

面向低信噪比观测的小行星图像增强方法研究

黎雪

武汉轻工大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年3月10日; 录用日期: 2026年3月30日; 发布日期: 2026年4月10日

摘要

针对南极观测环境中小行星图像信号微弱、背景噪声干扰明显以及多帧数据难以有效增强的问题, 本文开展小行星图像增强方法研究。研究旨在提升弱小行星轨迹的可见性, 并提高多帧观测数据的处理效率。本文设计并实现了一套从坐标统一、灰度增强、图像对齐到多帧叠加与标准化裁剪的完整图像增强流程, 用于提升弱小行星轨迹的可见性并生成规范化数据。实验结果表明, 该流程能够明显提升小行星条痕的清晰度和信噪比, 同时具备批量自动运行能力。该方法为极端环境下天文观测数据的前端增强提供了有效的技术途径。

关键词

天文图像增强, 低信噪比, 多帧叠加, 星场配准

Research on Image Enhancement Methods for Asteroids in Low Signal-to-Noise Ratio Observations

Xue Li

School of Electrical and Electronic Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan Hubei

Received: March 10, 2026; accepted: March 30, 2026; published: April 10, 2026

Abstract

Focusing on the problems of weak asteroid image signals, significant background noise interference, and the difficulty in effectively enhancing multi-frame data in the Antarctic observation environment, this study explores image enhancement methods for asteroids. The research aims to enhance the visibility of faint asteroid trajectories and improve the processing efficiency of multi-frame observation data. This paper designs and implements a complete image enhancement process, including

coordinate unification, gray-scale enhancement, image alignment, multi-frame superposition, and standardized cropping, to enhance the visibility of faint asteroid trajectories and generate standardized data. Experimental results show that this process can significantly improve the clarity and signal-to-noise ratio of asteroid streaks, and it also has the ability to run automatically in batches. This method provides an effective technical approach for the front-end enhancement of astronomical observation data in extreme environments.

Keywords

Astronomical Image Enhancement, Low Signal-to-Noise Ratio, Multi-Frame Superposition, Star Field Registration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

小行星作为太阳系中的重要小天体，其轨迹和亮度信息为行星形成演化、轨道动力学研究以及近地天体风险评估提供了关键观测依据。近年来，多项巡天计划持续发现暗弱小行星目标，但在地基观测条件下，弱小行星通常仅表现为低对比度的点状或短条痕信号，易受到天空背景噪声、读出噪声以及密集恒星场干扰，导致单帧图像中目标显著性不足。针对这一问题，图像增强与预处理已被视为弱目标识别前的重要环节，其目的在于提高信号与背景之间的区分度，从而改善后续测量与检测的可靠性[1]。

地基观测图像的退化通常源于大气湍流、光学系统点扩散效应以及探测器噪声等因素。相关研究指出，在背景噪声主导条件下，通过合理的图像组合与增强策略，可以在统计意义上提高源探测的信噪比[2]。因此，在弱信号目标处理中，多帧图像的对齐与叠加成为提升目标可见度的重要技术路径。在巡天观测数据处理中，世界坐标系是实现跨帧对齐与精确定位的基础。Greisen 和 Calabretta 建立了 FITS 文件中世界坐标系的标准表达形式，为天文图像的空间标定提供了统一框架[3]。Lang 等开发的 Astrometry.net 能够对未知指向图像进行盲解算，自动输出天球坐标信息，使得大规模巡天图像具备统一的空间参考基础[4]。在配准阶段，Beroiz 等提出的基于恒星几何特征匹配的图像注册方法，为缺乏稳定坐标信息的图像对齐提供了有效手段[5]。

此外，差分成像与图像相减方法也常被用于弱信号天体的显著性增强与瞬变检测，Ofek 和 Zackay 提出的最优图像相减方法在目标检测和统计判别方面具有重要的参考价值[6]。

在图像增强方面，Lupton 等提出的反双曲正弦拉伸方法能够在保留亮源结构的同时增强暗弱细节，因此被广泛应用于天文图像显示与弱目标增强[7]。针对多帧数据组合问题，Zackay 和 Ofek 从理论上给出了在背景噪声主导条件下图像最优叠加的统计模型，指出合理的图像合成能够显著提高源探测能力[2]。Heinze 等通过数字跟踪方法验证了多帧叠加在暗弱运动目标探测中的有效性[8]。相关研究也表明，多帧叠加方法对于弱目标信号增强具有较好的应用效果[9]。

尽管现有研究分别在坐标标定、图像增强与多帧叠加方面取得进展，但多数工作侧重于单一技术环节，缺乏针对巡天原始数据从坐标恢复、单帧增强到多帧组合叠加的完整处理链讨论。尤其在南极等极端环境台站观测场景下，数据量大且运行条件特殊，对自动化与批量处理能力提出更高要求。因此，有必要构建一套面向低信噪比观测条件的图像增强方法，将坐标恢复、图像标准化处理、特征级配准以及多帧叠加有机结合，以提升弱小行星轨迹的可见性并提高数据处理效率。

2. 小行星图像增强方法设计

面向低信噪比观测条件下的小行星图像增强需求, 本文构建了一套由坐标恢复、图像预处理、恒星自动配准、多帧叠加增强和标准化裁剪组成的图像处理流程。整体流程以原始 FITS 图像为输入, 通过逐级增强与对齐处理, 提高弱小行星轨迹的显著性与信噪比, 并输出统一尺寸的增强子图数据。数据处理总流程如图 1 所示。

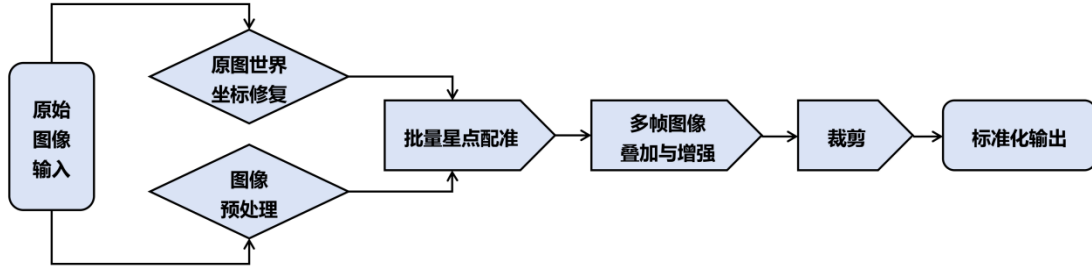


Figure 1. The overall process of data processing
图 1. 数据处理总流程

2.1. 坐标恢复与空间参考统一

在巡天观测数据处理中, 不同帧图像可能缺乏一致的世界坐标信息, 导致无法直接进行空间对齐。世界坐标系(WCS)建立像素坐标与天球坐标之间的映射关系, 其标准表达形式由 Greisen 和 Calabretta [3]系统提出。该映射可表示为:

$$(\alpha, \delta) = f(x, y) \tag{1}$$

其中, (α, δ) 表示像素坐标, $f(x, y)$ 为赤经和赤纬。

在实际观测中, 若缺失完整的头信息, 则需要进行盲解算。Lang 等提出的 Astrometry.net 可在未知指向条件下自动恢复图像的空间指向、尺度及方向信息[4]。本研究在获得标准 WCS 头文件后, 将其与原始像素数据进行融合重构:

$$I_{wcs}(x, y) = \{D(x, y), H_{wcs}\} \tag{2}$$

其中, $D(x, y)$ 为原始图像数据, H_{wcs} 为恢复的坐标头信息。该步骤的核心目的在于保证所有观测帧位于统一的天球坐标参考框架中, 为后续跨帧几何配准提供可靠基础。若缺乏该步骤, 多帧叠加将难以保证空间一致性。

2.2. 图像标准化与灰度增强

在低信噪比条件下, 原始图像灰度分布范围差异较大, 直接进行特征匹配易受曝光差异影响。因此, 需对图像进行标准化处理。

首先对异常值进行修正, 并对像素值进行线性归一化:

$$I_{norm}(x, y) = \frac{I(x, y) - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \tag{3}$$

为增强暗弱目标信号, 在归一化基础上采用反双曲正弦函数进行灰度拉伸。Lupton 等指出, 该方法在保留亮源结构的同时能够增强暗弱区域细节[7]。表达式为:

$$I_{enh}(x, y) = \frac{\arcsin h(k \cdot I_{norm}(x, y))}{\max(\arcsin h(k \cdot I_{norm}))} \tag{4}$$

归一化处理有助于消除不同帧之间的灰度尺度差异，提高后续特征提取的稳定性。反双曲正弦函数在低灰度区域近似线性，在高灰度区域趋于对数增长，有利于提升小行星条痕与背景之间的对比度。

2.3. 恒星特征配准

连续观测图像之间通常存在微小平移或旋转误差，若直接叠加将导致目标模糊。配准过程可表示为求解仿射变换：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \mathbf{t} \quad (5)$$

其中， $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ 为仿射变换矩阵， \mathbf{t} 为平移向量。

本研究采用基于恒星几何结构匹配的自动配准方法。Beroiz 等提出的图像注册算法能够在缺乏稳定坐标信息条件下实现高精度对齐[5]。对齐后的图像满足：

$$I_{reg}(x, y) = I_{enh}(T^{-1}(x, y)) \quad (6)$$

该步骤确保多帧图像在空间位置上保持一致。

2.4. 多帧滑动窗口叠加增强

在背景噪声主导条件下，多帧叠加能够提高信号统计显著性。Zackay 和 Ofek [2]从统计角度给出了图像最优叠加模型，指出若噪声独立，叠加后的信噪比满足：

$$SNR_N \approx \sqrt{N} SNR_1 \quad (7)$$

本研究采用滑动窗口最大值叠加策略：

$$I_{stack}(x, y) = \max_{t=1, \dots, N} I_{reg,t}(x, y) \quad (8)$$

该方法能够保留运动目标在时间序列中的峰值响应，同时抑制随机噪声波动。类似的多帧增强思想已在数字跟踪弱小行星研究中得到验证。

2.5. 统一裁剪与标准化输出

为保证增强结果具有统一数据结构，在完成叠加后对图像进行固定 640×640 尺寸裁剪，统一尺寸输出不仅降低数据存储复杂度，也为后续统计分析或检测算法提供标准化输入形式。至此，形成一条从原始观测图像到增强子图输出的完整图像增强方法。

3. 处理结果与分析

为验证所提出图像增强方法在低信噪比观测条件下的有效性，选取多组连续观测序列进行实验分析。实验数据均来源于同一观测时段的巡天图像，原始图像中小行星仅呈现为低对比度弱条痕结构，背景噪声较为显著。通过对增强前后的图像进行对比，并结合信噪比与对比度指标进行定量分析，评估所提方法的增强效果。

流程关键环节消融分析

为验证各处理环节在整体流程中的必要性，在保持输入数据与窗口参数一致的条件下，对所提出方法进行了消融分析，如图 2 消融对比所示。消融结果表明：(b) 若不进行灰度拉伸，弱小行星条痕在单帧图像中的局部对比度提升有限，后续恒星特征提取与目标辨识均更易受到背景噪声影响；(c) 若不进行配

准而直接进行多帧叠加，恒星位置与目标条痕将出现错位累积，导致叠加结果中目标边缘展宽甚至局部断裂，增强效果明显下降。

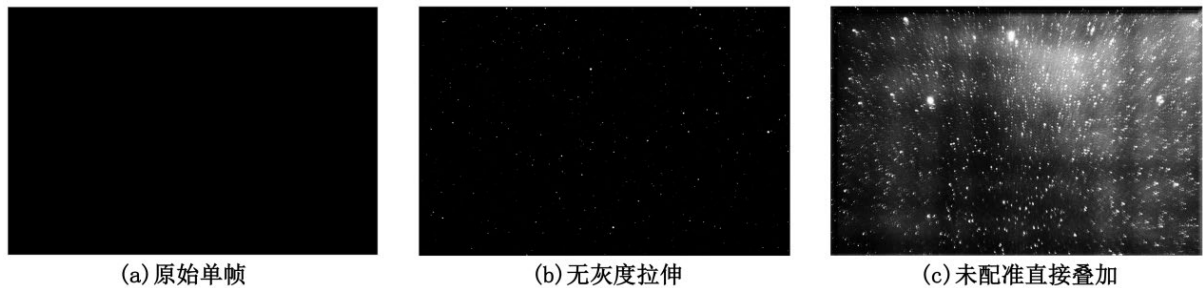


Figure 2. Ablation comparison
图 2. 消融对比

相比之下，完整流程在目标连续性、局部对比度和背景抑制方面均表现更优，如图 3 单帧图像处理前后结果对比所示，经过所提方法增强后，从原始单帧图像可以看出，目标条痕与背景噪声对比度较低。经灰度标准化与非线性增强处理后，条痕结构对比度有所提升。说明灰度增强、几何配准与多帧叠加在低信噪比小行星图像处理中具有协同必要性。进一步通过多帧滑动窗口叠加处理，条痕连续性明显增强，背景噪声波动相对减弱，目标与背景之间的区分度明显提高，如图 4 多帧滑动窗口叠加增强与结果输出所示。结果说明多帧叠加策略能够有效放大时间相关信号，同时削弱随机噪声。

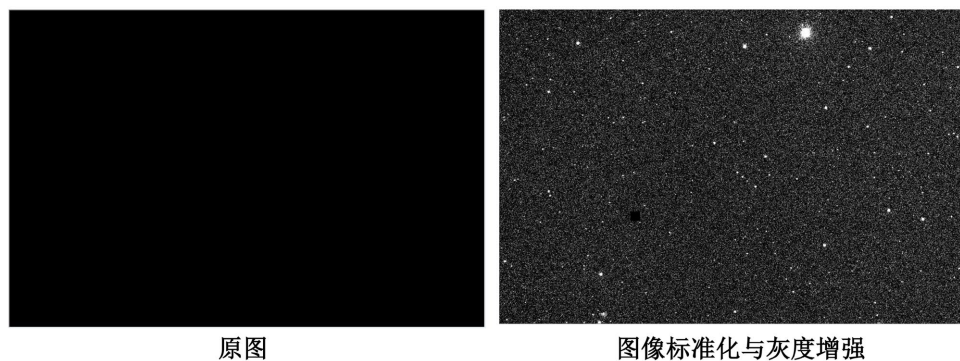


Figure 3. Comparison of results before and after single-frame image processing
图 3. 单帧图像处理前后结果对比

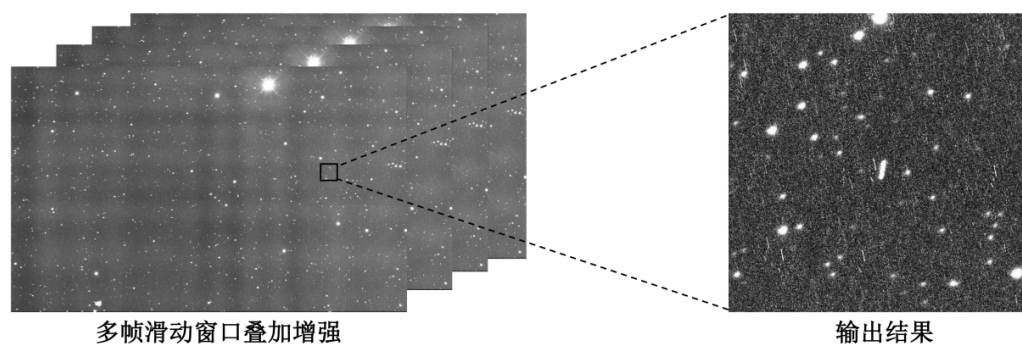


Figure 4. Multi-frame sliding window superposition enhancement and result output
图 4. 多帧滑动窗口叠加增强与结果输出

在所构建的增强流程中，坐标恢复保证多帧图像处于统一的空间参考框架，几何配准消除帧间偏移误差，灰度标准化与非线性拉伸提升弱目标对比度，多帧滑动窗口叠加进一步强化时间相关信号。各环节之间形成连续衔接关系，使目标信号在空间与时间两个维度上得到协同增强。相较于单帧图像，增强后的图像中小行星条痕更加清晰，背景噪声影响相对减弱，目标与背景之间的区分度明显提高。

从方法结构与实现路径来看，该增强流程基于已有天文图像处理理论构建，不依赖复杂模型训练或人工交互，能够在批量观测数据中稳定运行。其处理步骤具有明确的物理意义和统计基础，逻辑清晰，可扩展性较强。因此，该方法在低信噪比巡天观测场景下具有良好的工程可行性，可作为后续目标检测与轨迹分析的前端预处理手段。

4. 结论

针对低信噪比巡天观测条件下小行星图像中目标信号微弱、背景噪声干扰显著以及多帧数据难以有效增强的问题，本文构建了一条由坐标恢复、图像标准化增强、恒星自动配准、多帧滑动窗口叠加及统一裁剪组成的图像增强方法。该方法围绕空间统一与时序信息融合展开，通过消除帧间几何偏移并强化时间相关信号，实现对弱小行星条痕的有效增强。

分析结果表明，该方法能够在不依赖复杂检测模型的前提下，提高目标在图像中的可见性和信噪比水平，使弱信号结构更加连续、清晰。同时，该处理流程具有明确的理论依据和较好的工程可实现性，可在批量观测数据处理中稳定运行，为后续的小行星检测与轨迹分析提供质量更高的前端数据输入。

需要指出的是，本文方法仍存在一定局限性。其一，在高密度星场条件下，恒星分布复杂且相互邻近，基于恒星几何结构的自动配准可能出现局部匹配不稳定问题，进而影响后续叠加效果。其二，当视场中存在明亮饱和恒星时，饱和拖尾、晕环及局部强响应区域可能在灰度拉伸后被进一步突出，对暗弱小行星条痕形成掩盖或伪增强。其三，本文所采用的滑动窗口叠加更适用于短时间序列内近似线性运动目标，当目标存在明显非线性位移、速度变化或观测抖动时，直接叠加可能导致目标能量分散，削弱增强效果。

后续研究可从三个方向进一步改进。其一，针对高密度星场和亮星干扰问题，可引入恒星掩膜、背景建模及异常亮源抑制机制，以降低静态强信号对弱运动目标增强的影响。其二，针对不同观测帧成像质量不一致的问题，可结合背景噪声水平、星像半高全宽或图像清晰度指标构建自适应权重叠加策略，以替代当前固定的最大值叠加方式。其三，针对非线性运动目标，可在叠加前加入基于轨迹预测的运动补偿步骤，使目标信号在时间维上实现更准确的能量聚合，从而进一步提升复杂观测条件下的增强稳定性。

参考文献

- [1] Bertin, E. and Arnouts, S. (1996) SExtractor: Software for Source Extraction. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, **117**, 393-404. <https://doi.org/10.1051/aas:1996164>
- [2] Zackay, B. and Ofek, E.O. (2017) How to COAAD Images. I. Optimal Source Detection and Photometry of Point Sources Using Ensembles of Images. *The Astrophysical Journal*, **836**, Article No. 187. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/836/2/187>
- [3] Greisen, E.W. and Calabretta, M.R. (2002) Representations of World Coordinates in FITS. *Astronomy & Astrophysics*, **395**, 1061-1075. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021326>
- [4] Lang, D., Hogg, D.W., Mierle, K., Blanton, M. and Roweis, S. (2010) Astrometry.net: Blind Astrometric Calibration of Arbitrary Astronomical Images. *The Astronomical Journal*, **139**, 1782-1800. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/5/1782>
- [5] Beroiz, M., Cabral, J.B. and Sanchez, B. (2020) Astroalign: A Python Module for Astronomical Image Registration. *Astronomy and Computing*, **32**, Article ID: 100384. <https://doi.org/10.1016/j.ascom.2020.100384>

- [6] Ofek, E.O. and Zackay, B. (2017) Proper Image Subtraction-Optimal Transient Detection, Photometry, and Hypothesis Testing. *The Astrophysical Journal*, **836**, Article No. 188.
- [7] Lupton, R., Blanton, M.R., Fekete, G., Hogg, D.W., O'Mullane, W., Szalay, A., *et al.* (2004) Preparing Red-Green-Blue Images from CCD Data. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **116**, 133-137.
<https://doi.org/10.1086/382245>
- [8] Heinze, A.N., Metchev, S. and Trollo, J. (2015) Digital Tracking Observations Can Discover Asteroids 10 Times Fainter than Conventional Searches. *The Astronomical Journal*, **150**, Article No. 125.
<https://doi.org/10.1088/0004-6256/150/4/125>
- [9] 张志伟, 王晓辉, 刘海涛. 基于多帧叠加的弱目标增强方法研究[J]. 光学技术, 2016, 42(5): 487-492.