

复杂动态环境下精细导星仪拖尾星斑复原方法

陈怀宇^{1,2,3}, 尹达一^{1,2,3*}

¹中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为提高动态环境下精细导星仪的质心定位精度, 提出一种两步复原方法来解决因载体角运动和小幅度随机振动引起的星斑拖尾问题。根据模糊星斑两次快速傅里叶变换检测出的模糊核函数, 采用约束最小二乘方滤波消除由载体角运动带来的星斑长拖尾。针对残余的载体小幅度随机振动导致的星斑模糊, 将清晰星斑梯度分布先验作为正则约束对星斑粗复原结果进行迭代盲复原, 并引入半二次优化算法求解非凸代价函数来提高迭代收敛速度。实验结果表明, 在角速度为 4000 $\mu\text{rad/s}$ 的动态环境下, 复原后的星斑已接近于高斯分布, 峰值信噪比相比逆滤波复原方法及 R-L 复原方法分别提高了 61.9%、32.9%, 质心定位误差分别减小了 59.9%、43.4%。

关键词 测量; 星斑复原; 精细导星仪; 星点质心定位

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0912002

Restoration of Smear Star Spot for Fine Guidance Sensor under Complex Dynamic Conditions

Chen Huaiyu^{1,2,3}, Yin Dayi^{1,2,3*}

¹Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

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

Abstract In order to improve the centroid location accuracy of fine guidance sensor in dynamic environment, a two-step restoration method is proposed to solve the problem of star spot trailing caused by angular motion of carrier and small amplitude random vibration. Constrained least squares filtering is used to eliminate the long tail of the star spot caused by the angular motion of the carrier according to the fuzzy kernel function detected by the two fast Fourier transforms of the blurred star spot. Aiming at the residual blurring caused by small amplitude random vibration of the carrier, the clear star spot gradient distribution prior is used as a regular constraint to iteratively blind restoration of the coarse restoration results. The half-quadratic optimization algorithm is introduced to solve the non-convex cost function to improve the convergence speed of the iteration. The experimental results show that the restored star spot is close to the Gauss distribution in the dynamic environment of 4000 $\mu\text{rad/s}$ angular velocity, and compared with the inverse filtering and R-L methods, the peak signal-to-noise ratio is 61.9% and 32.9% higher and the error of centroid location is 59.9% and 43.4% lower, respectively.

Key words measurement; star spot restoration; fine guidance sensor; star centroid location

OCIS codes 120.4820; 150.1135; 150.0155; 100.2000

1 引言

空间天文望远镜作为研究宇宙起源、恒星演化、暗物质等前沿物理学问题的重要实验观测设备, 需要对目标保持长时间凝视来获得高质量的天文观测

结果^[1]。然而, 空间望远镜的工作环境复杂, 视轴稳定性会受到载体内外多种扰动因素的影响, 故需要设计专门的精密稳像系统来保持望远镜的视轴稳定。精密稳像系统的视轴扰动检测原理是在望远镜的视场边缘配置精细导星仪(FGS)单独对恒星进行

收稿日期: 2019-03-15; 修回日期: 2019-04-17; 录用日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(40776100)

* E-mail: yinday@mail.sitp.ac.cn

成像,利用短时间内恒星天球位置不变的原理,通过提取的不同帧之间星点位置偏差来解算出视轴的相对姿态变化^[2-3]。因此,精细导星仪的星点定位精度直接决整个精密稳像系统的最终性能。

在静态环境下,由于光学离焦、光学衍射、探测器安装倾斜等问题,精细导星仪像面上星斑分布近似于二维高斯函数^[4],同时关于静态星斑提取方法的研究已趋于成熟^[5-7]。然而,在动态环境下星斑将发生退化形成拖尾模糊现象,固定的星斑能量将弥散到更多的像元,导致星斑图像的信噪比降低,进而影响星斑提取的定位精度,甚至在高动态环境下使提取算法失效^[8],所以研究动态环境下的星斑提取和质心定位方法具有十分重要的现实意义。

国内外对动态拖尾星斑处理方法的研究主要有两个方向:一类是通过推导拖尾星斑的数学解析式直接对质心定位误差进行补偿^[9-11],这类方法对噪声敏感度高,在背景干扰大的情况下将失效;另一类方法是采用图像算法对拖尾星斑进行复原,关键是估计模糊核函数和选取合适的图像复原算法。直接通过姿态传感器如陀螺等^[12]获取模糊核函数的误差较大,常用方法是对星斑频谱进行 Radon 变换来检测模糊运动的方向和距离^[13],但是在低信噪比情况下检测结果会出现多极点,导致检测误差增大。传统复原方法是将星斑拖尾模糊过程近似为星斑在像面上的直线运动过程,然后根据直线模糊核函数进行反卷积计算得到清晰星斑图像^[14-15]。然而,星斑成像过程除了载体角运动之外,还会受到载体小幅度随机振动的影响,此时的模糊核函数难以估计,从而使星斑复原成为盲复原问题。传统盲复原算法具有不确定性,存在迭代不收敛和算法效率低等缺点^[16]。

本文提出一种针对因载体角运动和随机振动引起的星斑拖尾问题的两步复原方法,首先从拖尾星斑两次快速傅里叶变换(FFT)的幅度谱中检测运动模糊核参数,有效减小噪声对模糊运动方向检测的影响,并根据所得模糊核函数使用约束最小二乘方(CLS)滤波对星斑进行快速粗复原。相比于传统方法直接将模糊拖尾星斑近似为直线模糊运动,所提方法在直线模糊运动复原的基础上对清晰星斑梯度先验信息进行迭代盲复原,引入半二次优化算法提高迭代收敛速度,有效消除残余载体小幅度随机振动导致的星斑模糊,经过两步复原的拖尾星斑已接近于静态星斑的高斯分布。

2 直线模糊运动的星斑模型

恒星目标作为一个无穷远的点光源,像面上的星斑能量分布近似于二维高斯函数:

$$I_{\text{static}}(x, y) = \frac{\phi T}{2\pi\rho^2} \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2\rho^2}\right], \quad (1)$$

式中, (x_c, y_c) 为星斑能量中心位置, ρ 为星斑高斯束腰半径, ϕ 为恒星辐射功率, T 为探测器曝光时间。由(1)式可知, 99% 的星斑能量集中在中心的 3ρ 范围内。

在载体动态环境下星斑发生位移,像面上接收到的能量等于能量分布函数对曝光时间和像平面空间的重积分:

$$I = \int_0^T \int_{x_c}^x \int_{y_c}^y I(x, y) dx dy dt. \quad (2)$$

星斑以速度大小 v 在焦平面上移动,运动方向与 x 轴的夹角为 θ ,如图 1 所示。

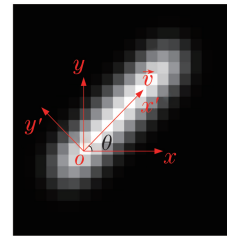


图 1 拖尾星斑

Fig. 1 Smeared star image

在曝光时间 T 内,星斑中心的起始和停止位置分别为 (x_0, y_0) 和 (x_c, y_c) ,在像面上接收的星斑能量为

$$I_{\text{dyn}}(x, y) = \int_0^T \frac{\phi}{2\pi\rho^2} \exp\left\{-\frac{[x-x_c(t)]^2 + [y-y_c(t)]^2}{2\rho^2}\right\} dt = \phi \int_0^T f_{\text{PSF}}[x-x_c(t)] f_{\text{PSF}}[y-y_c(t)] dt, \quad (3)$$

式中, $x_c(t) = x_0 + vt \cos \theta$, $y_c(t) = y_0 + vt \sin \theta$, $f_{\text{PSF}}(x)$ 为星斑的点扩展函数(PSF)。为便于分析,将图 1 所示的坐标系 xoy 逆时针旋转 θ 到新坐标系 $x'oy'$,即

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta + y \sin \theta \\ y' = -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

在 $x'oy'$ 坐标系下, $x'_c(t) = x'_0 + vt \cos \theta$, $y'_c(t) = y'_0$,因此(3)式可改写为

$$I_{\text{dyn}}(x, y) = \phi \int_0^T f_{\text{PSF}}(x' - x'_0 - vt) f_{\text{PSF}}(y' - y'_0) dt. \quad (5)$$

为得出拖尾星斑解析式, Yan 等^[8] 提出基于线段扩展函数(LSSF)的动态星斑描述模型, 已知点目标经过光学系统后的点扩展函数为二维高斯函数, 那么当输入为连续点组成的有限线段目标时, 线段扩展函数等于高斯分布函数在线段上端到端的有限积分:

$$f_{\text{LSSF}}(x) = \frac{1}{L} \int_{x_c}^x f_{\text{PSF}}(u) du = \frac{1}{2L} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}\rho}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x_c}{\sqrt{2}\rho}\right) \right], \quad (6)$$

式中, L 为星斑运动距离, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ 为高斯误差函数。因此(5)可改写为

$$I_{\text{dyn}}(x, y) = \phi \int_0^T f_{\text{PSF}}(x' - x'_0 - vt) f_{\text{PSF}}(y' - y'_0) dt = \frac{\phi}{2v} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x' - x'_0}{\sqrt{2}\rho}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x' - x'_0 - vT}{\sqrt{2}\rho}\right) \right] \times f_{\text{PSF}}(y' - y'_0) = \phi T \cdot f_{\text{LSSF}}(x' - x'_0) \cdot f_{\text{PSF}}(y' - y'_0). \quad (7)$$

(7)式中包括了光通量、曝光时间、高斯束腰半径及运动速度, 可以看出, 拖尾星斑解析式等于运动方向上的线段扩展函数与垂直运动方向上的点扩展函数之积。

3 拖尾星斑的两步复原方法

复原方法分为两步: 第 1 步, 把模糊拖尾星斑近似为直线模糊运动星斑模型, 检测得到模糊运动的方向和长度后采用非盲复原方法对星斑进行粗复原; 第 2 步, 利用清晰星斑像素梯度的先验信息, 采用迭代盲复原方法对粗复原结果进行精细复原, 主要是为减小粗复原结果中残余非直线模糊运动的影响, 并引入半二次优化算法以加快迭代收敛速度。整体算法流程如图 2 所示, 其中 l 、 k 分别表示清晰星斑、模糊核。

3.1 基于两次改进傅里叶变换的星斑粗复原

根据数字图像处理原理, 星斑的模糊过程表示为清晰星斑与模糊核的卷积再加上噪声^[17]:

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) + n(x, y), \quad (8)$$

式中, \otimes 为卷积运算, $f(x, y)$ 为清晰星斑函数, $h(x, y)$ 为模糊核函数, $n(x, y)$ 为加性噪声, $g(x, y)$ 为拖尾模糊星斑。(8)式在频域内可以写为

$$G(s, q) = F(s, q) \cdot H(s, q) + N(s, q), \quad (9)$$

式中, $G(s, q)$ 、 $F(s, q)$ 、 $H(s, q)$ 、 $N(s, q)$ 分别是

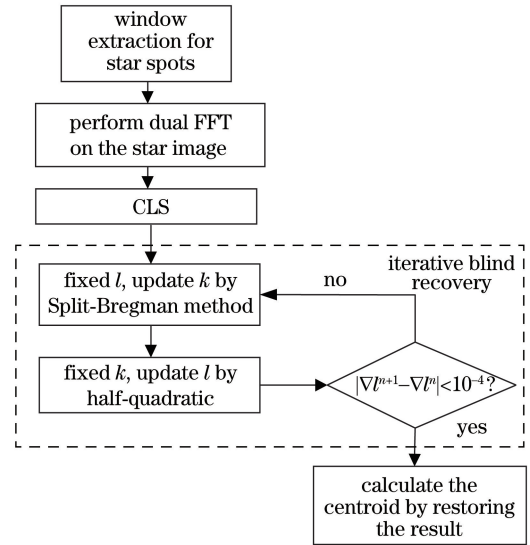


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the proposed algorithm

$g(x, y)$ 、 $f(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 、 $n(x, y)$ 的频域变换结果, s 、 q 是频域坐标位置。根据(3)式, $g(x, y)$ 也可以写成 $f(x, y)$ 在曝光时间内的积分:

$$g(x, y) =$$

$$\int_0^T f(x - vt \cos \theta, y - vt \sin \theta) dt + n(x, y), \quad (10)$$

式中, v 是运动速度大小, $v = L/T$, θ 是运动方向角。对 $g(x, y)$ 进行傅里叶变换, 得

$$G(s, q) = F(s, q) \int_0^T \exp\{-j2\pi[s \cdot vt \cos \theta + q \cdot vt \sin \theta]\} dt + N(s, q). \quad (11)$$

联立(9)式和(11)式可得

$$H(s, q) = \int_0^T \exp\{-j2\pi[svt \cos \theta + qvt \sin \theta]\} dt = \frac{\sin\left[\pi\left(\frac{sL \cos \theta}{M} + \frac{qL \sin \theta}{N}\right)\right]}{\pi\left(\frac{sL \cos \theta}{M} + \frac{qL \sin \theta}{N}\right)} \times \exp\left[-j\pi\left(\frac{sL \cos \theta}{M} + \frac{qL \sin \theta}{N}\right)\right], \quad (12)$$

式中, M 和 N 分别对应窗口大小, 一般开窗为方形, 有 $M = N$ 。对无噪声的理想动态星斑进行频域变换, 将直流分量位于图像原点并取对数显示如图 3 所示, 星斑的运动方向角度为 30° , 运动距离为 10 pixel。

通过幅度谱的暗纹间隔 d 和角度 β 可以求得模糊核参数 L 、 θ , 由 $|H(s, q)| = 0$ 的条件推得

$$\frac{s \cdot L \cos \theta}{N} + \frac{q \cdot L \sin \theta}{N} = m, \quad (13)$$

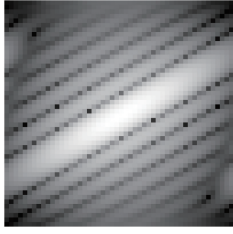


图 3 拖尾星斑频谱图(无噪声)

Fig. 3 Smearing star spot spectrogram (no noise)

式中, m 为正整数。对应幅度谱中暗纹数, 计算相邻暗纹的间隔为

$$d = s \cos \theta + q \sin \theta = \frac{N}{L}. \quad (14)$$

由(13)式可得斜率和运动方向角度 β 的关系

$$\theta = \beta - \frac{\pi}{2}. \quad (15)$$

由(14)式和(15)式可知, 根据幅度谱中暗纹的间隔 d 和角度 β 就能求解运动模糊核的参数。为便于分析, 将幅度谱坐标系 soq 逆时针旋转 θ 角得到新坐标系 $s'oq'$, 即

$$\begin{cases} s' = s \cos \theta + q \sin \theta \\ q' = -s \sin \theta + q \cos \theta \end{cases} \quad (16)$$

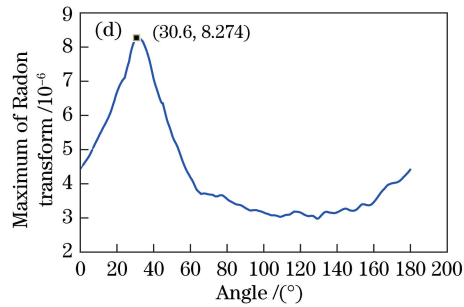
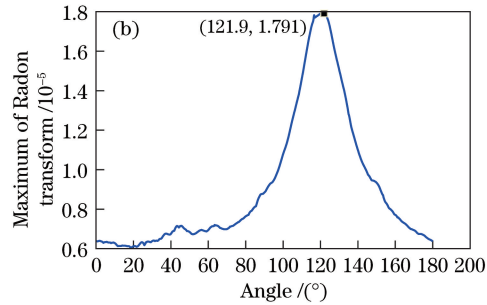
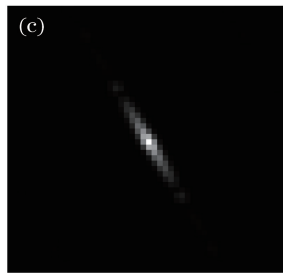
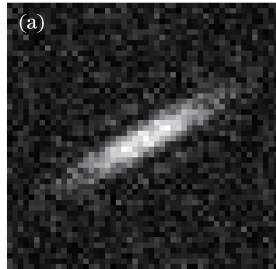


图 4 幅度谱与角度检测结果图。(a)星斑幅度谱;(b)直接检测结果;(c)提升后星斑幅度谱;(d)改进后检测结果

Fig. 4 Results of amplitude spectrum and angle detection. (a) Star spot amplitude spectrum; (b) direct detection result; (c) upgraded spot amplitude spectrum; (d) improved detection result

为提高对条纹的检测精度, 主要考虑如何增强提取的中央亮纹, 同时减小边缘模糊条纹对检测结果的影响, 联系到 sinc 函数的傅里叶变换结果为矩形窗函数, 且 $|H(s', q')|$ 只与 s' 有关, 那么对 $|H(s', q')|$ 进行傅里叶变换,

由(12)式、(16)式可得 $|H(s', q')|$ 为

$$|H(s', q')| = \frac{\sin(\pi A s')}{\pi A s'} = \text{sinc}(\pi A s'), \quad (17)$$

式中, $A = L/N$ 。由(9)式可知, 退化星斑的幅度谱是 $|H(s', q')|$ 对静态星斑幅度谱 $F(s, q)$ 的调制, 所以拖尾星斑幅度谱中包含有类似 sinc 函数的明暗条纹, 如图 3 所示。

根据 sinc 函数的性质,

$$|H(s', q')| \leq \frac{1}{\pi A s'} |H(0, 0)|. \quad (18)$$

(18)式表明, 幅度谱中的亮纹越靠近边缘, 其与中心亮纹的幅值之比越小。当 $s' > 3/A$ 时, 幅值已经下降到中心亮纹的 1/10 以下, 所以在添加均值为 0、标准差为 10 的高斯噪声时出现了图 4(a)所示的边缘条纹与噪声混合模糊甚至消失的现象, 同时频谱亮条纹的宽度较大, 这使得亮条纹在 Radon 变换中投影半径较大, 以上原因都影响了对直线角度的检测精度。如图 4(b)所示, 在角度 122.7° 处取得最大 Radon 变换, 但由(15)式计算得到的运动方向角度 $\theta = 121.9^\circ - 90^\circ = 31.9^\circ$, 与理论值存在较大误差。

$$\begin{aligned} \tilde{H}(\tilde{s}', \tilde{q}') &= \mathcal{F}[H(s', q')] = \\ & \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(s', q') \exp[-j2\pi(s'\tilde{s}' + q'\tilde{q}')] ds dq = \\ & \int_{-\infty}^{+\infty} H(s') \exp(-j2\pi s'\tilde{s}') ds \int_{-\infty}^{+\infty} \times \\ & \exp(-j2\pi q'\tilde{q}') dq = \mathcal{F}[H(s')] \delta(2\pi\tilde{q}'), \end{aligned} \quad (19)$$

式中, $\delta(\cdot)$ 为冲击函数。由(19)式可知, $\tilde{H}(\tilde{s}', \tilde{q}')$ 的幅度谱仅为 $\tilde{q}'=0$ 坐标轴上的一条亮纹。由傅里叶变换的旋转性质和(16)式可知, $\tilde{H}(\tilde{s}, \tilde{q})$ 的幅度谱直接由 $\tilde{H}(\tilde{s}', \tilde{q}')$ 旋转 θ 得到, 即 $\tilde{H}(\tilde{s}, \tilde{q})$ 的幅度谱同样为一条亮纹但是角度变为 θ , 如图 4(b) 所示。两次快速傅里叶变换的幅度谱集中在一条中央亮纹上, 使得 Radon 直线角度检测的精度更高, 经过灰度拉伸后的检测结果如图 4(d) 所示, Radon 变换在 $\theta=30.6^\circ$ 处取最大值, 误差进一步减小。

得到模糊核函数后采用 CLS 滤波来对星斑进行粗级快速复原, CLS 是以平滑度作为复原效果的度量标准, 本质上是求解带约束的最小准则函数,

$$C = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\nabla^2 f(x, y)]^2, \quad (20)$$

约束条件为

$$\|G - H\hat{F}\|_2^2 = \|N'\|_2^2, \quad (21)$$

式中, \hat{F} 为待求解的清晰星斑的估计, H 为直线运动模糊核函数, G 为模糊星斑函数, N' 为加性噪声, $\|\cdot\|$ 为求 L2 范数。引入拉格朗日乘子, (21) 式变为

$$L(\hat{F}) = \|P\hat{F}\|_2^2 - \lambda(\|G - H\hat{F}\|_2^2 - \|N'\|_2^2), \quad (22)$$

式中, λ 为拉格朗日参数, P 为拉普拉斯模板。对 \hat{F} 求一阶导数并令其等于零来求解极值, 得

$$\hat{F} = \frac{\lambda H^* G}{\lambda H^* H + P^* P} = \left(\frac{H^*}{\|H\|_2^2 + \gamma \|P\|_2^2} \right) G, \quad (23)$$

式中, $\gamma=1/\lambda$, H^* 为 H 的共轭复数。

3.2 基于星图梯度先验的星斑精细复原

将拖尾星斑近似为直线模糊运动并对星斑模型进行粗复原可以消除大部分载体角运动的影响, 但是也要考虑到载体小幅度随机振动的存在。此时无法直接获取不规则运动的模糊核, 使得星斑复原变为盲复原问题, 图像盲复原算法是利用清晰星斑和模糊函数的先验信息, 以贝叶斯最大后验概率估计原理进行迭代计算来得到清晰图像,

$$\operatorname{argmax} p(l, k | b) = \operatorname{argmax} p(b | l, k) p(l) p(k), \quad (24)$$

式中, l, b, k 分别是清晰星斑、退化星斑、模糊核, $p(b | l, k)$ 是似然函数, $p(l)$ 是清晰星斑的先验信息, $p(k)$ 是模糊核的先验信息。

似然函数 $p(b | l, k)$ 是基于模糊卷积的模型, $z = k \otimes l - b$, 图像噪声 z 是各自独立的高斯分布,

似然函数为

$$p(b | l, k) = \prod_{i \in M} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp(-\|k \otimes l - b\|_i^2 / 2\sigma_i^2), \quad (25)$$

式中, i 是像素在星斑 M 中的像元序号, σ_i^2 是噪声方差, 似然函数即星斑的保真项, 表示退化星斑和清晰星斑的相似度。

为求得清晰星斑的图像梯度先验 $p(l)$, 对清晰星斑图像像素值梯度统计分布进行分析。常见的分布模型为

$$p(l) = \prod_{i \in M} \exp(-|\nabla l|^a), \quad (26)$$

式中, α 是模型分布的参数。当 $\alpha=2$ 时, $p(l)$ 为高斯分布; 当 $\alpha=1$ 时, $p(l)$ 为拉普拉斯分布; 当 $0 < \alpha < 1$ 时, $p(l)$ 为超拉普拉斯分布, 能较好地代表图像稀疏性。而实际静态星斑分布比拖尾星斑更紧凑, 梯度的分布则较为稀疏, 如图 5 所示, 将其作为星斑像素梯度的先验约束。

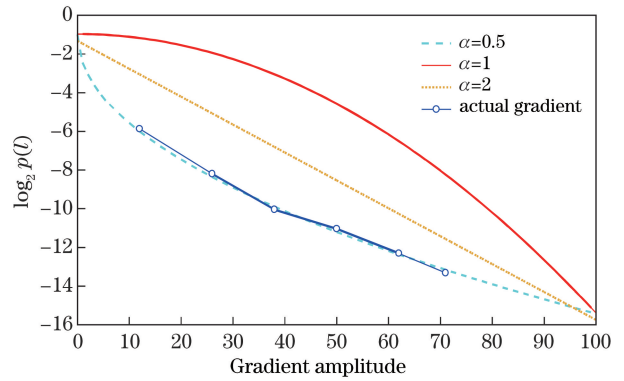


图 5 星斑梯度分布

Fig. 5 Distribution of star spot gradient

模糊核的先验 $p(k)$ 是对载体抖动的估计, 简单的模糊核估计如粗复原中的近似直线运动估计。文献[18]根据对相机二维空间抖动路径的统计分析, 得出模糊核的直方图曲线斜率比高斯分布下降得更快, 更近似于指数分布,

$$p(k) = \prod_{i \in M} \exp(-\tau k_i) (k_i \geq 0), \quad (27)$$

式中, τ 是速率参数, i 是像素位置索引。

求解后验概率最大的参数, 对(24)式的对数结果取反, 得到能量函数的最小值:

$$E(l, k) = -\ln p(l, k | b). \quad (28)$$

将(25)~(27)式代入(28)式, 得

$$E(l, k) \propto \lambda \sum_{i \in M} \|k \otimes l - b\|_i^2 + \beta \sum_{i \in M} |\nabla l|_i^\alpha + \sum_{i \in M} \|k\|_i. \quad (29)$$

式中, $\| * \|$ 表示 L2 范数, $| * |$ 表示 L1 范数。因为直接寻优的计算复杂且不易收敛, 所以采用交替迭代更新的方法来求解 k 和 l 。

a) 固定 l 不变来更新 k :

$$\operatorname{argmin}_k E(k) = \lambda \sum_{i \in M} \|k \otimes l - b\|_i^2 + \sum_{i \in M} \|k\|_i. \quad (30)$$

(30) 式是 L1 范数正则化的函数, 同时也是不可微凸函数, 使用 Split-Bregman 方法, 在频域上的解可以表示为

$$k = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{\overline{\mathcal{F}(\partial_x l)} \cdot \mathcal{F}(\partial_x b) + \overline{\mathcal{F}(\partial_y l)} \cdot \mathcal{F}(\partial_y b) + \lambda}{\mathcal{F}(\partial_x l)^2 + \mathcal{F}(\partial_y l)^2 + \lambda} \right\}, \quad (31)$$

式中, ∂_x, ∂_y 分别表示对 x, y 方向求偏导, $\mathcal{F}(\cdot)$ 表示傅里叶变换, $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 表示傅里叶逆变换, $\overline{\mathcal{F}(\cdot)}$ 表示共轭复数。

b) 固定 k 不变来更新 l :

$$\operatorname{argmin}_l E(l) = \lambda \sum_{i \in M} \|k \otimes l - b\|_i^2 + \sum_{i \in M} |\nabla l|_i. \quad (32)$$

式中, $E(l)$ 是非凸函数, 假设存在最小值 l , 它将满足欧拉-拉格朗日方程

$$k \otimes (k \otimes l - b) - \frac{\beta}{\lambda} \operatorname{div} \left[\frac{(|\nabla l|^a)'}{|\nabla l|} \nabla l \right] = 0. \quad (33)$$

使用迭代半二次型解法, 令 n 为迭代次数, $u = \frac{|\nabla l|^a}{2|\nabla l|}$, 算法步骤为

a) 初始化: $n=0, b^0=0, u^0=1$ 。

b) 联立偏微分方程得到 b^{n+1} :

$$\begin{cases} k \otimes (k \otimes l - b) - \frac{\beta}{\lambda} \operatorname{div} \left[\frac{(|\nabla l|^a)'}{|\nabla l|} \nabla l \right] = 0 \\ u^n \nabla l = 0 \end{cases}. \quad (34)$$

c) 更新 u^n :

$$u^{n+1} = \frac{(|\nabla l|^a)'}{2|\nabla l|}. \quad (35)$$

d) 重复 a), b) 过程, 直到满足收敛条件 $|\nabla l^{n+1} - \nabla l^n| < 10^{-4}$, 算法运行结束。

4 算法仿真实验结果与分析

为验证本文方法, 假设星斑束腰半径为 1.8 pixel, 峰值灰度为 220, 直线运动速度方向分别为 $45^\circ, 60^\circ$, 速度大小为 11 pixel/s, 接着利用在 $-1 \sim 1$ pixel/s 范围内随机生成的速度大小来模拟随机振动影响, 方向与主运动方向垂直。最后按照 (3) 式在 1 s 积分时间内生成仿真拖尾星斑, 每一步复原的结果如图 6 所示。

复原前、后的星斑码值分布如图 7 所示, 经本文方法复原后的星斑能量分布更集中, 信噪比更高。

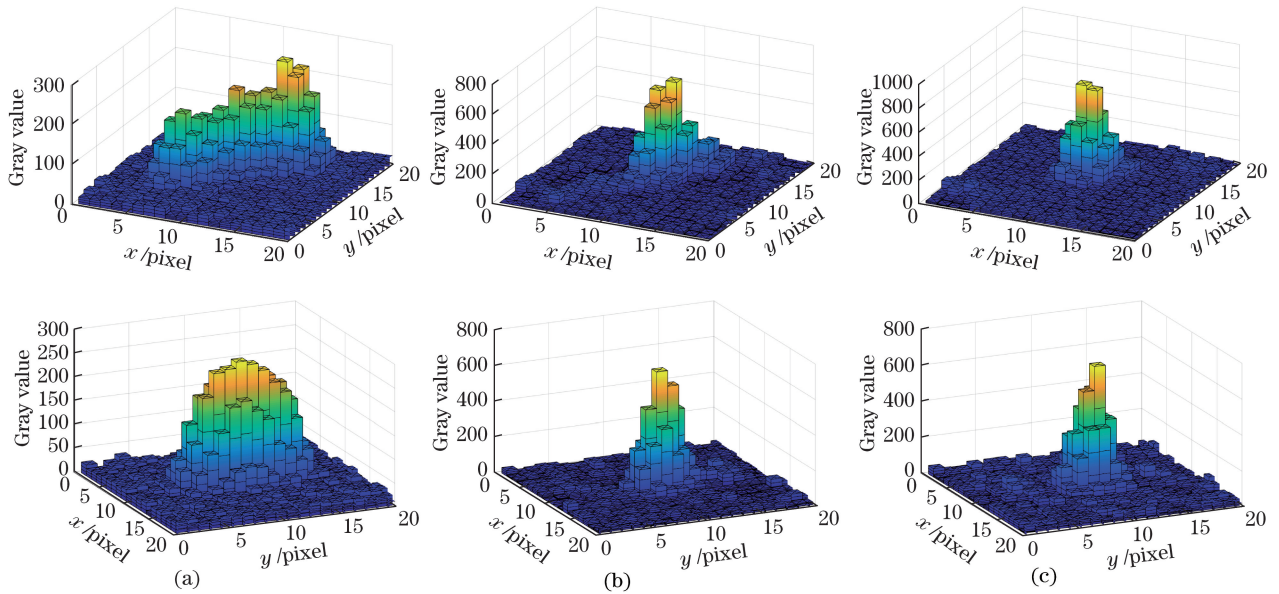


图 6 复原效果对比。(a)未复原星斑;(b)粗复原星斑;(c)精复原星斑

Fig. 6 Comparison of recovery effect. (a) Unrestored star spot; (b) rough recovery star spot; (c) fine recovery star spot

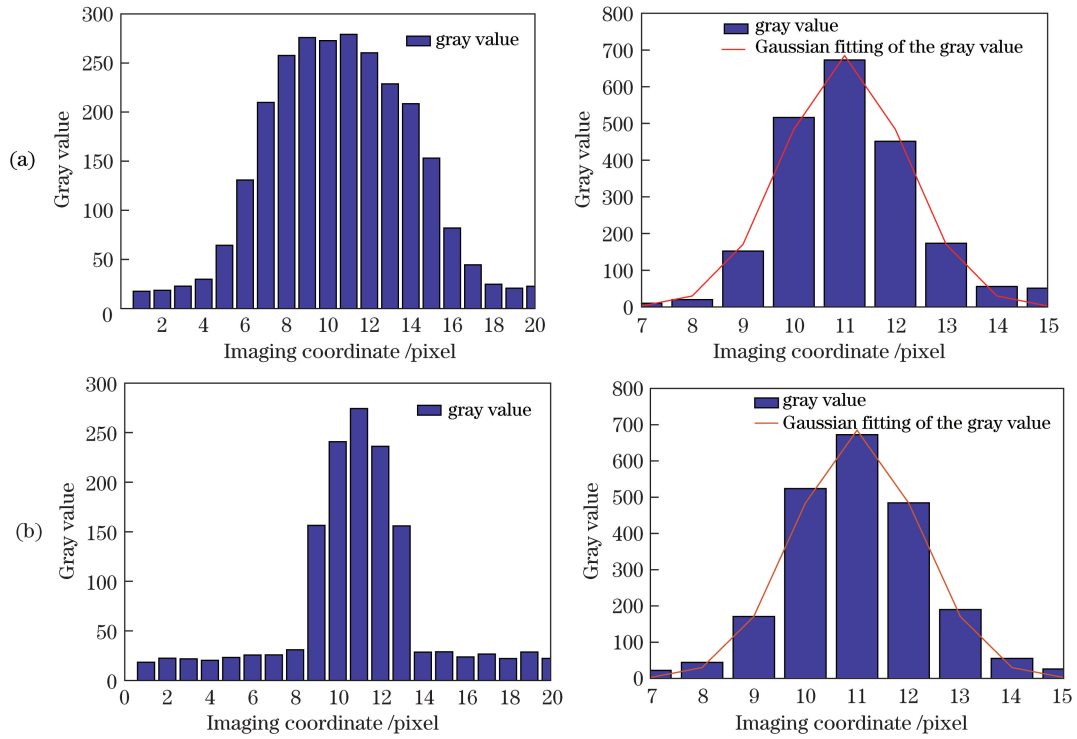


图 7 复原前后的星斑码值分布对比。(a)直线运动方向;(b)垂直运动方向

Fig. 7 Comparison of original star spot and restored star spot. (a) Linear direction of motion; (b) vertical direction of motion

对复原后的码值分布进行高斯拟合,得到码值的拟合均方根误差为 27.3、束腰半径为 1.705 pixel,星斑码值从非正态分布复原为高斯分布,复原结果非常有利于后续的星点提取定位。

采用峰值信噪比(PSNR)来评价不同复原算法的效果,PSNR 的计算公式为

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \times \lg \frac{255^2}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [I(i) - K(i)]^2}, \quad (36)$$

式中, $I(i)$ 为清晰星斑, $K(i)$ 为复原后星斑, i 为对应的像素位置。

表 1 所示为本文算法与其他复原算法的对比,仿真算法运行平台为 i7-7700k,仿真软件为 MATLAB 2017a。

表 1 不同算法效果对比

Table 1 Effect comparison of different algorithms

Algorithm	PSNR /dB	Running time /s
Inverse filtering	25.70	0.03
R-L	32.51	1.20
Proposed	43.25	0.10

可以看出,本文两步复原方法得到星斑的 PSNR 和质心定位精度最高,传统方法如逆滤波(inverse filtering)是近似把复原过程当作直线模糊运动的反

卷积过程,直接通过频谱求解模糊核,过程简单、运算速度快,但是效果最差;而采用迭代复原的 Richardson-Lucy(R-L)方法的效果虽有提升,但是对于运动距离大的动态星斑,迭代次数超过 10 次时效果已无明显提高且耗时长;本文方法虽然通过两步复原,但利用了星斑像素梯度分布作为正则约束项并引入半二次算法优化求解,减少了迭代收敛的时间,同时在改进的两次频域变换幅度谱上检测运动方向,提高了在低信噪比下星斑图的检测精度。

5 实验结果与分析

为验证本文方法在实际精细导星仪样机工作时的性能,搭建的硬件平台如图 8 所示,验证平台置于光学隔震台上,并由激光光源、小孔衰减器、控制星点位置的摆镜和导星相机组成。标定后的镜头焦距为 137 mm,探测器像元尺寸为 11 μm 。

FGS 位于两级隔震平台,所受扰动集中在小于 3 Hz 的低频部分,设定扰动源小块摆以 3.3 Hz 的频率作正弦扰动,扰动幅度分别为 300 μrad 、200 μrad 、100 μrad ,相应的近轴位置像面上的星点位移(以像元为单位)为 $\Delta x = 2\theta f/l$,其中 θ 为快摆偏角、 f 为镜头焦距、 l 为像元尺寸,得到星点的位移幅度为 7.5 pixel、5.0 pixel、2.5 pixel。

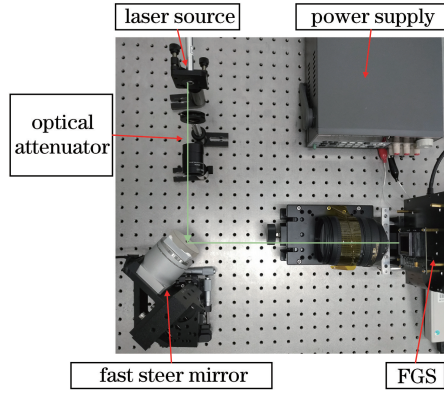


图 8 实验硬件平台

Fig. 8 Experimental hardware platform

FGS 样机的积分时间为 50 ms, 得到星点定位的位置曲线如图 9 所示。当扰动幅度为 300 μrad 时, 误差曲线如图 10 所示。

质心定位误差是复原定位得到的质心曲线与其拟合的正弦曲线之差, 计算不同扰动幅度下的实验结果, 如表 2 所示。

在 200 μrad 扰动幅度下, 本文方法复原后的质心定位精度提升最大, 定位误差相比于逆滤波和 R-L 方法分别减小了 78.5%、54.3%。随着星斑漂移速度的增加, 三种方法的定位精度都有所下降, 在 500 μrad 扰动幅度下, 本文复原方法定位误差相比于其他两种方法仍有 56.38%、33.26% 的减小, 如图 11 所示。

表 2 3.3 Hz 不同扰动幅度下的实验结果

Table 2 Experimental results at 3.3 Hz with different disturbance amplitudes

Disturbance amplitude / μrad	PSNR after restoration / dB			Centroid localization error / pixel		
	Inverse filtering	R-L	Proposed	Inverse filtering	R-L	Proposed
500	16.62	20.02	28.21	0.713	0.466	0.311
400	17.56	21.15	30.05	0.510	0.357	0.213
300	18.27	22.84	31.70	0.398	0.267	0.134
200	19.11	24.14	32.11	0.321	0.151	0.069
100	21.36	27.25	35.51	0.159	0.094	0.052

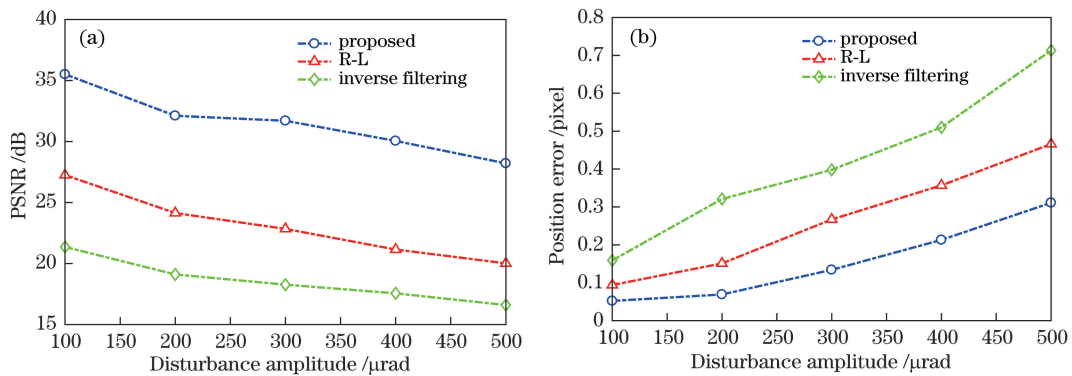


图 11 3.3 Hz 不同扰动幅度下的实验结果曲线。(a) PSNR; (b) 质心定位误差

Fig. 11 Experimental curves of 3.3 Hz with different amplitudes. (a) PSNR; (b) position error

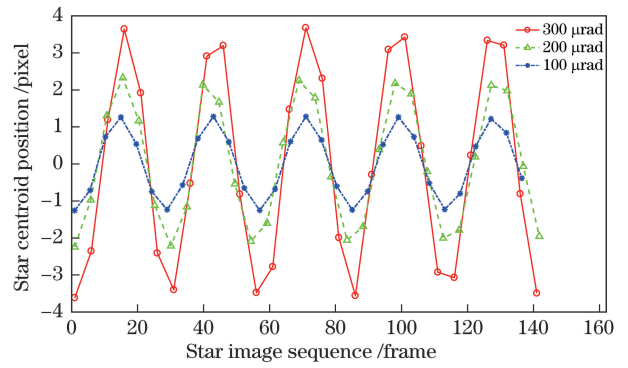


图 9 3.3 Hz 不同扰动幅度下的星点坐标曲线

Fig. 9 Star-point coordinate curves at 3.3 Hz with different disturbance amplitudes

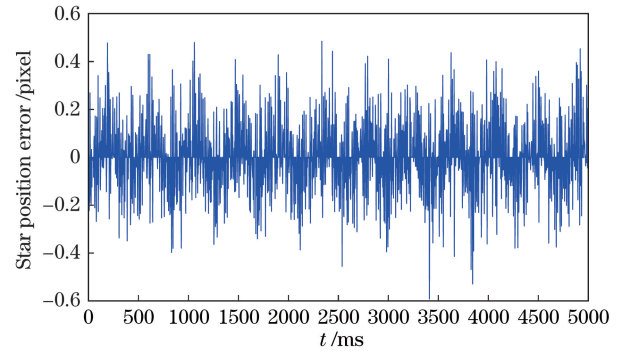


图 10 3.3 Hz、300 μrad 星斑漂移速度下的跟踪误差曲线

Fig. 10 Tracking error curve at 3.3 Hz and 300 μrad spot drift velocity

实际望远镜稳像系统中检测到的视轴偏移小于 $0.5''$ ($\sim 2.42 \mu\text{rad}$), 考虑到实际系统需要 10 m 光学焦距, 由于实验条件的限制, 采用 100 mm 小焦距镜头来搭建的仿真实验应采用星点位移范围而不是视轴偏移角度来作为实验扰动条件。因此, 为达到与实际环境相当的星点偏移程度, 模拟实验的视轴扰动幅度应达到实际系统的 100 倍 (即 $242 \mu\text{rad}$) 以上。于是设定摆镜以大角速度 $4000 \mu\text{rad/s}$ 进行匀速摆动, 导星仪的积分时间为 100 ms, 相邻帧之间的视轴偏移达到 $400 \mu\text{rad}$, 复原前、后的星斑如图 12 所示。

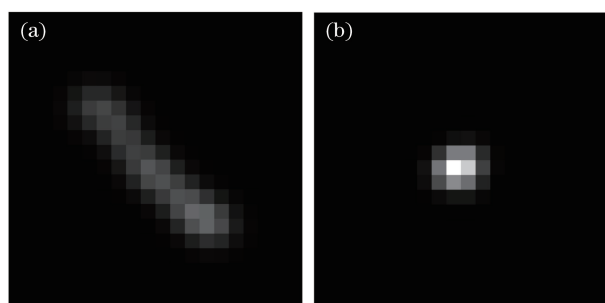


图 12 $4000 \mu\text{rad/s}$ 速度下复原前、后的星斑对比。
(a) 原始星斑; (b) 复原星斑

Fig. 12 Contrast of star spots before and after restoration under $4000 \mu\text{rad/s}$. (a) Original star spots; (b) restored star spots

质心定位精度是通过复原后相邻帧之间的质心位移与根据摆镜偏转角度得到的理论值之差计算得到, 三种方法的 PSNR 与定位精度如表 3 所示。

表 3 $4000 \mu\text{rad/s}$ 速度下复原实验结果

Table 3 Experimental results of restoration at $4000 \mu\text{rad/s}$

Algorithm	PSNR after restoration /dB	Localization error /pixel
Inverse filtering	19.53	0.312
R-L	23.78	0.221
Proposed	31.61	0.125

经本文方法复原后的 PSNR 值相比于逆滤波和 R-L 方法提高了 61.9%、32.9%, 星点定位误差减小了 59.9%、43.4%。

6 结 论

为解决复杂载体动态环境下星斑产生拖尾造成信噪比降低以及星点提取精度下降的问题, 提出一种基于改进两次傅里叶变换和图像先验的两步复原方法。在改进两次傅里叶变换的幅度谱中检测运动方向, 有效地提高了低信噪比下星斑图的检测精度。

相比于传统方法直接将模糊拖尾星斑近似为直线模糊运动, 本文方法在直线模糊运动复原的基础上再根据清晰星斑梯度先验信息进行迭代盲复原, 有效消除了残余的载体小幅度随机振动导致的星斑模糊。实验结果表明, 在角速度为 $4000 \mu\text{rad/s}$ 的运动环境下, 本文方法复原后的 PSNR 值相比于逆滤波和 R-L 方法提高了 61.9%、32.9%, 星点定位误差减小了 59.9%、43.4%, 有效地提高了精细导星仪在动态环境下的星点提取精度, 对于实际工程应用具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Sabelhaus P A, Campbell D, Clampin M, *et al.* Overview of the James Webb space telescope (JWST) project[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5899: 58990P.
- [2] Sheng H Z, Evans C. Optical design of the JWST fine guider sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7786: 77860Y.
- [3] Meza L, Tung F, Anandakrishnan S, *et al.* Line of sight stabilization of James Webb space telescope[C] // 27th Annual AAS Guidance and Control Conference, February 5-9, 2005, Breckenridge, CO, USA. USA: NASA, 2005.
- [4] Wang H Y, Zhou W R, Lin H Y, *et al.* Parameter estimation of Gaussian gray diffusion model of static image spot [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0323004.
王海涌, 周文睿, 林浩宇, 等. 静态像点高斯灰度扩散模型参数估计方法 [J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0323004.
- [5] Liu N N, Xu S Y, Cao X T, *et al.* Application of adaptive weighted centroid algorithm in high accuracy star localization [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0812002.
刘南南, 徐抒岩, 曹小涛, 等. 自适应加权质心算法在高精度星点定位中的应用 [J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0812002.
- [6] Quine B M, Tarasyuk V, Mebrahtu H, *et al.* Determining star-image location: a new sub-pixel interpolation technique to process image centroids [J]. Computer Physics Communications, 2007, 177(9): 700-706.
- [7] Wang H Y, Xu E S, Li Z F, *et al.* Gaussian analytic centroiding method of star image of star tracker [J]. Advances in Space Research, 2015, 56(10): 2196-2205.
- [8] Yan J Y, Jiang J, Zhang G J. Dynamic imaging model and parameter optimization for a star tracker [J].

- Optics Express, 2016, 24(6): 5961-5983.
- [9] Tan W F, Qin S Q, Myers R M, *et al.* Centroid error compensation method for a star tracker under complex dynamic conditions[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33559-33574.
- [10] Fei X, Nan C, Zheng Y, *et al.* A novel approach based on MEMS-gyro's data deep coupling for determining the centroid of star spot[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012: 403584.
- [11] 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.
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.
- [12] Liu Y, Dai D K, Ma L H, *et al.* A star sensor calibration method based on attitude correlated frame[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1128003.
刘宇, 戴东凯, 马丽衡, 等. 一种基于姿态关联帧的星敏感器标定方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1128003.
- [13] Sun H W, Desvignes M, Yan Y H, *et al.* Motion blur parameters identification from Radon transform image gradients[C]//2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, November 3-5, 2009, Porto, Portugal. New York: IEEE, 2009: 2098-2103.
- [14] Zhang W N, Quan W, Guo L. Blurred star image processing for star sensors under dynamic conditions [J]. Sensors, 2012, 12(5): 6712-6726.
- [15] Wu X J, Wang X L. Multiple blur of star image and the restoration under dynamic conditions[J]. Acta Astronautica, 2011, 68(11/12): 1903-1913.
- [16] Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. Journal of the Optical Society of America, 1972, 62(1): 55-59.
- [17] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing [M]. 3rd ed. Englewood: Prentice Hall, 2007.
- [18] Sun D, Gao Q W, Lu Y X, *et al.* A novel image denoising algorithm using linear Bayesian MAP estimation based on sparse representation[J]. Signal Processing, 2014, 100: 132-145.