, DUAN M Y, *et al.* Infrared methods for daytime detection of space target [C]. *AOPC 2022: Optical Sensing, Imaging, and Display Technology. December 18-20, 2022. Beijing, China*. SPIE, 2023.
- [12] 解虹,李展,陈慧琼,等. 基于超分辨率的地基观测图像增强系统[J]. 计算机与现代化, 2016(7): 1-5, 12.
XIE H, LI ZH, CHEN H Q, *et al.* Super resolution-based astronomical image processing system [J]. *Computer and Modernization*, 2016(7): 1-5, 12. (in Chinese)
- [13] 张超,时春霖,吴建霖,等. 面向视频测量机器人高噪声小视场星图的星点提取[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(2): 193-202.
ZHANG CH, SHI CH L, WU J L, *et al.* Star extraction of high noise star map with small field of view based on video measurement robot[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, 58(2): 193-202. (in Chinese)

- [14] 赵军阳,刘殿剑,张志利,等. 基于像点轨迹修正的星点质心定位方法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S1): 253-254, 257.

ZHAO J Y, LIU D J, ZHANG ZH L, *et al.* Location method of star point centroid based on image point trajectory correction [J]. *Application Research of Computers*, 2020, 37 (S1) : 253-254, 257. (in Chinese)

- [15] 张钰慧,胡瑞敏,肖晶. 面向卫星在轨实时处理的遥感视频动目标提取算法[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(1): 135-142, 150.

ZHANG Y H, HU R M, XIAO J. Moving objects extraction from remote sensing videos for satellite on-orbit real-time processing [J]. *Computer Applications and Software*, 2022, 39 (1) : 135-142, 150. (in Chinese)

作者简介:



宋力夺(1987—),男,吉林长春人,硕士研究生,助理研究员,2012年于吉林大学获得硕士学位,主要从事望远镜精密跟踪及数字图像处理等研究工作。E-mail:songlido@sina.com

通讯作者:



姚凯男(1987—),男,辽宁大连人,博士,研究员,博士生导师,2010年于四川大学获得学士学位,2015年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事空间目标光电探测与成像技术的研究。E-mail:yaokainan001@126.com