中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

基于IRLS算法的空间相机视轴热指向分析

刘俊豪 陈力 毕诗文 付天骄 赵甄章 张星祥

Thermal line-of-sight pointing analysis of a space camera based on the IRLS algorithm

LIU Jun-hao, CHEN Li, BI Shi-wen, FU Tian-jiao, ZHAO Zhen-zhang, ZHANG Xing-xiang

引用本文:
刘俊豪, 陈力, 毕诗文, 等. 基于IRLS算法的空间相机视轴热指向分析[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.3724/CO.2026-0039
LIU Jun-hao, CHEN Li, BI Shi-wen, *et al*. Thermal line-of-sight pointing analysis of a space camera based on the IRLS algorithm[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.3724/CO.2026-0039

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3724/CO.2026-0039

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单一透镜材料宽温度范围空间相机无热化设计

Athermal design of a space camera using a single lens material over a wide temperature range

中国光学（中英文）. 2025, 18(6): 1388 https://doi.org/10.37188/CO.2025-0065

双线阵测绘相机视轴抖动实时测量

Real-time measurement for boresight vibration of dual line array surveying and mapping cameras

中国光学（中英文）. 2023, 16(4): 878 https://doi.org/10.37188/CO-2022-0175

轻小型全铝高分相机

All-aluminum high-resolution camera with lightweight and compact size

中国光学（中英文）. 2023, 16(6): 1450 https://doi.org/10.37188/CO.2023-0062

基于单相机的空间目标相对位姿测量系统

Monocular camera-based relative position and orientation estimation system for space targets

中国光学（中英文）. 2025, 18(5): 1111 https://doi.org/10.37188/CO.2025-0057

基于单目视觉边缘频谱的散焦图像测距算法研究

An improved algorithm for monocular camera edge spectrum based ranging by defocused images

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 627 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0171

多普勒外差干涉仪的光机热集成分析

Opto-mechanical-thermal integration analysis of Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer

中国光学（中英文）. 2024, 17(6): 1489 https://doi.org/10.37188/CO.2023-0234

文章编号　2097-1842(xxxx)x-0001-10

基于 IRLS 算法的空间相机视轴热指向分析

刘俊豪[1,2], 陈　力[1,2], 毕诗文[1,2], 付天骄[1], 赵甄章[1], 张星祥[1*]
（1. 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院大学, 北京 101408）

摘要: 空间相机在轨运行过程中受到复杂热环境影响, 结构温度场的非均匀变化会引起热弹性变形, 从而导致视轴指向偏移, 严重影响成像精度与稳定性。针对空间相机在复杂热环境下视轴指向稳定性分析过程中传统最小二乘方法(Least Squares, LS)鲁棒性不足的问题, 本文提出一种基于迭代重加权最小二乘(Iteratively Reweighted Least Squares, IRLS)算法的空间相机视轴热指向分析方法。首先, 建立空间相机热-结构耦合模型, 分析温度场变化与视轴偏移之间的映射关系; 其次, 引入 IRLS 算法对模型参数进行稳健估计, 通过构造加权残差函数, 有效抑制异常测量数据对参数辨识结果的影响, 提高热变形预测精度, 并采用基于能量迭代的自适应窗质心定位算法方式, 获得光斑质心随温度变化情况。针对在轨相机指向的热致漂移, 开展热温度实验, 结合仿真数据与地面热试验数据进行验证, 对比传统最小二乘方法与 IRLS 方法在指向误差预测精度与收敛特性方面的差异。结果表明, 所提出的 IRLS 热分析方法在存在测量噪声与异常点的情况下, 能够显著提升视轴指向偏移预测精度, 增强模型稳定性与鲁棒性, 为高分辨率空间相机的在轨热变形补偿与精度保持提供了有效技术途径。

关　键　词: 空间相机; IRLS 算法; 热指向分析
中图分类号: TP394.1;TH691.9　**文献标志码:** A　**doi:** 10.3724/CO.2026-0039　**CSTR:** 32171.14.CO.2026-0039

Thermal line-of-sight pointing analysis of a space camera based on the IRLS algorithm

LIU Jun-hao[1,2], CHEN Li[1,2], BI Shi-wen[1,2], FU Tian-jiao[1], ZHAO Zhen-zhang[1], ZHANG Xing-xiang[1*]
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Jilin, Changchun* 130022, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 101408, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: jan_zxx@163.com*

Abstract: During on-orbit operation, space cameras are exposed to complex thermal environments. Non-uniform variations in the structural temperature field can induce thermoelastic deformation, leading to line-of-sight (LOS) pointing deviations and significantly degrading imaging accuracy and stability. To address the insufficient robustness of the traditional Least Squares (LS) method in analyzing LOS pointing stability of space cameras under complex thermal conditions, this paper proposes a thermal line-of-sight pointing analysis method based on the Iteratively Reweighted Least Squares (IRLS) algorithm. First, a thermo-structural

收稿日期: xxxx-xx-xx; **修订日期:** xxxx-xx-xx
基金项目: 长春光机所“旭光人才计划”(No. E4X011Y6U0)
Supported by “Dawnlight Talent Program” of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (No. E4X011Y6U0)

coupled model of the space camera is established to analyze the mapping relationship between temperature field variations and LOS pointing deviation. Then, the IRLS algorithm is introduced to perform robust estimation of model parameters. By constructing a weighted residual function, the influence of abnormal measurement data on parameter identification is effectively suppressed, thereby improving the prediction accuracy of thermal deformation. Meanwhile, an energy-iterative window adaptive centroiding algorithm is adopted to capture the variation of spot centroid positions with temperature changes. To investigate thermally induced pointing drift of the on-orbit camera, thermal experiments are conducted. Simulation results are further validated using ground-based thermal test data, and the performance of the proposed IRLS method is compared with that of the traditional LS method in terms of pointing error prediction accuracy and convergence characteristics. The results demonstrate that the proposed IRLS-based thermal analysis method significantly improves the prediction accuracy of LOS pointing deviation in the presence of measurement noise and outliers, while enhancing the stability and robustness of the model. This approach provides an effective technical solution for on-orbit thermal deformation compensation and accuracy maintenance of high-resolution space cameras.

Key words: space camera; IRLS algorithm; pointing thermal analysis

1 引 言

高分辨率空间测绘相机对成像几何精度和视轴稳定性具有极为严格的要求[1-4]。视轴漂移不仅会破坏成像的一致性，而且会在地面投影坐标中引入系统性偏差，直接影响立体测绘解算精度与遥感数据的几何可靠性。离轴三反光学系统凭借其大视场、长焦距、无色散以及热稳定性优良等特性，已成为空间测绘相机的主流结构。相机的几何误差来源复杂多样，其中内外方位元素的不确定性、装调误差以及在轨热-结构耦合效应均会引发不同程度的精度退化。尤其是在轨运行期间，受到的多源热载荷耦合作用，包括太阳辐照、地球红外辐射、深空冷背景以及相机内部电子器件发热等因素，通过热–结构耦合效应引起光机系统热变形，具体体现为角秒量级的视轴偏移，这已成为限制测绘精度的关键因素之一[5]。

针对上述挑战，国内外学者提出了多种测绘误差抑制手，可分为以下两类：一类是针对解算算法的修正，例如，基于星敏感器和陀螺组合的卫星姿态确定算，获得连续最优四元数解，补偿了陀螺仪的漂移误差,提高姿态确定的精度[6-7]；利用地面靶场，基于图像匹配的在轨几何标定方法，通过匹配影像上的对应点，建立几何模型，解算传感器参数误差，消除相机视轴长期热变形量[8-9]；另一类，近年来，自由曲面加工与光机一体化设计的发展进一步提升了其成像质量与工程适用度，可基于光线敏感度矩阵方法，识别视轴敏感光学元件，通过光–机联合优化方法，计算极端工况下相机系统传函，剖析其结构参数的影响因素[10-11]；或是采用自准直法，建立相机视轴指向监测，补偿相机视轴指向，降低测绘数据误差[12-13]。这些方法在补偿与修正方面发挥了积极作用，但仍存在明显局限：它们主要依赖于事后修正，误差抑制水平有一定局限。

本文采用迭代加权最小二乘法（IRLS）计算三轴姿态角度，参数辨识是“温度—视轴偏移”模型落地的关键环节，传统最小二乘（LS）对异常点敏感，易导致参数被少量粗差影响。为此，统计与信号处理领域形成了以 M 估计为代表的鲁棒回归体系，其中迭代重加权最小二乘（IRLS）是最常用的数值实现路径之一：通过残差自适应更新权重，逐步降低大残差样本对估计的影响，从而提升抗噪声、抗粗差能力。经典工作系统讨论了基于 IRLS 的鲁棒回归计算框架与实现细节，并成为后续大量工程应用的基础。国内学术界也较早将 IRLS 作为稳健回归/参数估计的核心工具引入相关研究，为其在工程测量数据处理中的应用提供了方法论支撑。然而，在空间相机视轴指向热分

析领域, 公开文献中将 IRLS 明确用于温度—指向映射模型参数辨识、并与热试验/仿真数据融合验证的研究仍相对有限, 这也为本文工作提供了切入点[14-15]。

通过迭代调整每个观测数据点的权重, 来抑制或降低“离群值”和“大噪声点”对最终解的影响, 在使用线性化方求解时, 初始值不好或存在坏点容易导致迭代发散或收敛到局部极值。IRLS 可以嵌入到非线性优化框架, 在每次线性化步骤内, 通过加权处理, 使当前线性模型更“聚焦”于内点数据, 从而为非线性求解器提供更稳定、更准确的搜索方向, 提高了整体优化的收敛成功率[16]。目前, 空间相机的姿态确定通常要求高实时性或有限的计算资源(如星敏感器), 在其工作时, 星点识别可能出错, 采用迭代加权最小二乘法能在求解姿态矩时, 降低错误匹配星点的权重, 确保姿态输出稳定可靠。

通过仿真验证了在采用 IRLS 计算三轴姿态角度时质心提取精度对姿态角度测量的影响, 得出了质心提取精度是主要影响因素。本文采用一种基于能量迭代的窗口自适应质心算法。该方法成功缓解了图像检测器随机噪声对质心提取的影响[17-19]。与其它方法相比, 该方法具有更好的稳定性和时间效率。并且通过空间相机视轴指向热分析试验, 验证了在模拟不同温度下的光斑漂移时, 该算法可对质心提取精度量有效提升, 从而提升了三轴在角度计算的准确度。

2　系统光轴热致漂移量计算

2.1　IRLS 算法

相机视轴漂移量一般是秒级, 在小角度近似下, 不同转序对应的旋转矩阵解析形式一致。该应用场景下可以构建三轴小量与像点前后坐标之间的关系, 如下所示:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}1 & -\gamma & \beta\\ \gamma & 1 & -\alpha\\ -\beta & \alpha & 1\end{bmatrix}\quad, \tag{1}$$

其中α是 X 轴转动量、β是 Y 轴转动量、γ是 Z 轴转动量。

根据热变形坐前后光斑变化关系, 建立如下方程:

$$\begin{cases}x_{a1}-x_{a0}=z_{a0}\beta-y_{a0}\gamma\\ y_{a1}-y_{a0}=-z_{a0}\alpha+x_{a0}\gamma\\ x_{b1}-x_{b0}=z_{b0}\beta-y_{b0}\gamma\\ y_{b1}-y_{b0}=-z_{b0}\alpha+x_{b0}\gamma\end{cases}\quad, \tag{2}$$

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{v}=\boldsymbol{b}\quad, \tag{3}$$

其中

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0 & z_{a0} & -y_{a0}\\ -z_{a0} & 0 & x_{a0}\\ 0 & z_{b0} & -y_{b0}\\ -z_{b0} & 0 & x_{b0}\end{bmatrix}\quad, \tag{4}$$

$$\boldsymbol{v}=\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\\ \gamma\end{bmatrix}\quad, \tag{5}$$

$$\boldsymbol{b}=\begin{bmatrix}x_{a1}-x_{a0}\\ y_{a1}-y_{a0}\\ x_{b1}-x_{b0}\\ y_{b1}-y_{b0}\end{bmatrix}\quad, \tag{6}$$

采用迭代加权最小二乘法(IRLS)计算三轴姿态角度, 其核心思想是在每次迭代中, 根据当前的残差重新计算权重, 从而在下一次加权最小二乘中降低异常值的权重。具体步骤如下:

首先直接求解最小二乘问题, 得到初始的姿态估计$\boldsymbol{v}^{(0)}$。

$$\boldsymbol{v}^{(0)}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{b}\quad, \tag{7}$$

然后计算计算每个测量方程的当前残差$\boldsymbol{r}_{\mathrm{i}}^{(\mathrm{k})}$。

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{i}}^{(\mathrm{k})}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{i}}\boldsymbol{v}^{(\mathrm{k})}-\boldsymbol{b}_{\mathrm{i}}\quad, \tag{8}$$

其中$\boldsymbol{A}_{\mathrm{i}}$对应第i个约束。

根据残差计算新的权重$\boldsymbol{w}_{\mathrm{i}}^{(\mathrm{k}+1)}$。

$$\boldsymbol{w}_{\mathrm{i}}^{(\mathrm{k}+1)}=\begin{cases}1 & |\boldsymbol{r}_{\mathrm{i}}^{(\mathrm{k})}|\leqslant c\\ \dfrac{c}{|\boldsymbol{r}_{\mathrm{i}}^{(\mathrm{k})}|} & |\boldsymbol{r}_{\mathrm{i}}^{(\mathrm{k})}|>c\end{cases}\quad, \tag{9}$$

其中c是阈值参数, 取残差标准差的 1.345 倍。

将所有权重$\boldsymbol{w}_{\mathrm{i}}^{(\mathrm{k}+1)}$放在对角线上, 形成权重矩阵$\boldsymbol{W}^{(\mathrm{k}+1)}$。求解加权后的正规方程, 得到新的估计值。

$$\boldsymbol{v}^{(\mathrm{k}+1)}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}^{(\mathrm{k}+1)}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}^{(\mathrm{k}+1)}\boldsymbol{b}\quad, \tag{10}$$

如果$\|\boldsymbol{v}^{(\mathrm{k}+1)}-\boldsymbol{v}^{(\mathrm{k})}\|$小于设定的阈值或者达到最大迭代次数, 则停止迭代。否则返回再次计算

残差。对于每次迭代$k=0,1,2,\cdots$，执行以上操作直到收敛：2.2 蒙特卡洛分析

设置光学系统焦距 260 mm、光束夹角为 1.1°、**A** 矢量坐标为(5, 75, −475)、**B** 矢量坐标为(−5, 75, −475)。

首先给定三轴旋转角度：0.01°、0.01°、0.01°，计算旋转矩阵 **R**。结合给定初始向量$\boldsymbol{v}_{a0}$、$\boldsymbol{v}_{b0}$，得到旋转后向量$\boldsymbol{v}_{a1}$、$\boldsymbol{v}_{b1}$，将旋转后向量的 Z 轴坐标设置为-475。不引入质心提取误差情况下，对变化前后向量进行归一化处理，计算结果在 Z 轴存在 2% 误差、不归一化处理 Z 轴计算误差为 0.3%，因此后续向量不进行归一化处理。

A与初始状态坐标相关，认为初始状态坐标值无误差，测量时刻坐标值引入质心提取误差，因此在向量***b***的四个元素上均引入质心波动为 0.1 像素、波动范围在±0.1 像素的高斯噪声（CMOS 单元像素大小为 4.5 微米）。采用加权最小二乘法计算三轴姿态结果，对不同质心提取精度条件下姿态测量误差结果进行仿真分析，得出质心计算精度在 0.1、0.5、0.01 像素下三轴计算误差曲线，共计进行 5 000 次蒙特卡洛分析，结果如下：

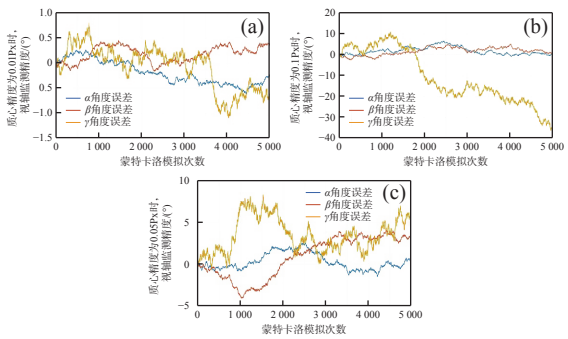

图 1　视轴监测精度分析

Fig. 1　Accuracy Analysis of Boresight Monitoring

以上可以看出在不同质心计算精度条件下 X 轴和 Y 轴误差曲线基本与视轴监测误差 0″线拟合，波动范围 0.5″以内，但 Z 轴误差在质心计算精度在 0.1 px 和 0.5 px 时均存在 5″以上的误差，只有 0.01 px 时可将 Z 轴误差控制在 0.5″以内。这足以说明质心提取精度对视轴监测系统误差的影响，所以需建立一个能使质心计算精度提升至 0.01 px 以内的算法以减小基于迭代加权最小二乘法计算三轴姿态角度的计算误差。

2.2　基于能量迭代的窗口自适应质心提取方法

从空间相机视轴热分析的数据处理流程来看，姿态角解算精度不仅取决于求解算法本身，还与输入观测数据的精度密切相关。在本文提出的视轴指向分析框架中，迭代重加权最小二乘（IRLS）算法主要用于三轴姿态角的稳健解算，通过残差自适应加权机制降低异常观测值对参数估计结果的影响，从而提高模型求解的稳定性与鲁棒性。然而，IRLS 算法的求解精度在很大程度上依赖于输入观测量的可靠性。当像面光斑质心定位精度不足时，测量误差会在姿态解算过程中被放大，从而影响最终的视轴指向分析结果。

因此，在进行姿态解算之前，需要首先提高光斑质心定位的精度与稳定性。针对传统固定窗口质心算法在噪声干扰和窗口偏移条件下容易产生定位误差的问题，本文引入一种基于能量迭代的窗口自适应质心提取算法（Energy Iterative Window Adaptive, EIWA）。该方法通过能量迭代与自适应窗口调整机制，使计算窗口逐步逼近光斑真实能量中心，从而有效抑制随机噪声及背景干扰对质心定位结果的影响，为后续 IRLS 姿态解算提供更加稳定可靠的输入观测数据。

基于能量迭代的自适应质心法（EIWA）是一种常用于亚像素精度图像定位（如星点定位、光斑中心提取）的算法。其核心思想是通过不断调整计算窗口或权重的中心位置，使其逐步逼近目标的真实能量中心，从而克服固定窗口带来的系统误差，该算法可有效克服背景噪声、窗口偏移以及能量不对称带来的误差。该算法原理如下所示[20]。

在确定了光斑所在的区域后，进行第一次粗略定位，作为迭代的起点。选取初始窗口：以光斑的峰值像素为中心，选取一个窗口。窗口大小要足够覆盖光斑的主要能量区域（此处设置窗口尺寸为光斑直径的 1.5 倍）。使用传统的灰度加权质心法计算初始中心坐标(x_0, y_0)。

$$x_0=\frac{\sum_i\sum_j I'(i,j)\cdot i}{\sum_i\sum_j I'(i,j)}\quad, \tag{11}$$

$$y_0=\frac{\sum_i\sum_j I'(i,j)\cdot j}{\sum_i\sum_j I'(i,j)}\quad, \tag{12}$$

其中 $I(i,j)$ 是像素 (i,j) 的灰度值。

算法的核心环节，通过动态调整计算窗口，使质心位置逐渐收敛到真正的能量中心。

设当前迭代次数为k，当前质心位置为$C_k(x_k,y_k)$。

以C_k为中心，划定一个固定大小的方形窗口（例如$N\times N$像素，N通常取略大于光斑直径的奇数值）。这个窗口的边界可能落在亚像素位置，意味着计算时需要涉及像素插值，或者将窗口视为一个连续区域的边界，包含所有与该区域重叠的像素[20]。

在划定的新窗口内，重新计算质心，得到$C_{k+1}(x_{k+1},y_{k+1})$。

$$x_{k+1}=\frac{\sum_{i\in W_k}\sum_{j\in W_k}I'(i,j)\cdot i}{\sum_{i\in W_k}\sum_{j\in W_k}I'(i,j)}\quad,\qquad(13)$$

$$y_{k+1}=\frac{\sum_{i\in W_k}\sum_{j\in W_k}I'(i,j)\cdot j}{\sum_{i\in W_k}\sum_{j\in W_k}I'(i,j)}\quad,\qquad(14)$$

当窗口中心不再移动时，说明窗口已经对准了光斑的能量中心。计算偏移量：

$$\Delta=\sqrt{(x_{k+1}-x_k)^2+(y_{k+1}-y_k)^2}\quad,\qquad(15)$$

如果$\Delta<\varepsilon$，则认为收敛，迭代终止误差为ε= 0.005 像素。

基于能量迭代机制的窗口自适应质心算法，有效抑制了图像探测器随机噪声对质心定位的干扰。相较于传统方法，该算法在稳定性和计算效率方面表现更优。考虑到噪声分布特性及尺度变化对定位精度的影响，模型对不同形态分布的黑子目标具备更强的适应性[21]。

3　空间相机热温度实验

3.1　空间相机热温度实验设计

空间相机在轨运行过程中会受到太阳辐照、地球红外辐射以及内部电子设备发热等多种热源影响，导致相机结构产生非均匀温度场，从而引起光机结构的热弹性变形，并进一步造成视轴指向漂移。在空间光学系统热设计中，通常采用低热膨胀材料（如 Invar 合金、碳纤维复合材料）及合理的热控布局，以降低结构热变形对光学性能的影响。同时，通过热设计参数灵敏度分析，可以识别关键热敏感结构，从而实现针对性的热稳定优化[22-23]。

为验证所提出的 IRLS 姿态解算方法在实际热环境中的适用性，并分析温度变化对相机视轴稳定性的影响，开展了空间相机热温度实验。

本实验对象为一台离轴三反空间相机，如图 2 所示。其主要光学参数如下：离轴角为 6°，系统焦距为 260 mm，视场为 4.23°×2.38°。探测器分辨率为 1 920×1 080，像元尺寸为 10 μm。实验采用双光束光源模拟远距离平行光，通过监测光斑在 CMOS 靶面上的位置变化，反演相机视轴的微小角度变化。

图 2　高速面阵相机

Fig. 2　High-speed Area Scan Camera

实验系统主要由激光光源、双光纤耦合器、空间相机本体、CMOS 监测相机以及温度控制系统组成，如图 3 所示。其中，两束激光通过光纤输出后形成两个稳定光斑，并分别成像在 CMOS 探测器上。通过连续采集光斑图像并提取其质心位置，可以实时获得光斑位置随温度变化的漂移量。

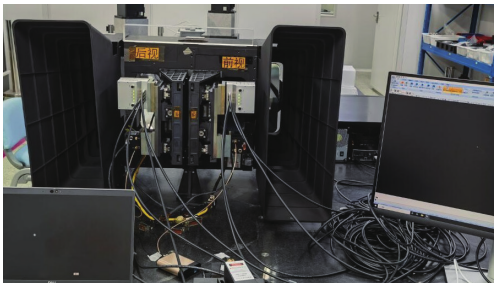

图 3　实验现场图

Fig. 3　Experiment Site Diagram

实验采用 MBL-U-430 nm-SF 型激光器作为光源，其中心波长为 430 nm，输出模式为连续波（CW）。通过双头光纤输出形成两束稳定光源，用

于构建双基准光斑。

为了模拟空间相机在轨温度变化环境，本实验通过实验室温控系统对环境温度进行控制。实验初始温度设置为 18 °C，随后缓慢升温至 25 °C，温度变化范围为 7 °C。温度变化过程中，每隔 5 s 采集一帧光斑图像，同时记录环境温度数据。通过同步分析温度变化与光斑质心漂移之间的关系，可获得相机视轴指向随温度变化的规律。

双光束光源经空间相机成像后，在 CMOS 靶面形成两个稳定光斑，如图 4 所示。

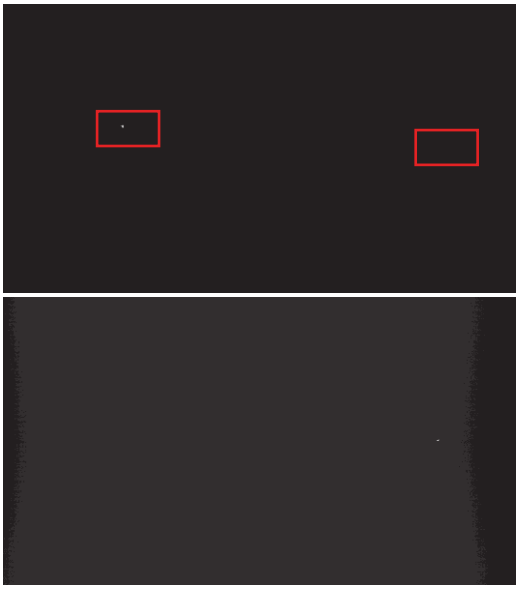

图 4　空间相机热温度实验成像光斑

Fig. 4　Imaging Spots in the Thermal Vacuum Test of the Space Camera

3.2　空间相机热温度试验数据分析

在实验过程中，通过高速相机连续采集光斑图像，并利用基于能量迭代的窗口自适应质心提取算法(EIWA)对每一帧图像进行质心计算，从而获得光斑质心位置随时间变化的数据序列。

为了降低随机噪声以及图像探测器读出噪声对质心定位结果的影响，在质心计算完成后，对原始质心数据引入卡尔曼滤波进行平滑处理，从而获得更加稳定的光斑位置变化曲线。图 5 给出了光斑 A 和光斑 B 在温度变化过程中的质心坐标漂移曲线。

从图 5 可以看出，随着环境温度由 18 °C 逐渐升高至 25 °C，光斑质心在 CMOS 靶面上呈现出明显的漂移趋势。这种漂移主要是由于相机结构在温度变化条件下产生热弹性形变，导致光学系统视轴方向发生微小变化，从而引起像面光斑位置移动。

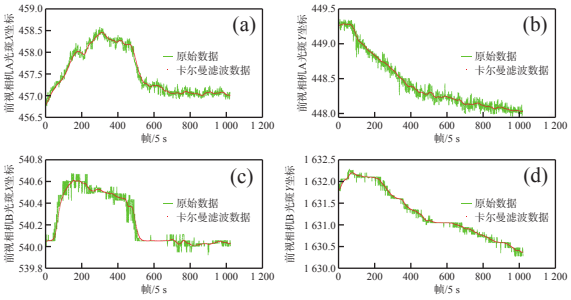

图 5　前视相机的监测光斑随温度漂移曲线

Fig. 5　Drift Curves of the monitoring spot of the forward-looking camera with temperature

为了进一步评估质心提取算法的稳定性，在恒温条件下进行了长时间图像采样，并统计光斑质心位置随时间变化情况。图 6 给出了恒温环境下高速采样图像的质心位置波动曲线。实验结果表明，采用 EIWA 算法后，光斑质心位置的随机波动明显减小，说明该算法在抑制图像噪声干扰方面具有较好的效果。

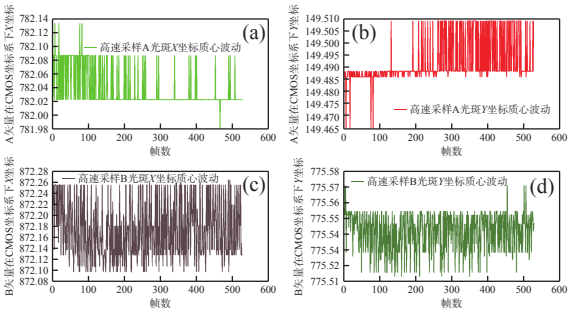

图 6　恒温环境下高速采样图像质心时变曲线

Fig. 6　Time-varying curves of image centroids under high-speed sampling in a constant temperature environment

为了评估基于能量迭代的窗口自适应质心提取算法(EIWA)对光斑质心定位精度的提升效果，需要对质心定位结果进行统计分析。实验中通过连续采集光斑图像，计算每一帧图像中光斑质心的位置，并对质心坐标序列进行统计分析，从而得到质心定位精度指标。

设第 i 帧图像中光斑质心坐标为：(x_i, y_i)，其中 $i = 1, 2, \cdots, N$，N 为采样图像总帧数，实验共计取样 1 000 帧，此处抽取 100 帧作为计算样本。

首先计算质心坐标的平均值：

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \quad , \tag{16}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i \quad , \tag{17}$$

其中 $\bar{x}$和 $\bar{y}$表示质心位置的平均坐标。

随后计算质心位置相对于平均值的波动情况。质心提取精度通常采用均方根误差(Root Mean Square)进行评价, 其计算公式为:

$$RMS_x = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \quad , \tag{18}$$

$$RMS_y = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2} \quad , \tag{19}$$

RMS 值反映了质心位置在统计意义上的随机波动幅度, 其数值越小, 说明质心定位稳定性越高, 提取精度越好。

此外, 为了反映质心位置的最大波动范围, 引入峰谷值(Peak-to-Valley)作为辅助评价指标, 其计算公式为:

$$PV_x = x_{max} - x_{min} \quad , \tag{20}$$

$$PV_y = y_{max} - y_{min} \quad , \tag{21}$$

其中 x_{max}、x_{min} 分别表示质心横坐标的最大值和最小值。

为了定量评估 EIWA 算法对姿态角解算精度的影响, 分别统计了传统灰度加权质心提取法和 EIWA 质心提取法提取精度误差的均方根值(RMS)以及峰谷值(PV)。实验结果如表 1 所示。

实验结果表明, 在采用 EIWA 质心提取算法后, 各光斑在不同方向上的质心定位误差均有所降低。具体而言, 光斑 A 在 X 方向的 RMS 由 0.0276 px 降低至 0.0214 px, 下降约 22.5%, 表明 EIWA 算法在抑制随机噪声影响方面具有较好的效果; 在 Y 方向上, RMS 由 0.0091 px 降低至 0.0088 px, 误差亦有所减小。对于光斑 B, 其 X 方向 RMS 由 0.0520 px 降低至 0.0496 px, Y 方向 RMS 由 0.0122 px 降低至 0.0115 px, 均呈现出一定程度的下降趋势。

从峰谷值(PV)指标来看, 各方向 PV 值也均有所减小, 例如光斑 A 在 X 方向的 PV 由 0.1517 px 降低至 0.1509 px, Y 方向由 0.0437 px 降低至 0.0401 px; 光斑 B 在 X 方向和 Y 方向的 PV 值分别由 0.1658 px 和 0.0577 px 降低至 0.1651 px 和 0.0554 px。虽然 PV 指标的改善幅度相对 RMS 较小, 但整体呈下降趋势, 说明 EIWA 算法在减少极值波动方面同样具有一定作用。

表 1　灰度加权法和 EIWA 质心提取精度误差 RMS 和 PV 值

Tab. 1　RMS and PV of centroid extraction errors before and after EIWA centroiding

灰度加权质心提取法	EIWA质心提取法
rms_ax =0.0276 px	rms_ax =0.0214 px
pv_ax =0.1517 px	pv_ax =0.1509 px
rms_ay =0.0091 px	rms_ay =0.0088 px
pv_ay =0.0437 px	pv_ay =0.0401 px
rms_bx =0.0520 px	rms_bx =0.0496 px
pv_bx =0.1658 px	pv_bx =0.1651 px
rms_by =0.0122 px	rms_by =0.0115 px
pv_by =0.0577 px	pv_by =0.0554 px

上述结果表明, EIWA 算法通过能量迭代与自适应窗口调整机制, 使质心计算窗口逐步逼近光斑真实能量中心, 从而减少了固定窗口偏移和背景噪声对质心定位结果的影响。与传统固定窗口质心算法相比, 该方法能够有效降低随机噪声在质心计算过程中的权重, 使质心定位结果更加稳定。

在 EIWA 质心提取结果基础上, 利用 IRLS 对双光斑漂移观测量进行三轴姿态角联合解算, 并按均方根误差定义统计全部实验帧的姿态角结果。

对全部 100 帧实验数据分别进行 IRLS 解算, 可得到第i帧对应的三轴姿态角结果$(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$。进一步采用均方根误差定义三轴姿态角测量精度:

$$\mathrm{RMS}_\alpha = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\alpha_i - \bar{\alpha})^2} \quad , \tag{22}$$

$$\mathrm{RMS}_\beta = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\beta_i - \bar{\beta})^2} \quad , \tag{23}$$

$$\mathrm{RMS}_\gamma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\gamma_i - \bar{\gamma})^2} \quad , \tag{24}$$

其中，$\overline{\alpha}$、$\overline{\beta}$、$\overline{\gamma}$ 分别为对应轴姿态角的平均值。进一步换算为角秒，可得出姿态角测量误差 RMS 范围约为 0.21″–0.39″，在实验室条件下该精度可达到亚角秒级姿态测量精度，能够满足高分辨率空间相机视轴稳定性监测的工程需求。

为评估 IRLS 算法在姿态角解算中的稳健性，进一步将其与普通最小二乘（LS）方法进行了对比。表 2 给出了两种方法在相同质心提取条件下的三轴姿态角误差统计结果。由于 EIWA 算法已在前端提高了质心提取精度，进入姿态解算阶段的观测数据整体质量较高，因此 IRLS 相对于 LS 的改进幅度主要体现在异常残差抑制和极值波动控制方面，其在 PV 指标上的改善更为明显。可以看出，在存在测量噪声与少量异常观测值的情况下，IRLS 方法在三轴误差 RMS 和 PV 指标上均优于 LS 方法。

表 2　LS 与 IRLS 三轴姿态角误差对比

Tab. 2　Comparison of three-axis attitude angle errors between LS and IRLS

Method	RMSx(″)	RMSx(″)	RMSz(″)	PVx(″)	PVy(″)	PV_Z(″)
LS	0.26	0.24	0.48	1.02	0.91	1.36
IRLS	0.21	0.23	0.39	0.83	0.78	1.05

实验结果表明，在 EIWA 质心提取算法提供高精度观测数据的基础上，IRLS 方法能够进一步提高姿态角解算稳定性，使三轴姿态角测量误差 RMS 稳定控制在 0.21″–0.39″范围内，表明该方法能够在复杂热环境与噪声条件下实现高精度视轴指向分析。整体来看，EIWA 算法能够有效提升质心定位精度，降低随机噪声对质心计算结果的影响，从而提高姿态角解算的稳定性。结合 IRLS 姿态解算方法，可以进一步降低异常数据对解算结果的影响，对提升空间相机视轴指向监测系统的姿态解算精度具有重要意义。

4　结　论

针对高分辨率空间测绘相机三轴姿态量高精度测量需求及复杂热环境下姿态误差抑制问题，本文提出了一种基于迭代重加权最小二乘法（IRLS）的三轴姿态角解算方法，并构建了质心提取精度—姿态解算误差之间的误差传递分析框架。

首先，通过仿真分析研究了在采用 IRLS 算法进行三轴姿态角解算过程中，质心提取误差对姿态角解算结果的影响规律。结果表明，质心定位精度是影响姿态角测量精度的主导因素，质心误差会通过几何解算模型被放大并直接反映为姿态角偏差。因此，提高质心定位稳定性和抗噪性能，是提升三轴姿态解算精度的关键。

针对图像探测器随机噪声及低信噪比像素对传统质心算法稳定性造成的不利影响，本文采用基于能量迭代的窗口自适应质心提取算法（EIWA）。该算法通过像素能量贡献分析与迭代优化窗口构建策略，有效抑制低强度噪声像素对质心计算结果的干扰，提高了质心定位的稳定性与重复性。与传统固定窗口质心算法相比，EIWA 方法在保持较高计算效率的同时，表现出更强的鲁棒性和抗噪能力。

在此基础上，开展了空间相机视轴指向热分析实验，模拟不同温度工况下光斑漂移行为，并结合 IRLS 姿态解算方法进行验证。实验结果表明，在采用 EIWA 算法实现质心提取精度条件下，三轴姿态角测量误差 RMS 范围可控制在约 0.21″–0.39″，该精度水平能够满足高分辨率空间相机视轴稳定性监测的工程需求。

综合仿真与热实验结果可以得出：

（1）IRLS 方法能够有效增强三轴姿态解算过程的鲁棒性，降低异常数据对解算结果的影响；

（2）质心提取精度是制约姿态测量精度的关键因素；

（3）所提出的 EIWA 质心算法与 IRLS 姿态解算方法相结合，可在复杂热环境下显著提升三轴姿态角度解算精度与稳定性。

本文研究成果为高分辨率空间测绘相机在轨复杂热环境下的高精度姿态测量与误差补偿提供了理论依据和技术支撑，具有一定的工程应用价值。

参考文献：

[1]　支帅，丁国鹏，韩世豪，等. 基于单相机的空间目标相对位姿测量系统[J]. 中国光学 (中英文), 2025, 18(5): 1111-

1123.
ZHI SH, DING G P, HAN SH H, *et al*.. Monocular camera-based relative position and orientation estimation system for space targets[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1111-1123. (in Chinese).

[2] 刘光. 基于光机热集成的空间相机主动热光学关键技术研究[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), 2019.
LIU G. *Research of the key technologies on active-thermal optics for the space camera based on structural-thermal-optical integration*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese).

[3] WEI Y J, CHENG R M, LI L X, *et al*.. Precision calibration of robot magnetorheological finishing system based on laser tracker[J]. *Photonics*, 2025, 12(1): 57.

[4] 陈力, 刘俊豪, 毕诗文, 等. 空间相机光学系统设计及热稳定性分析[J]. 中国光学 (中英文), 2026, 19(1): 151-163.
CHEN L, LIU J H, BI SH W, *et al*.. Design of space optical systems and analysis of their thermal stability[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(1): 151-163. (in Chinese).

[5] 王艳丽. 光学遥感卫星姿态测量数据处理关键技术研究[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2022, 47(3): 482.
WANG Y L. Research on the key technology of attitude measurement data processing for optical remote sensing satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 482. (in Chinese).

[6] 张志方, 林瀚峥, 李公军. 一种基于虚拟星敏感器的卫星姿态确定方法[J]. 空间控制技术与应用, 2024, 50(1): 8-16.
ZHANG ZH F, LIN H ZH, LI G J. A satellite attitude determination method based on virtual star sensor[J]. *Aerospace Control and Application*, 2024, 50(1): 8-16. (in Chinese).

[7] YI J H, MA Y B, LONG H F, *et al*.. Tightly coupled visual–inertial fusion for attitude estimation of spacecraft[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(16): 3063.

[8] 李对对, 隋正伟, 龙小祥, 等. 高分七号卫星双线阵相机几何处理及其精度验证[J]. 遥感学报, 2024, 28(3): 756-766.
LI D D, SUI ZH W, LONG X X, *et al*.. Geometry processing and accuracy verification of dual-line array cameras of GF-7 satellite[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, 28(3): 756-766. (in Chinese).

[9] LU X L, WANG J R, YANG X C, *et al*.. On-orbit geometric calibration and preliminary accuracy evaluation of GF-14 satellite[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2023, 6(2): 62-70.

[10] 薛志鹏, 丛杉珊, 孙美娇, 等. 空间相机波像差灵敏度及集成仿真方法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(11): 202201.
XUE ZH P, CONG SH SH, SUN M J, *et al*.. Wavefront aberration sensitivity and integrated analysis method for spaceborne camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(11): 202201. (in Chinese).

[11] LU Y T, SUN B, MEI G, *et al*.. Integrated analysis of line-of-sight stability of off-axis three-mirror optical system[J]. *Photonics*, 2024, 11(5): 461.

[12] YU Y, LI Y CH, ZHANG W X, *et al*.. Nanoradians level high resolution autocollimation method based on array slits[J]. *Optics Express*, 2024, 32(15): 25690-25705.

[13] 孙欣, 武永见, 汤天瑾, 等. 空间相机系统自准直传函测试方法及应用[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 202106.
SUN X, WU Y J, TANG T J, *et al*.. Self-collimating MTF test method and application of space camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 202106. (in Chinese).

[14] 闻建刚, 冯文淑, 冯晓斐, 等. 无线传感网中的迭代加权最小二乘定位算法[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(3): 582-589.
WEN J G, FENG W S, FENG X F, *et al*.. Iterative weighted least square localization algorithm in wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(3): 582-589. (in Chinese).

[15] 陈浩, 连增增, 董佳琪, 等. 基于 TOA 的迭代最小二乘定位算法研究[J]. 导航定位与授时, 2024, 11(5): 17-24.
CHEN H, LIAN Z Z, DONG J Q, *et al*.. Research on TOA-based iterative least squares positioning algorithm[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2024, 11(5): 17-24. (in Chinese).

[16] 张振杰, 郝向阳, 程传奇, 等. 基于共面直线迭代加权最小二乘的相机位姿估计[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(5): 1168-1175.
ZHANG ZH J, HAO X Y, CHENG CH Q, *et al*.. Iteratively reweighted least squares method for camera pose estimation based on coplanar line correspondences[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1168-1175. (in Chinese).

[17] 高豆豆, 韩奕璇, 董登峰, 等. 大跨度高精度光斑质心提取[J]. 光学 精密工程, 2025, 33(17): 2691-2703.
GAO D D, HAN Y X, DONG D F, *et al*.. High-precision extraction of adaptive spot centroid in large span[J]. *Optics*

and Precision Engineering, 2025, 33(17): 2691-2703. (in Chinese).

[18] 王敏, 赵金宇, 陈涛. 基于各向异性高斯曲面拟合的星点质心提取算法[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0515006.
WANG M, ZHAO J Y, CHEN T. Center extraction method for star-map targets based on anisotropic Gaussian surface fitting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0515006. (in Chinese).

[19] 赵婧鑫, 周富强. 小尺寸光斑中心的高精度定位算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2690-2693.
ZHAO J X, ZHOU F Q. High-precision center location algorithm of small-scale focal spot[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2690-2693. (in Chinese).

[20] BAO J Y, ZHAN H Y, SUN T, *et al*.. A window-adaptive centroiding method based on energy iteration for spot target localization[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 7004113.

[21] SUN T, XING F, BAO J Y, *et al*.. Centroid determination based on energy flow information for moving dim point targets[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 192: 424-433.

[22] 房思俊, 李博宏, 何斌, 等. 空间引力波望远镜主镜组件结构设计及热稳定性分析[J]. 光电工程, 2024, 51(2): 230157.
FANG S J, LI B H, HE B, *et al*.. Design and thermal stability analysis of primary mirror assembly for space-borne gravitational wave telescope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, 51(2): 230157. (in Chinese).

[23] 金永伟, 刘春龙. 高灵敏度光学探测模块热设计参数灵敏度分析[J]. 红外技术, 2025, 47(2): 141-147.
JIN Y W, LIU CH L. Sensitivity analysis of thermal design parameters of high-sensitivity optical detection module[J]. *Infrared Technology*, 2025, 47(2): 141-147. (in Chinese).

作者简介：

刘俊豪(1999—)，男，吉林松原人，硕士研究生，2021 年于长春理工大学光学工程学院获得工学学士学位，主要从事光学成像设计方面研究。E-mail: 877634743@qq.com

张星祥(1977—)，男，云南大理人，博士，二级研究员，2006 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事空间宽幅成像技术、精密装调与拼接技术、在轨测试与处理方面的研究。E-mail: jan_zxx@163.com